

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТИМУЛЯЦИИ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ЗЕРНА СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЕМ

© 2025 г. **Е. А. Четвериков**, кандидат технических наук, **А. Г. Арженовский**, доктор технических наук, **Е. А. Шабаетв**, кандидат технических наук, **В. Н. Беленов**, кандидат технических наук

*Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева,
127434, Москва, ул. Тимирязевская, 49
E-mail: e.chetverikov@rgau-msha.ru*

Исследования проводили с целью определения возможности снижения общей энергоёмкости процесса конвективной сушки товарного зерна на промышленных установках шахтного и барабанного типов производительностью от 2 до 50 т/ч по готовому продукту за счет применения малых доз микроволновой энергии, действующей на продукт перед засыпкой в сушильную камеру зерносушилок. Эксперименты выполняли в 2024 г. в ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева». Объектом исследования служила экспериментальная установка сушки с последовательным действием на продукт микроволнового излучения и конвективной тепловой энергии. Критерием энергоэффективности служило потребление энергии за единицу времени. В качестве продукта использовали семена пшеницы и ржи разной толщины слоя в лотках «прозрачных» для микроволновой и конвективной тепловой энергии. Лотки располагались на цепном транспортере и перемещались посредством электропривода последовательно через камеру микроволнового нагрева на базе желобкового волновода, в который с двух сторон подавалась СВЧ-энергия от двух магнетронных источников, работающих в импульсном режиме в противофазе. После этого лотки перемещались в камеру конвективного обдува, где на продукт снизу подавался теплый воздух, имитируя режим конвективной сушки на промышленных установках. В первой серии экспериментов продукт массой 3 кг, влажностью 28...32% и толщиной слоя 4 см помещался только в камеру конвективного обдува, где высушивался до 12%, что соответствует ГОСТу на хранение зерна. Влажность зерна определялась термогравиметрическим способом. Для определения энергозатрат на сушку была проведена серия экспериментов. В ходе них была установлена мощность калорифера, которая составила 5 кВт. Затем были определены время сушки и энергоёмкость процесса, которая составила от 8,5 до 9,5 кВт в час на килограмм испаряемой влаги. В следующей серии экспериментов на аналогичную навеску зерна воздействовали сначала микроволновым излучением на уровне 1...5% от конвективной тепловой энергии. Затем лоток с продуктом перемещался на транспортере в камеру конвективного обдува, где происходило досушивание до 12% влажности зерна. На основе построенных зависимостей снижения массы продукта за время сушки рассчитывалась суммарная энергоёмкость, которая составила при добавлении 1% СВЧ-мощности от тепловой в процесс сушки, от 6,8 до 7,8 кВт·ч/кг по испаренной влаге и при 5% – от 6,2 до 7,0 кВт·ч/кг. Таким образом, в среднем снижение энергопотребления составило 19...27%. Выявленный эффект при добавлении малых доз микроволновой энергии в процесс сушки зерна свидетельствует о перспективности использования малоомощного микроволнового излучения на установках промышленной сушки зерна.

EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION OF THE STIMULATION PARAMETERS OF THE GRAIN CONVECTIVE DRYING BY RF-RADIATION

E. A. Chetverikov, A. G. Arzhenovsky, E. A. Shabaev, V. N. Belenov

*Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
127434, Moscow, ul. Timiryazevskaya, 49
E-mail: e.chetverikov@rgau-msha.ru*

