

DOI
УДК 631.563.2

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКОЙ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗЕРНО

Д.А. Будников

Реферат. В настоящее время разработка систем эффективного управления технологическим оборудованием остается актуальной задачей. Целью данной работы является разработка и изготовление системы управления с обучением, позволяющей реализовывать управление по задаваемым критериям сушки и действующей на основе изменения текущей влажности обрабатываемого материала. В данной статье представлены результаты разработки системы управления лабораторной установкой электрофизического воздействия на зерно. В ходе выполнения данной работы применялись элементы планирования эксперимента, статистической обработки, компьютерного моделирования с применением прикладного программного обеспечения электродинамического моделирования, разработки SCADA систем и программирования аппаратуры управления. Эксперименты проводились с использованием сертифицированного измерительного оборудования. Ценность результатов исследования заключается в определении энергоэффективных режимов работы оборудования обработки зерна с применением микроволнового поля. Научная новизна исследования состоит в определении влажности зерна по относительному ослаблению напряженности электромагнитного поля в слое обрабатываемого зерна. Основные положения: применение разработанной системы контроля уровня влажности позволяет определять влажность зернового слоя в процессе обработки его микроволновым полем; внедрение одной установки комбинированной СВЧ-конвективной сушки зерна производительностью 5 тонн в час, работающей под управлением разработанной системы и рассчитанной на производительность позволяет получить доход 5231,2 тыс. руб. за восемь лет реализации проекта при этом простой срок окупаемости капитальных вложений составит 3,6 года. Выводы: применение разработанной системы экспериментальной установкой микроволнового воздействия на зерно позволяет реализовать управление по оптимальным критериям управления, при этом средняя энергоемкость сушки пшеницы с 20 до 14 % составляет 3,7 МДж на кг испаренной влаги; реализация системы управления технологическим процессом электрофизического воздействия с обучением позволяет производить накопление статистических данных и выработку режимов работы оборудования по более полным данным.

Ключевые слова: энергоэффективность; критерий оптимальности; электрофизическое воздействие; сушка зерна; система управления.

Введение. Существуют многочисленные работы российских и зарубежных исследователей, посвященные обработке зерновых материалов с применением электрофизических воздействий. На фоне развивающихся технологий интенсификации роста растений и стимуляции их развития, возрастают требования к технологиям послеуборочной обработки [1]. Основными направлениями являются, такие как ИК-излучение, озон, аэроионы, СВЧ поле, УЗ – воздействие и т.д. могут применяться для предпосевной обработки, интенсификации тепло- массопереноса, микронизации, повышению кормовой ценности подготовки к скармливанию, и т.д. [2-7].

Управление процессом сушки и послеуборочной обработки зерновых является одним из ключевых факторов, влияющих на себестоимость производства зерновой продукции [8-12]. Так пересушивание зерна пшеницы на 1% (до 13%) влечет за собой удорожание сушки на 30%, а на 2% (до 12%) на 64% [8]. Подходы у реализации систем управления зерносушилками и зерносушильными комплексами также различаются. Существуют как системы, построенные на релейной логике и минимальном применении логических аппаратов [8], так и сложные с применением нейросетевых технологий для управления элеваторами и зерносушильными комплексами [8, 11, 12]. Для фер-

мерских хозяйств и предприятий, ориентированных на выращивание зерновых для дальнейшего скармливания животным, требуется разработка сушильных установок и систем управления ими с учетом требуемой производительности и с учетом критериев эффективности, задаваемых оператором.

Условия, материалы и методы. Электрофизические воздействия, такие как ИК-излучение, озон, аэроионы, СВЧ поле, УЗ – воздействие и т.д. могут применяться для предпосевной обработки, интенсификации сушки, микронизации, подготовки к скармливанию, повышению кормовой ценности и т.д. Разработка системы управления данным оборудованием позволит обеспечить выполнение технологических процессов с учетом экономических и технологических требований потребителя.

Для разработки и реализации системы управления проведен анализ существующих на рынке существующих систем автоматического и автоматизированного управления сушкой зерновых культур, в том числе с применением электрофизических воздействий (табл. 1).

Для оценки существующих трендов по разработке систем управления электрофизическим оборудованием был проведен патентный поиск, результат патентного поиска по данному направлению свидетельствует как о высоком интересе к применению электрофизиче-

Таблица 1 – Системы управления сушкой зерна

№	Технология сушки	Критерий управления	Контролируемые параметры	Регулируемые (задаваемые) параметры	Исполнение системы управления	Фирма
1	Шахтная сушилка	Минимизация затрат на сушку	Влажность зерна, температура зерна, температура агента сушки	Требуемая влажность зерна на выходе, максимальное отклонение влажности зерна на выходе, температура агента сушки.	Интеллектуальная система управления сушилкой IDC (INTELLIGENT DRYER CONTROL); SCADA-система (панель оператора, удаленный ПК)	Tornum
2	Шахтная сушилка	Минимизация травмирования (бережная сушка)	Температура зерна, температура агента сушки	Требуемая влажность зерна на выходе, температура агента сушки.	автоматическая система управления сушилкой: SCADA-система (панель оператора, удаленный ПК)	STRAHL
3	ИК сушилка	Равномерность сушки	Температура зерна, температура агента сушки	Режим работы источников ИК-излучения, температура агента сушки.	Автоматизированное сенсорное управление: панель оператора	ЗАВОД «АГРОМИГ»
4	Шахтная сушилка	Минимизация затрат на сушку	Температура зерна, температура агента сушки	Требуемая влажность зерна на выходе, температура агента сушки.	автоматическая система управления сушилкой: SCADA-система (панель оператора, удаленный ПК, мобильное приложение)	Far West Electric Ltd.
5	Шахтная сушилка	Минимизация затрат на сушку	Влажность зерна на входе; влажность зерна на выходе; температура агента сушки	Требуемая влажность зерна на выходе, температура агента сушки.	автоматическая система управления сушилкой: SCADA-система (панель оператора, удаленный ПК)	KENTRA (DRYER MASTER 510)
6	Шахтная сушилка	Время сушки	Температура зерна; наличие материала	Требуемое время сушки	Автоматизированное управление: панель оператора	MOORE Automation inc.
7	СВЧ-конвективная	Минимизация затрат на сушку либо время сушки	Температура зерна; температура агента сушки; наличие материала	Режим работы генераторов поля, температура агента сушки; скорость движения материала	Автоматизированное управление: панель оператора	ACT