The target of the study was to determine the possibility of reducing the general energy intensity of convective grain drying in industrial installations, such as mine and drum dryers, with a capacity ranging from 2 to 50 tonnes per hour, by using small amounts of microwave energy before filling the product into the drying chamber. The experiments were performed in 2024 at the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy. The subject of the research was an experimental unit that combined the effects of microwave radiation and convective heat on the product, with the criterion for energy efficiency being energy consumption per unit time. Wheat and rye seeds with different thicknesses were used as products, placed in "transparent" containers for both microwave and convection drying. The trays were placed on a conveyor belt and moved through a microwave chamber using an electric motor. The microwave energy was supplied to the chamber from two sides, from two magnetron sources that operated in pulsed mode and in antiphase. After passing through the microwave chamber, the trays moved to a convection drying chamber, where warm air was blown onto the product from below. This process simulated the convective drying process used in industrial drying facilities. In the first set of experiments, we used a product with a weight of 3 kg and a humidity range of 28–32%. The product was placed in the convection drying chamber and dried to a moisture content of 12%. This moisture content corresponds to the requirements for grain storage according to GOST. To determine the energy consumption for drying, we conducted a series of experiments. During these experiments, we adjusted the power of the heating element, which was set at 5 kW. Then, the drying time and energy intensity of the process were determined. The results ranged from 8.5 to 9.5 kWh per hour per kilogram of moisture evaporated. In a subsequent series of experiments, the same amount of grain was first exposed to microwave radiation at a level of 1–5% convective heat energy. The tray with the product was then moved on a conveyor belt to a convective drying chamber, where it was dried to a moisture content of 12%. Based on the calculated weight reduction of the product during drying, total energy consumption ranged from 6.8 to 7.8 kWh per kilogram of moisture evaporation when adding 1% microwave power to the drying process. This value ranged from 6.2 to 7.0 kWh at 5%, resulting in an average reduction in energy use of 19–27%. These findings indicate the potential for using low-intensity microwave radiation in industrial grain dryers.

Ключевые слова: СВЧ-нагрев, магнетронный генератор, конвективная сушка, комбинированная сушка, желобковый волновод, сушка зерна.

Keywords: microwave heating, magnetron generator, convective drying, combined drying, grooved waveguide, grain drying.

Установки промышленной сушки товарного зерна имеют широкое применение на объектах АПК [1, 2, 3]. Преимущественно их работа основана на получении сушильного агента путем сжигания углеводородного сырья и последующего направленного обдува продукта теплым воздухом. Существенными недостатками такого способа являются достаточно высокая энергоёмкость процесса сушки, неравномерность сушки по объёму зерновой массы и по сечению зерновки, а также низкая экологичность [4, 5, 6].

Если рассмотреть физику процесса сушки на уровне зерновки, то скорость обезвоживания и энергоёмкость процесса будут обусловлены направлениями градиентов ($grad \theta$ и $grad w$) температурного поля и влагопереноса (рис. 1а). Для конвективной сушки эти градиенты направлены навстречу друг другу, что приводит к пересыханию внешних слоев семени и создает препятствие для проникновения энергии (Q_k) сушильного агента к внутреннему объёму семени [7, 8]. В результате при малых значениях влажности энергоёмкость (R) процесса сушки резко возрастает, а скорость сушки (dm/dt) снижается (рис. 1 б).

В связи с этим необходим поиск способа извлечения влаги, имеющего мало меняющиеся параметры сушки во всем диапазоне влажности продукта. На основании проведенного анализа был выбран микроволновый нагрев, обладающий рядом преимуществ по сравнению с конвективным [9–11]. Энергия микроволнового поля действует в местах сосредоточения связанной влаги внутри семени, и за счет капиллярных явлений влага перемещается к внешним слоям семени. При таком механизме нагрева внешний слой остается всегда влажным, что способствует эффективному испарению влаги в окружающую среду. Очевидно, что при этом градиент температурного поля станет значительно меньшим по модулю по сравнению с конвективным методом, а возможно, поменяет направление и станет сонаправленным с градиентом влагопереноса.

Однако для генерации микроволновой мощности требуется большое количество электроэнергии. Обеспечить электроснабжение СВЧ-установок для сушки зерна в условиях сельскохозяйственного производства представляется трудновыполнимой задачей. Смоделируем процесс промышленной СВЧ-сушки зерна. Возьмем шахтную зерносушилку производительностью 50 т/ч и будем полагать, что начальная влажность зерна до сушки составляла 25%. За один проход зерна через установку сушки зерно приобретает влажность 14%, что соответствует ГОСТу на хранение. Энергоёмкость процесса условно возьмем по среднему показателю для процессов конвективного обезвоживания – 2,5 кВт·ч/кг по влаге, которую надо удалить. Соответственно, ее масса будет составлять 5500 кг и для реализации процесса СВЧ-сушки потребуется электрическая мощность 10...12 МВт, что является неприемлемой величиной для сельскохозяйственного производства, где трансформаторные подстанции 10/0,4 кВ рассчитаны на мощность до 1 МВт, кроме того, от них запитаны и другие потребители. В связи с этим обеспечить сушильный процесс за счет энергии микроволнового поля представляется невыполнимой задачей. Кроме того, генераторы микроволновой энергии такой мощности не выпускаются серийно, работают в импульсном режиме и крайне дороги в производстве и обслуживании [12, 13].

На основании теоретических исследований перспективным представляется механизм интеграции в процесс конвективной сушки небольших доз микроволновой энергии – насколько позволяют условия местного электроснабжения – с целью создания градиента температурного поля необходимой направленности внутри семени. Такой способ относительно легко реализуем, так как можно использовать необходимое количество бытовых источников СВЧ-мощности магнетронного типа. Они выпускаются серийно, имеют невысокую стоимость и в зависимости от производительности зерносушилки могут комплектоваться до требуемых уровней энергии.

Организация комбинированного процесса сушки очевидно может осуществляться двумя способами: параллельно, то есть и конвективная и микроволновая энергия действуют на продукт одновременно и последовательно – на продукт сначала действует микроволновое излучение, создавая требуемый градиент температурного поля, а затем происходит досушивание посредством конвективного обдува. Второй способ,

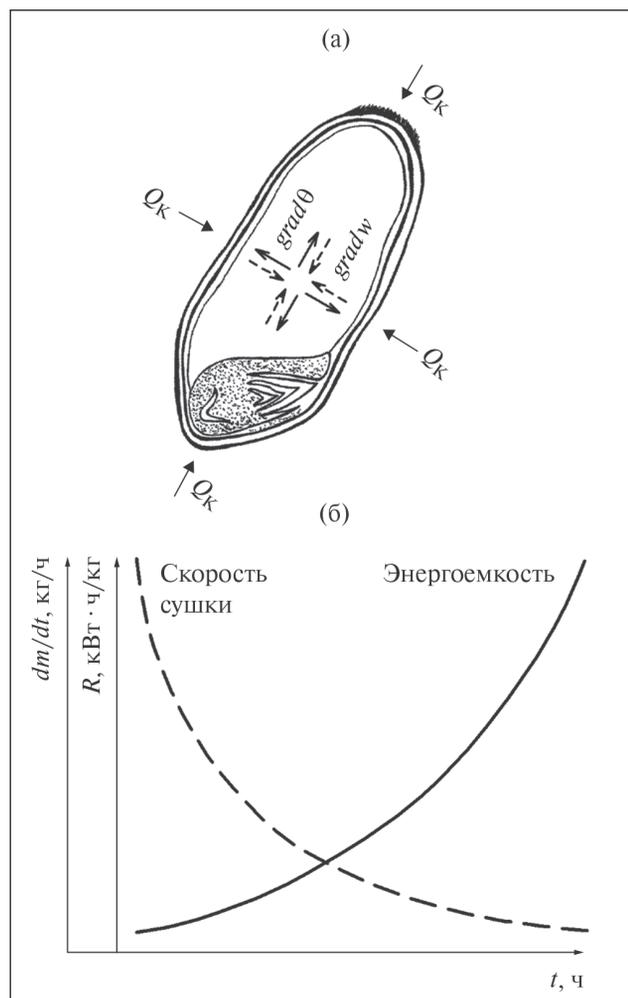


Рис. 1. Конвективная сушка зерна: а – схема конвективного воздействия на зерно; б – изменения скорости и энергоёмкости процесса.

по-видимому, более предпочтительный, поскольку встроить источники микроволновой мощности в типовые сушильные камеры конвективных установок трудноосуществимо ввиду большого количества металлических конструкций внутри [14, 15].

Проведенные предварительные расчеты показывают, что при такой конфигурации сушильного процесса количество потребляемой электроэнергии должно быть в 15...20 раз ниже, чем в случае чисто микроволновой сушки. Это делает внедрение в сушильный процесс на установках конвективной сушки средств генерации микроволновой энергии перспективной задачей с целью снижения потребления энергоносителей, повышения качества сушки зерна и экологичности сушильного процесса.