ских воздействий при обработке сельскохозяйственных материалов, так и о совершенствовании способов и систем управления оборудованием для его осуществления. Кроме того, в настоящее время все чаще встречаются разработки систем управления обработки сельскохозяйственных материалов с использованием нейросетей [8, 11, 12].

Результаты говорят о том, что наибольший интерес представляют применение инфракрасного и микроволнового воздействий, обеспечивающие тепловое воздействие и обеззараживающее действие. Однако существующие системы управления не предусматривают контроль параметров поля по объему зоны обработки либо в контрольных точках. В то же время происходит измерение параметров аген-

та сушки на выходе и выходе из материал и, в некоторых случаях, контроль влажности обрабатываемого материала в потоке.

Управление установкой предполагается вести по одному из двух критериев: максимальная производительность, минимальная энергоемкость. По мере накопления данных (по скорости влагоудаления и энергоемкости сушки) будет обновляться прошивка контроллера, на базе которого реализуется система управления. Упрощенно схема автоматизации установки микроволнового воздействия на зерно представлена на рисунке 1.

В разрабатываемой системе управления 3 контура (подача/ разгрузка материала; подготовка агента сушки; управление источниками СВЧ мощности), контролируемые централизо-

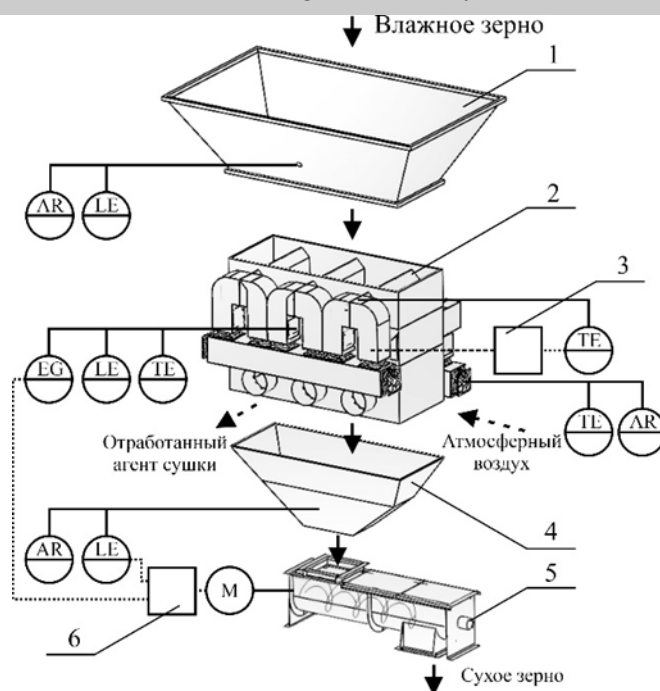


Рис. 1 – Схема автоматизации установки микроволнового воздействия на зерно
 1 – загрузочный бункер; 2 – зона СВЧ-конвективной обработки; 3 – блок управления магнетроном; 4 – выгрузочный бункер; 5 – разгрузочное устройство; 6 – общий щит управления; LE – датчики уровня; AR – датчики влажности; EG – датчики напряженности; TE – датчики температуры

ваным блоком управления. Первый контур регулируется исходя из требуемой производительности (пропускной способности) установки и реализуется посредством векторного преобразователя частоты. При этом влагосъем может быть различным и определяется обрабатываемым материалом, его исходной влажностью, линией, в которую интегрирована установка. Второй контур определяет требуемые свойства воздуха, как агента сушки, при этом регулируется мощность, рассеиваемая на ТЭНах воздухоподготовки при постоянной скорости подачи воздуха. Этот контур во многом определяет энергоемкость сушки. Третий контур определяет работу магнетронов и их охлаждение. Этот контур является определяющим как энергоемкости, так и продолжитель-

ности процесса сушки (скорость влагосъема).

Исходными данными для разработки зависимости скорости продвижения материала, режима работы магнетронов и требуемой мощности на ТЭНах явились полученные ранее зависимости процесса сушки вида:

$$\frac{dW}{dt} = f(W, Q_{СВЧ}) \rightarrow \max \quad (1)$$

$$\frac{dQ}{dW} = f(W, Q_{СВЧ}) \rightarrow \min \quad (2)$$

где $\frac{dW}{dt}$ – скорость влагоудаления, %/мин;