Цель исследования – снижение энергоемкости процесса промышленной сушки зерна, которая сопро-

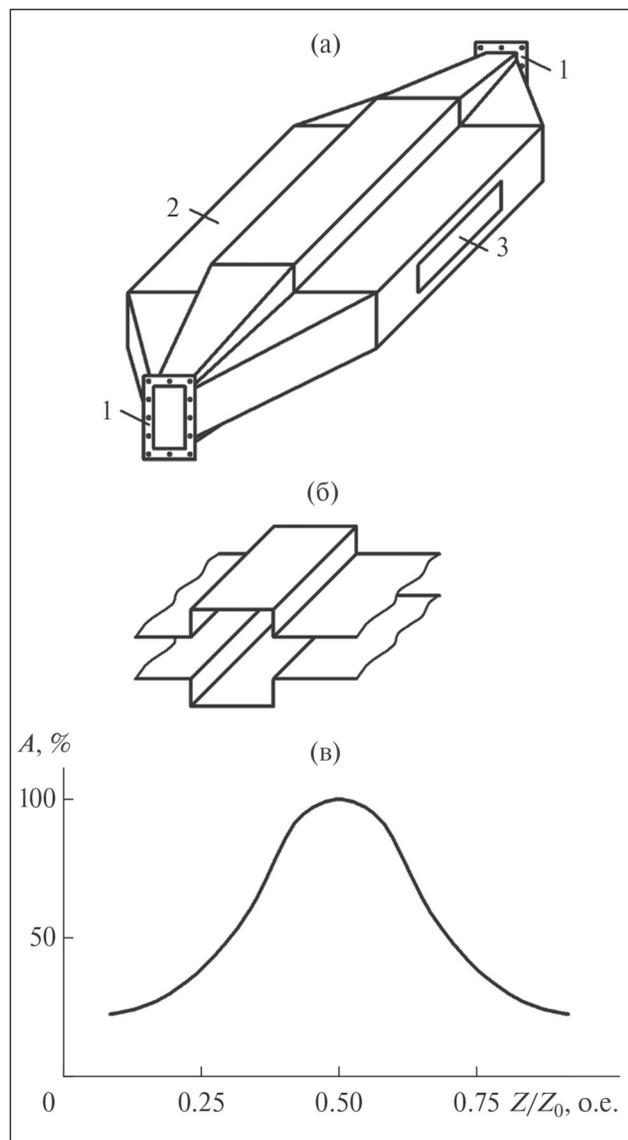


Рис. 2. Электродинамическая система для нагрева зерна микроволновым полем: а – секция сушки на основе желобкового волновода (1 – фланцы с внутренним сечением 90×45 мм для подсоединения магнетронных источников, 2 – желобковый волновод, 3 – отверстие для размещения сушимого продукта); б – профиль желобкового волновода; в – распределение поля по сечению желобкового волновода.

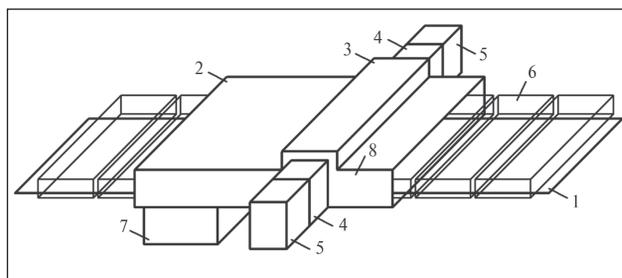


Рис. 3. Технологическая схема экспериментальной установки для комбинированной сушки зерна: 1 – транспортер; 2 – камера конвективного обдува; 3 – сушильная камера на базе желобкового волновода; 4 – ослабитель; 5 – магнетрон; 6 – лотки с зерном; 7 – калорифер; 8 – камера поглощения.

вождается снижением потребления углеводородных носителей энергии.

Методика. Принципиальная возможность достижения поставленной цели обусловлена тем, что с физической точки зрения применяемая повсеместно конвективная сушка зерна нерациональна по удельным энергозатратам. Для процесса сушки в пределах диапазона влажностей от 28 до 14 % характерны ограничения по тепло- и влагопроводности зерновки, приводящие к 12...15-кратному превышению величины энергозатрат над физическим пределом – 0,73 кВт·ч/кг [1, 2].