$\frac{dQ}{dW}$ – энергоемкость сушки при те-

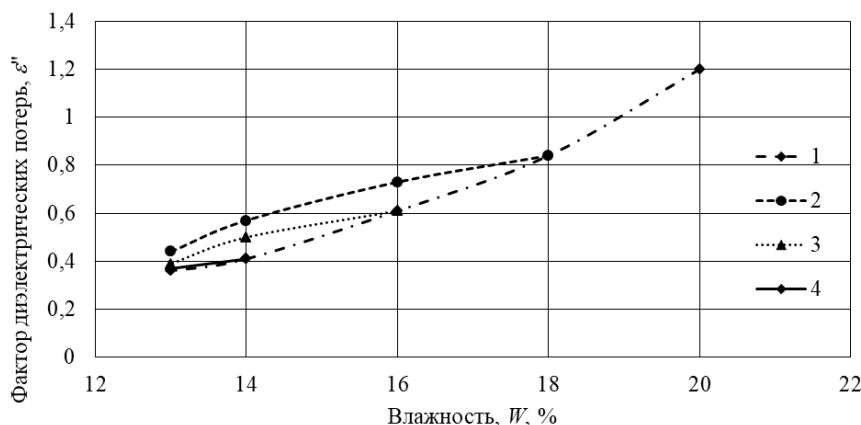


Рис. 2 – Зависимость фактора диэлектрических потерь пшеницы от влажности в процессе СВЧ-обработки
 1 – не подвергавшаяся СВЧ воздействию; 2-4 СВЧ-конвективная сушка

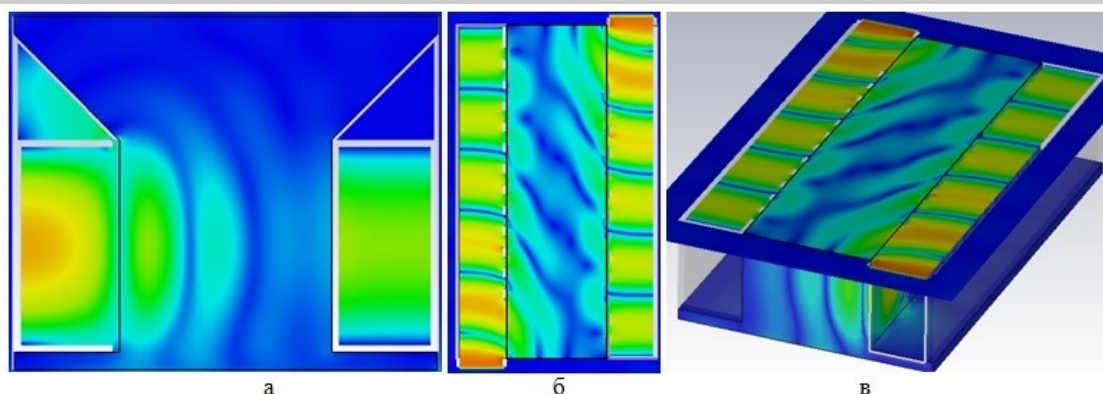


Рис. 3 – Результаты моделирования распространения электромагнитного поля в зерновом слое экспериментальной установки
а – вид сбоку; б – вид сверху; в – изометрическая проекция

кущей влажности, МДж/кг испаренной влаги;
 $W=f(E/E_0)$ – текущая влажность зерна, %;
 $Q_{СВЧ}$ – кратность СВЧ воздействия (отношение времени работы СВЧ к времени цикла), о.е.

Исходная влажность материала либо задается оператором, либо определяется поточным датчиком влажности. Так как в процессе СВЧ-конвективной обработки происходит изменение связи влаги с зерном и отклонения зависят как от исходной влажности материала, так и от количества пройденных зон СВЧ-воздействия (продолжительности СВЧ-обработки). На рисунке 2 представлена зависимость фактора диэлектрических потерь пшеницы от влажности в процессе СВЧ-обработки в зависимости от исходной влажности.

Таким образом, показания приборов поточной влажности будут выводить недостоверные показания. Для учета текущей влажности следует определять степень ослабления напря-

женности электрического поля в материале от источника к противоположной стенке. Для определения степени ослабления напряженности могут быть установлены датчики, расположенные у источника и на противоположной стенке. Отношение показаний этих датчиков определит степень снижения напряженности и, следовательно, влажность материала. При учете того, что волноводы и зоны СВЧ-конвективного воздействия представляют собой сложную форму, тарировку показаний будет выполнена на основе результатов численного моделирования.

Применяемые в данном случае воспринимающие устройства представляют собой медные пластины диаметром, соответствующем четверти длины волны и разделенным слоем фторопласта толщиной 2 мм. При этом вся конструкция помещена в корпус из материала, обладающего малым уровнем диэлектрических потерь. Воспринимающие устройства размещаются по мере прохождения зернового слоя в зоне СВЧ-конвективной обработки. Первичная тарировка основывается на результатах моделирования распространения микроволнового поля в разрабатываемой экспериментальной установке электрофизического воздействия на зерно. Пример полученной в результате моделирования картины, полученной для зернового слоя пшеницы влажностью 16%, представлен на рисунке 3.

Зависимость относительного снижения напряженности поля по мере распространения в слое зерна, E_2/E_1 , о.е., от влажности зерна, W_3 , %, в первом приближении может быть аппроксимирована линейной зависимостью вида:

$$\frac{E_2}{E_1} = -0,0119 \cdot W_3 + 0,5062, \quad (3)$$

где E_1 – напряженность электрического поля на удалении 40 мм от волновода (место установки первого воспринимающего устройства), В/м;

E_2 – напряженность электрического поля на удалении 80 мм от волновода (место установки второго воспринимающего устройства), В/м.

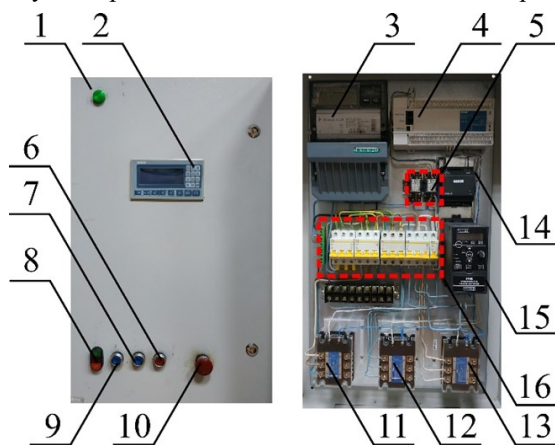


Рис. 4 – Щит управления зерносушилкой

1 – индикатор работы; 2 – информационная панель ИП-320; 3 – счетчик с интерфейсом RS-485; 4 – ПЛК; 5 – промежуточные реле; 6-10 – кнопки ручного управления работой установки; 11-13 – твердотельные реле управления работой подачи агента сушки, загрузочного устройства, источников СВЧ-энергии; 14 – блок питания; 15 – ПЧВ управления работой выгрузного механизма; 16 – автоматические выключатели

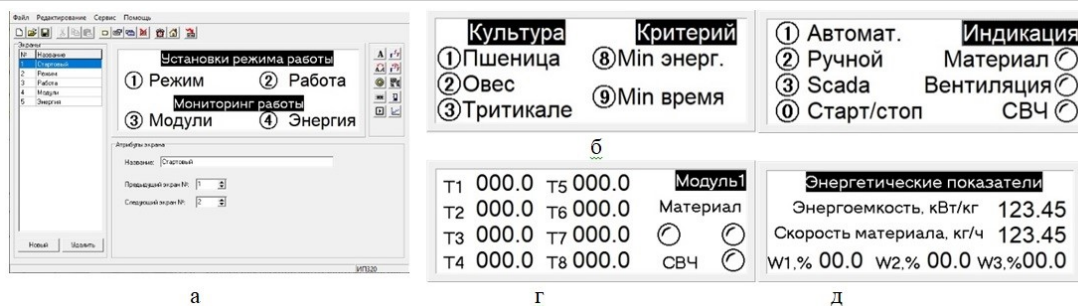


Рис. 5 – Экраны работы установки

а – интерфейс среды разработки и стартовый экран; б – экран выбора режима работы; в – экран старта остановки работы установки; г – экран мониторинга модулей СВЧ-конвективной обработки; д – экран мониторинга текущих энергетических показателей

При этом для практического применения в диапазоне влажности 14-16% в системе управления будет применяться обратная зависимость, определяющая влажность зерна от относительного снижения напряженности поля:

$$W_3 = -83,211 \cdot \frac{E_2}{E_1} + 42,294. \quad (4)$$

В процессе проведения экспериментальных исследований (по мере накопления данных) производится корректировка указанной зависимости.

Внешний вид щита управления лабораторной системы управления представлен на рисунке 4. В образце предусмотрена возможность ручного управления установкой, автоматического управления, а также управление через SCADA-систему по каналу RS-485. В последнем случае происходит накопление данных, необходимое для адаптивного алгоритма и интеллектуального управления установкой.

Автоматическое управление по выбранному критерию осуществляется посредством управляющей программы, прошитой в программируемый логический контроллер (ПЛК). В данном случае в качестве ПЛК использован ПЛК-160 фирмы ОВЕН. Основанием для реализации управляющих программ по критери-

ям эффективности явились регрессионные зависимости скорости влагоудаления и энергоёмкости сушки, полученные на предыдущих этапах. В данном режиме контроль влажности материала осуществляется автоматически точным датчиком влажности, располагаемым в грузозначном бункере.

Выбор режима работы, типа обрабатываемой культуры, критерия эффективности и т.д., а также мониторинг работы установки осуществляется с помощью информационной панели ИП-320. На рисунке 5 представлены реализованные экраны работы установки.

Для реализации интеллектуального управления и накопления данных для оптимизации прошивки автоматического управления производится запись следующих данных: обрабатываемая культура; влажность материала (в грузозначном бункере; при промежуточных измерениях; в выгрузном бункере); скорость выгрузного устройства; соотношение времени работы СВЧ к продолжительности цикла (от 0 до 1); температура агента сушки; температура зерна между зонами СВЧ-обработки; расход электроэнергии; аварийные ситуации.

Для обеспечения безопасности персонала и технологического процесса работа источников микроволновой энергии возможна только при