Лабораторная установка сушки комбинированного типа состояла из секции для подачи энергии СВЧ-поля (рис. 2а). Профиль секции был выбран желобкового типа с целью максимально равномерного распределения электромагнитного поля внутри секции. Кроме того, это давало возможность пропустить через секцию металлическую цепь транспортера, проходящего по низу отверстия подачи продукта. Как распределяется поле внутри сушильной камеры, показано на рис. 2в, а сам профиль секции – на рис. 2б. На краях секции расположен специальный раструб с фланцами для присоединения магнетронных источников с двух сторон и перехода волновода сечением 45×90 мм на 450×900 мм. Через желобковый волновод посредством цепного транспортера перемещался сушимый продукт, располагающийся на лотках «прозрачных» для микроволнового поля и открытый для проникновения потоков теплого воздуха. Цепной транспортер проходил через камеру в том месте, где поле отсутствовало, – ввиду конструктивных особенностей (рис. 3). После облучения микроволновым полем в желобковом волноводе продукт на лотках, посредством цепного транспортера, перемещался в секцию конвективного обдува, где за счет мощного калорифера происходило конвективное досушивание.

При постановке эксперимента были использованы типовые магнетронные генераторы СВЧ-энергии мощностью 600...700 Вт и частотой генерации микроволнового поля 2,45 ГГц. Такая частота кратна собственной частоте колебаний диполей связанной влаги, поэтому достаточно легко входит в резонанс кратных по частоте гармоник и способствует эффективному поглощению энергии поля продуктом сушки. Поскольку при проведении эксперимента требовалось плавное изменение СВЧ-мощности, подаваемой в камеру сушки, были использованы ослабители микроволновой энергии, представляющие пластинчатые аттенюаторы, встроенные в стандартные волноведущие системы прямоугольного сечения 90×45 мм. Посредством пано-