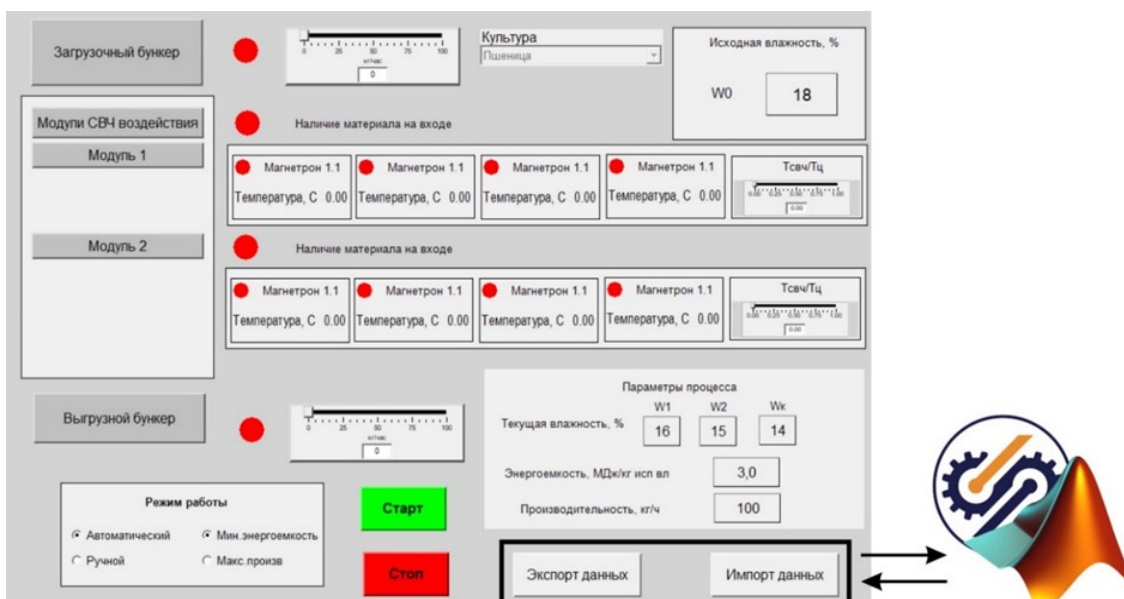


Рис. 6 – Мнемосхема

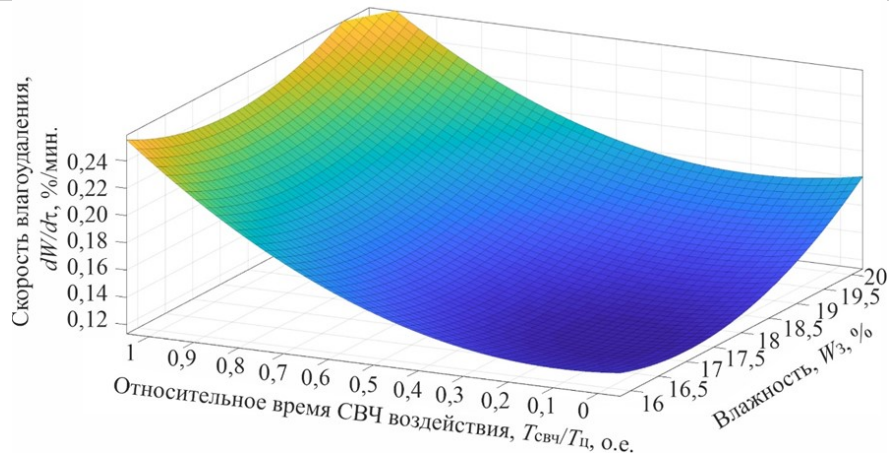


Рис. 7 – Поверхность отклика скорости влагоудаления

наличии материала, контролируемого емкостными датчиками. Определение текущей влажности зерна в процессе СВЧ-конвективной обработки осуществляется датчиками, фиксирующими снижение уровня напряженности электрического поля от источника до точки контроля (на основе результатов моделирования).

Реализация интеллектуальной системы электрофизического воздействия на зерно осуществляется посредством управления технологическим процессом с обучением. При этом происходит накопление данных о энергоёмкости процесса сушки с применением СВЧ-конвективного воздействия в SCADA системе с периодической выгрузкой в блок оптимизации, где производится анализ и корректировка вероятностных моделей с дальнейшим возвращением в виде доработанных режимов работы оборудования. На рисунке 6 представлен пример мнемосхемы SCADA-системы устройства.

Работа может осуществляться в автоматическом и ручном режимах. В автоматическом режиме происходит реализация режимов, основанных на целевых функциях. Ручной режим прежде всего предназначен для реализации экспериментальных исследований для накопления данных по различным культурам и комбинациям воздействий. В автоматиче-

ском режиме выгрузка данных осуществляется при нажатии кнопки «Стоп», в ручном происходит принудительный импорт-экспорт данных соответствующими кнопками.

Реализация управляющих программ для экспериментальной установки базировалась на проведенных на предыдущих этапах исследований [13], предполагавших сушку пшеницы при следующих факторах: $W_3=14\div 26\%$ (исходная влажность зерна); $T_{свч}/T_{ц}=0\div 0,5$ (отношение времени обработки СВЧ-полем к времени цикла); $T_{возд}=20\div 40\text{ }^\circ\text{C}$ (температура агента сушки). По результатам экспериментальных исследований получены зависимости времени сушки, t и затрат на удаление килограмма влаги, Q , МДж/кг, от указанных исходных параметров процесса (W_3 ; $T_{свч}/T_{ц}$; $T_{возд}$).

Результаты и обсуждение.

В результате обработки результатов эксперимента получена следующая зависимость скорости влагоудаления, dW/dr , %/мин, от текущей влажности зерна и относительного времени СВЧ воздействия:

$$dW / dt = 1,87 - 0,2059 \cdot W_3 + 0,08666 \cdot \frac{T_{свч}}{T_{ц}} + 0,00603 \cdot W_3^2 - 0,007 \cdot W_3 \cdot \frac{T_{свч}}{T_{ц}} + 0,1376 \cdot \left(\frac{T_{свч}}{T_{ц}} \right)^2, (5)$$