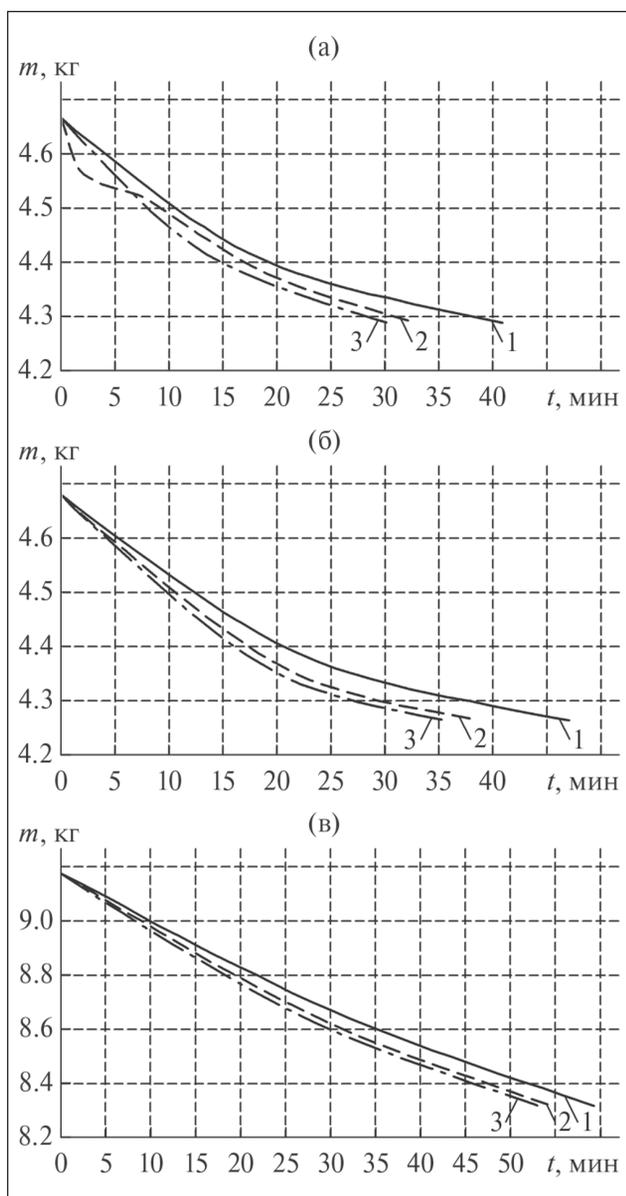


Рис. 4. Экспериментальные зависимости массы продукта m от времени сушки t при воздействии на него только теплового конвекционного потока (1), с добавлением 1% СВЧ-энергии (2), с добавлением 5% СВЧ-энергии (3): а – рожь ($m = 3$ кг); б – пшеница ($m = 3$ кг); в – пшеница ($m = 7$ кг с перемешиванием).

рамного измерителя коэффициента стоячей волны были выявлены положения гасящих поле пластин для последующего подвода энергии СВЧ-поля в сушимую камеру, где можно было регулировать затухание СВЧ-мощности на величину от 8 до 15 дБ. Тогда мощность от одного источника может варьироваться от 20 до 100 Вт. При подаче энергии с двух сторон – соответственно 40 и 200 Вт. Теперь стало возможным изменять в требуемом диапазоне соотношение СВЧ и конвективной мощности так, как этого требует эксперимент 1...5%.

В качестве варьируемого диэлектрического заполнения поглощающей СВЧ-поле нагрузки использовался набор металлических пластин, расположенных торцом к фронту волны, устанавливаемых в исходном положении в минимуме высокочастотного поля, то есть у боковой стенки волновода прямоугольного сечения.

Механически они перемещались в направлении нарастания поля, при этом каждому определенному положению нагрузок соответствовала своя определенная величина затухания, а следовательно, и мощность выходящего из него потока СВЧ-энергии, поступающей далее в секцию микроволнового нагрева экспериментальной установки.

Сушимый продукт – зерно пшеницы с исходной влажностью 26...28% и массой 3 кг – располагался равномерным слоем на лотке, «прозрачном» для СВЧ-мощности, а также свободно продуваемый потоком теплого воздуха в направлении снизу вверх. Начальная влажность зерна определялась термогравиметрическим методом (ГОСТ Р 8.633-2007), после чего исходя из отделения массовой доли влаги определялась конечная влажность и влажность на разных этапах сушки. Для контроля температуры продукта сушки внутри слоя зерна располагался датчик – термомпара, соединенная с цифровым мультиметром. Продукт мог перемещаться на цепном транспортере посредством электропривода и имитировать различные режимы сушки – от чисто конвективного до комбинированного с различной дозой облучения микроволновым полем.

Исследование по сушке зерновой продукции проводилось двумя сериями экспериментов. В начале эксперимента сушка осуществлялась исключительно конвективным методом. Это значит, что продукт подвергался воздействию мощного потока теплого воздуха, который поступал из специального нагревательного элемента мощностью 5 кВт. Периодичность контроля массы продукта составляла 2,5 минуты. Лоток с продуктом взвешивался на весах, и по результатам измерений строился график зависимости массы продукта от времени сушки. Эксперимент продолжался до тех пор, пока влажность зерна не достигала примерно 12%, что соответствует стандарту хранения зерна. Во второй серии экспериментов на аналогичный образец зерновой навески с влажностью 25...28% и массой 3 кг воздействовали тепловым потоком, аналогичным по параметрам, и СВЧ-излучением. Мощность излучения регулировалась с помощью ослабителей в диапазоне от 5 до 1% относительно мощности нагревательного элемента.

Для каждого уровня СВЧ-излучения 5 и 1%, воздействующего на зерно вместе с конвективным тепловым потоком, проводились измерения, аналогичные тем, что были сделаны на первом этапе. Результаты опытов представлены на рис. 4.

Зависимость снижения массы (m) сушеного продукта при воздействии 2% микроволновой энергии от тепловой на рис. 4 не представлена, так как она практически повторяет зависимость для 1% воздействия. Аналогичные эксперименты были проведены с рожью и с пшеницей массой 7 кг (рис. 4в). В процессе взвешивания продукт перемешивали. Это было необходимо, чтобы создать условия сушки, схожие с теми, которые используются в промышленных конвективных зерносушилках – в шахтных сушилках зерно проходит между коробов, расположенных в шахтном порядке, а в барабанных перемешивается ввиду вращения барабана.