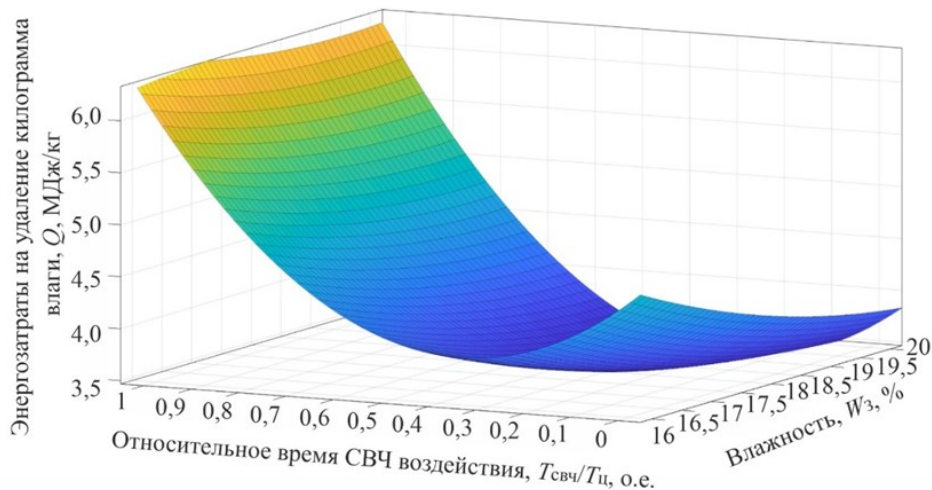


Рис. 8 – Поверхность отклика энергозатрат удаления влаги

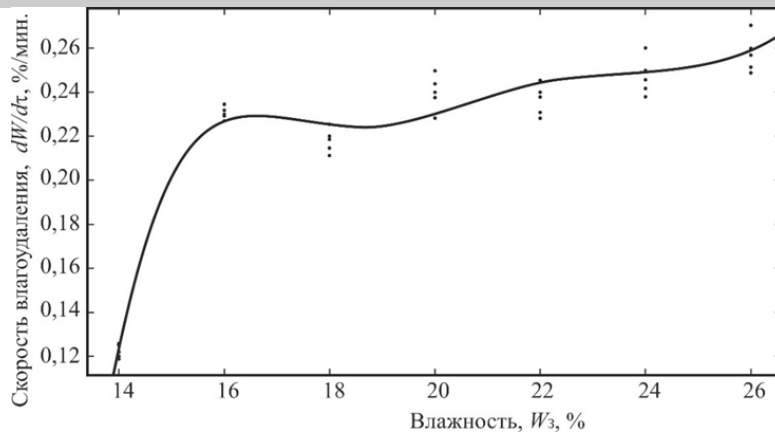


Рис. 9 – Результаты эксперимента по реализации режима максимальной скорости удаления влаги

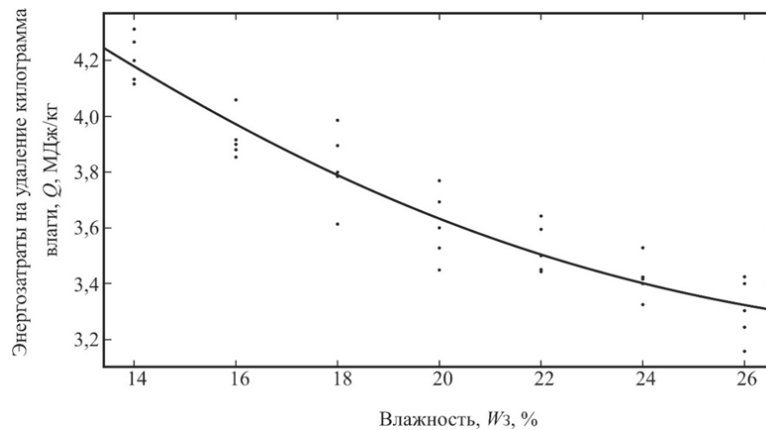


Рис.10 – Результаты эксперимента по реализации режима минимальных энергозатрат

где W_3 – текущая влажность зерна, %;
 $\frac{T_{СВЧ}}{T_{Ц}}$ – относительное время СВЧ воздействия (отношение времени обработки СВЧ-полем к времени цикла), о.е.

Показатели качества модели: $SSE=0,0008739$; $R^2=0,9574$.

Зависимость энергозатрат на удаление килограмма влаги, Q , МДж/кг, от текущей влажности зерна и относительного времени СВЧ воздействия:

$$Q = 16,86 - 1,242 \cdot W_3 - 4,933 \cdot \frac{T_{СВЧ}}{T_{Ц}} + 0,02917 \cdot W_3^2 + 0,1 \cdot W_3 \cdot \frac{T_{СВЧ}}{T_{Ц}} + 5,067 \cdot \left(\frac{T_{СВЧ}}{T_{Ц}}\right)^2 \quad (6)$$

Показатели качества модели: $SSE=0,1111$; $R^2=0,9883$.

На рисунках 7 и 8 представлены поверхности отклика, полученные в результате обработки экспериментальных данных при температуре агента сушки 20 °С. Данные результаты позволяют реализовывать управление оборудованием по целевым функциям (1) и (2), указанным ранее.

В процессе работы, помимо контроля наличия материала, и первичного определения влажности зернового слоя производится контроль текущей влажности зерна.

Так как в процессе СВЧ-конвективного воздействия происходит изменение формы связи влаги в зерне, необходимо проводить тарировку существующих средств измерения

влажности, либо разработка новых. В случае измерений в микроволновом поле измерение может быть основано на ослаблении напряженности поля по мере проникновения в слой обрабатываемого зерна.

Экспериментальные данные реализации управляющих программ для пшеницы влажностью 14-26% представлены на рисунках 9 и 10.

На графике скорости влагоудаления четко выражена зона изменения связи влаги в зерне на уровне влажности 16-17%. В зоне большего уровня влажности работа осуществляется с минимальным включением источников микроволновой мощности или полностью без их участия. В этом случае глубина проникновения микроволнового поля в зерно уменьшается до значений, не позволяющих проводить равномерную обработку зернового слоя. Таким образом, наиболее рациональным с точки зрения процесса сушки с применением микроволнового поля на частоте 2,45 ГГц, является использование источников СВЧ при влажности зерна менее 17%.

График зависимости энергоемкости сушки демонстрирует уровень затрат энергии на испарение кг влаги на низком уровне, однако стоит учитывать, что при минимальных затратах увеличивается время сушки.

Предварительный расчёт экономической эффективности внедрения одной установки комбинированной СВЧ-конвективной сушки зерна, работающей под управлением разрабо-

танной системы и рассчитанной на производительность производительностью 5 тонн в час позволяет получить годовую экономию на один тонну обработанного зерна до 30,82 рублей, при этом чистый дисконтированный доход на восьмой год реализации проекта составил 5231,2 тыс. руб. (с учетом дисконтирования 1090,10 тыс. руб.); простой срок окупаемости капитальных вложений составил 3,6 года, а дисконтированный 5,4 года.

Выводы.

Определение текущей влажности зернового слоя в процессе СВЧ-конвективной обработки возможно по степени ослабления напряженности электромагнитного поля. Таблица может быть выполнена на основе результатов электродинамического моделирования

по справочным и экспериментальным данным о диэлектрических свойствах обрабатываемых материалов с последующей корректировкой на основе экспериментальных исследований.

Применение разработанной системы экспериментальной установки микроволнового воздействия на зерно позволяет реализовать управление по оптимальным критериям управления, при этом средняя энергоёмкость сушки пшеницы с 20 до 14 % составляет 3,7 МДж на кг испаренной влаги.

Реализация системы управления технологическим процессом электрофизического воздействия с обучением и подкреплением позволяет производить накопление статистических данных и выработку режимов работы оборудования по более полным данным.

Литература

1. An Activated Potassium Phosphate Fertilizer Solution for Stimulating the Growth of Agricultural Plants / S.V. Belov, Y.K. Danyleiko, A.P. Glinushkin, V.P. Kalinitchenko [et al.] // *Frontiers in Physics*. 2020. Vol. 8:618320. doi: 10.3389/fphy.2020.618320.
2. Kliuchnikov A. Development of new method of drying at energy-saving universal dryer to improve quality of crops used in fodder production // *Engineering for rural development*. Jelgava. 2019. 22.-24.05. doi: 10.22616/ERDev2019.18.N237.
3. Experimental investigation and mathematical modeling of the unsteady drying kinetics of durum wheat grains / H. Bagar, A. El Afif, I. Mrani // *Moroccan Journal of Chemistry*. 2021. Vol. 9. No. 3. P. 499-512. doi: https://doi.org/10.48317/IMIST.PRSM/morjchem-v9i3.26982.
4. Research Methodology for Microwave-Convective Processing of Grain / A.N. Vasiliev, V. P. Goryachkina, D.A. Budnikov // *International Journal of Energy Optimization and Engineering (IJEEO)*. April-June 2020. Vol. 9 No. 2. Article: 1. Pages: 11. doi: 10.4018/IJEEO.2020040101.
5. Heat and Mass Transfer on the Microwave Drying of Rough Rice Grains: An Experimental Analysis / E.G. Silva, R.S. Gomez, J.P. Gomes, W.P. Silva [et al.] // *Agriculture*, 2021, Vol. 11. No. 8. doi: https://doi.org/10.3390/agriculture11010008.
6. Impact of specific energy input of a 915 MHz microwave dryer on quality, functional, and physicochemical properties of different rice cultivars / R.M. Bruce, G.G. Atungulu, S. Sadaka, D. Smith // *Cereal Chemistry*. 2021. No. 98. P. 557– 570. doi: https://doi.org/10.1002/cche.10398.
7. Effect of microwave pretreatment on the exchange energy of forage barley / A. Belov, A. Vasilyev, A. Dorokhov // *Journal of Food Process Engineering*. 2021. Vol. 44. No. 4. doi: 10.1111/jfpe.13785.
8. A neural network model used in continuous grain dryer control system / Y. Jin, K.W. Wong, D. Yang, Z. Zhang, W. Wu, J. Yin // *Drying Technology*. 2021. doi: 10.1080/07373937.2021.1891930.
9. Management of technological processes of transportation and drying of grain / V.S. Kudryashov, M.V. Alekseev, A.V. Ivanov, I.A. Kozenko, S.V. Ryazantsev // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. No. 640 062016. doi: 10.1088/1755-1315/640/6/062015.
10. Intelligent Monitoring and Control of Grain Continuous Drying Process Based on Multi-Parameter Corn Accumulated Temperature Model / Y. Wu, W. Wu, F. Han, Y. Zhang, Y. Xu // *International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA)*. Changsha. China. May 27–28. 2017. P. 77–80.
11. Modelling of a Conveyor-Belt Grain Dryer Utilizing a Sigmoid Network / O.F. Lutfy, H. Selamat, S.B.M. Noor // *10th Asian Control Conference (ASCC)*. Kota Kinabalu. Malaysia. 2015. P. 1–5.
12. A neural-network-based model predictive control scheme for grain dryers / L. Honglu, C. Songlin // *Drying Technology*. 2019. Vol. 38. No. 8. doi: 10.1080/07373937.2019.1611598.
13. Будников Д.А. Экспериментальное исследование коэффициента равномерности распространения микроволнового поля шести источников СВЧ // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2021. Т. 68. N1(42). С. 3-7. doi: 10.22314/2658-4859-2021-68-1-3-7.