Результаты и обсуждение. Так как целью исследования было выявление возможности снижения энергоемкости по сравнению с конвективной сушкой, то наглядно результаты были представлены в виде зависимостей снижения массы продукта от времени сушки. Были проведены эксперименты для зерен пшеницы и ржи с начальной массой 3 кг и толщиной слоя 4 см. При этом продукт располагался на лотке непод-

видно. При проведении эксперимента для зерен пшеницы массой 7 кг и соответственно слоем 12 см во время взвешивания продукта происходило его перемешивание для улучшения условий тепло- и влагообмена. Каждая серия экспериментов соответствовала определенному режиму сушки, который реализуется на промышленных зерносушилках. Результаты, представленные на рис. 4, были использованы для определения энергозатрат при сушке зерна в заданном диапазоне влажности. Для этого была применена методика, описанная ниже. Сначала определялась влажность зерна (w) в процентах. Затем рассчитывалась масса сухого остатка (m_c) в составе исходной массы (m_0) экспериментального слоя зерна:

$$m_c = \frac{100m_0}{100 + w} \quad (1)$$

Массы в начале (m_{20}) и в конце (m_{12}) процесса уменьшения содержания влаги в зерне, соответствующие значениям влажности 20% и 12%, были рассчитаны с помощью следующих формул:

$$m_{20} = \frac{120m_0}{100 + w}; \quad (2)$$

$$m_{12} = \frac{112m_0}{100 + w}. \quad (3)$$

Далее по кривой убывания влажности определялись значения времени t_{12} (соответствующее значению массы m_{12}) и t_{20} (соответствующее значению массы m_{20}) и общее время прохождения указанного интервала влажностей:

$$\Delta t = t_{12} - t_{20}. \quad (4)$$

После этого можно определить суммарные затраты энергии:

$$R_\Sigma = \frac{(P_K + P_{\text{СВЧ}}) \Delta t}{m_{20} - m_{12}}, \quad (5)$$

где P_K – мощность калорифера; $P_{\text{СВЧ}}$ – суммарная мощность двух магнетронных источников.

Представим экспериментальные результаты с помощью зависимости энергозатрат R_Σ от доли энергии, получаемой от СВЧ-излучения $P_{\text{СВЧ}}/P_K$ (рис. 5).

В случае начальной массы продукта 3 кг без перемешивания выявлено существенное уменьшение затрат энергии при добавке в процесс конвективной сушки доз микроволновой энергии на уровне 1...5% от тепловой. Если дальше продолжать увеличивать долю микроволновой энергии, то динамика уменьшения потребления энергии снизится ввиду увеличивающегося потребления электрической энергии.

С целью детального изучения динамики процесса снижения энергопотребления при добавлении в процесс конвективной сушки малых доз микроволновой энергии были построены зависимости:

$$\frac{dR_\Sigma}{d(P_{\text{СВЧ}}/P_K)} = f\left(\frac{P_{\text{СВЧ}}}{P_K}\right). \quad (6)$$

Из анализа результатов исследования, представленных графически, установлено, что при малых дозах энергии СВЧ от 1 до 5% от тепловой она формирует