Сведения об авторах:

Будников Дмитрий Александрович, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории электрофизического воздействия на сельскохозяйственные объекты и материалы
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ"

адрес для связи: 140010, Московская обл., г Люберцы, мкр. Зенино ЖК Самолёт, ул. Вертолетная, д. 4, корп. 2, кв. 366

телефон: +7 (968) 624-50-66

e-mail: dimml3@inbox.ru

CONTROL SYSTEM OF AN EXPERIMENTAL INTALLATION FOR ELECTROPHYSICAL EFFECTS ON GRAIN

D.A.Budnikov

Abstract. Currently, the development of effective control systems for technological equipment is still actual problem. This project aims to develop and manufacture a learning control system that can implement control according to specified drying criteria and operating on the basis of changes in the moisture content of the processed material. This arti-

cle presents the results of the development of a control system for a laboratory setup of electrophysical effects on grain. During this work elements of experimental planning, elements of statistical processing, computer modeling by using applied software for electrodynamic modeling, development of SCADA systems and programming of control equipment were used. The experiments were carried out using certified measuring equipment. The value of the research results lies in determining energy-efficient operating modes of grain processing equipment using a microwave field. The scientific novelty of the research consists in determining the grain wetness by the relative decrease voltage of the electromagnetic field in the layer of processed grain. Main provisions: the application of the developed humidity level control system allows you to determine the wetness content of the grain layer during processing by a microwave field; the implementation of one setup of combined microwave-convective drying of grain with a capacity of 5 tons per hour, operating under the control of the developed system and designed for productivity, allows you to get an income of 5231.2 thousand rubles for eight years of project implementation, while the simple payback period of capital investments will be 3.6 years. Conclusions: the using of the developed system by the experimental installation of microwave effecting on grain makes it possible to implement control according to relevant control criteria, while the average energy consumption of wheat drying from 20 to 14% stands at 3.7 MJ per kg of evaporated moisture; the implementation of the control system for the technological process of electrophysical exposure with further improvement allows for the accumulation of statistical information and the developing of operating modes of equipment according to more complete data.

Key words: energy efficiency; relevant criteria; electrophysical effect; grain drying; control system.

References

1. Belov SV, Danyleiko YK, Glinushkin AP, Kalinitchenko VP. An activated potassium phosphate fertilizer solution for stimulating the growth of agricultural plants. *Frontiers in Physics*. 2020. Vol.8: 618320. doi: 10.3389/fphy.2020.618320.
2. Kliuchnikov A. Development of new method of drying at energy-saving universal dryer to improve quality of crops used in fodder production. *Engineering for rural development*. Jelgava. 2019; 22-24.05. doi: 10.22616/ERDev2019.18.N237.
3. Bagar H, El Afif A, Mrani I. Experimental investigation and mathematical modeling of the unsteady drying kinetics of durum wheat grains. *Moroccan Journal of Chemistry*. 2021; Vol. 9. No. 3. 499-512 p. doi: <https://doi.org/10.48317/IMIST.PRSM/morjchem-v9i3.26982>.
4. Vasiliev AN, Goryachkina VP, Budnikov DA. Research methodology for microwave-convective processing of grain. *International Journal of Energy Optimization and Engineering (IJEEO)*. April-June 2020; Vol. 9. No. 2. Article: 1. Pages: 11. doi: 10.4018/IJEEO.2020040101.
5. Silva EG, Gomez RS, Gomes JP, Silva WP. Heat and mass transfer on the microwave drying of rough rice grains: an experimental analysis. *Agriculture*. 2021; Vol. 11. No. 8. doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture11010008>.
6. Bruce RM, Atungulu GG, Sadaka S, Smith D. Impact of specific energy input of a 915 MHz microwave dryer on quality, functional, and physicochemical properties of different rice cultivars. *Cereal Chemistry*. 2021; No. 98. 557-570 p. doi: <https://doi.org/10.1002/cche.10398>.
7. Belov A, Vasilyev A, Dorokhov A. Effect of microwave pretreatment on the exchange energy of forage barley. *Journal of Food Process Engineering*. 2021; Vol. 44. No. 4. doi: 10.1111/jfpe.13785.
8. Jin Y, Wong KW, Yang D, Zhang Z, Wu W, Yin J. A neural network model used in continuous grain dryer control system. *Drying technology*. 2021; doi: 10.1080/07373937.2021.1891930.
9. Kudryashov VS, Alekseev MV, Ivanov AV, Kozenko IA, Ryazantsev SV. Management of technological processes of transportation and drying of grain. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; No. 640 062016. doi: 10.1088/1755-1315/640/6/062015.
10. Wu Y, Wu W, Han F, Zhang Y, Xu Y. Intelligent monitoring and control of grain continuous drying process based on multi-parameter corn accumulated temperature model. *International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA)*. Changsha. China. May 27-28. 2017; 77-80 p.
11. Lutfy OF, Selamat H, Noor SBM. Modelling of a conveyor-belt grain dryer utilizing a sigmoid network. 10th Asian Control Conference (ASCC). Kota Kinabalu. Malaysia. 2015; 1-5 p.
12. Honglu L, Songlin C. A neural-network-based model predictive control scheme for grain dryers. *Drying technology*. 2019; Vol.38. 8. doi: 10.1080/07373937.2019.1611598.
13. Budnikov DA. [Experimental study of the coefficient of uniformity of propagation of the microwave field of six microwave sources]. *Elektrotehnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2021; Vol.68. 1(42). 3-7 p. doi: 10.22314/2658-4859-2021-68-1-3-7.

Authors:

Budnikov Dmitry Aleksandrovich - Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher of the Laboratory of electrophysical impact on agricultural objects and materials.

Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Agroengineering Center VIM"

Address: 140010, Moscow region, Lyubertsy, md. Zenino ZhK Samolet, st.Helicopter, d. 4, building. 2, apt. 366, phone: +7 (968) 624-50-66, e-mail: dimm13@inbox.ru