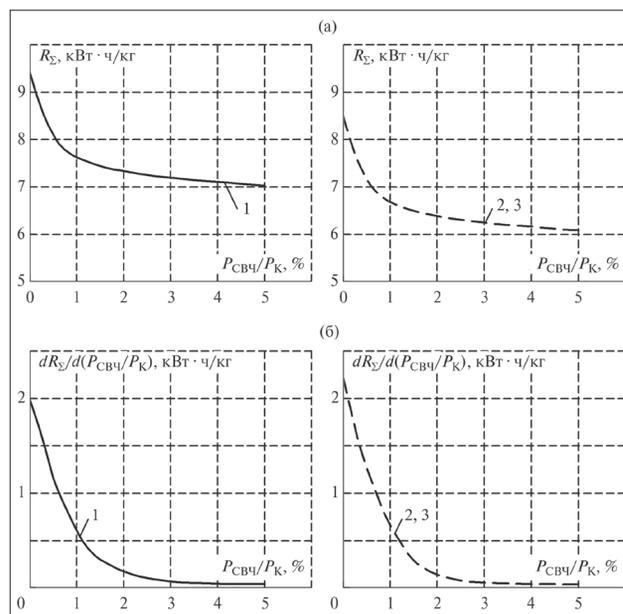


Рис. 5. Зависимости общей энергоёмкости R_Σ от доли СВЧ-энергии (а) и ее первой производной $R_\Sigma/d(P_{\text{СВЧ}}/P_K)$ (б) от величины соотношения $P_{\text{СВЧ}}/P_K$: 1 – рожь ($m = 3$ кг); 2 – пшеница ($m = 3$ кг); 3 – пшеница ($m = 7$ кг с перемешиванием).

существенное влияние на повышение скорости сушки, а следовательно, и на снижение энергозатрат.

Замедление динамики сушки и снижения потребления энергии при увеличении дозы микроволновой энергии, возможно, объясняется тем, что при близких по воздействию на влагообмен, но противоположных по направлению градиентах температурного поля и массопереноса небольшое изменение термоградиента за счет СВЧ-воздействия приводит к существенному повышению скорости влагопереноса.

В условиях, когда температурные градиенты, формируемые конвективными процессами, становятся соизмеримыми или даже меньшими по величине с градиентами, генерируемыми микроволновым излучением, эффективность снижения энергозатрат при конвективном обезвоживании начинает существенно снижаться с увеличением модуля данного градиента. Это явление обусловлено тем, что при достижении определенного уровня температурного градиента конвективные механизмы теряют свою доминирующую роль в процессе теплопередачи, уступая место более равномерному распределению тепла, характерному для микроволнового воздействия. В результате дальнейшее повышение интенсивности микроволнового излучения не приводит к пропорциональному увеличению эффективности обезвоживания, что требует более детального анализа и оптимизации параметров процесса для достижения максимальной энергоэффективности.

Выводы. В результате исследований установлено, что использование низкоинтенсивного электромагнитного поля СВЧ-диапазона для конвективной сушки зерновой продукции ведет к снижению энергопотребления, затраченного на процесс обезвоживания, за счет изменения величины и знака градиента температурного поля внутри зерновки. При воздействии на сушимый продукт только конвективной тепловой энергии энергоёмкость процесса сушки составляла от 8,5 до 9,5 кВт, что соответствует величине для типовых промышленных зерносушильных агрега-

тов. При добавлении 1 % СВЧ мощности от тепловой в процесс сушки, энергоемкость снижается до значений 6,8...7,8 кВт·ч/кг по испаренной влаге, а и при 5 % – от 6,2 до 7,0 кВт·ч/кг. Таким образом, в среднем снижение энергопотребления составило 19...27%. Выявленный эффект при добавлении малых доз микроволновой энергии в процесс сушки зерна свидетельствует о перспективности использования мало-мощного микроволнового излучения на установках промышленной сушки зерна.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института (учреждения, организации). Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. *Improving the efficiency of convective grain drying by using low-intensity RF radiation* / A. V. Volgin, V. A. Kargin, E. A. Chetverikov, et al. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 954. 012017. URL: (дата обращения: 03.02.2025). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/954/1/012017>. doi: 10.1088/1755-1315/954/1/012017.
2. Четвериков Е. А., Лягина Л. А., Моисеев А. П. *Микроволновое и инфракрасное излучение в технологиях сушки продукции растительного происхождения: монография*. Саратов: Амирит, 2016. 186 с.
3. *Математическая модель процесса комбинированной сушки товарного зерна в установках конвейерного типа* / Е. А. Четвериков, К. М. Усанов, А. В. Волгин и др. // *Аграрный научный журнал*. 2023. № 12. С. 171–176.
4. *Технологическое обоснование сушки зерна азрированием* / И. Н. Аммосов, Ю. Ж. Дондоков, В. М. Дринча и др. // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2024. № 6 (78). С. 399–412. doi: 10.32786/2071-9485-2024-06-44.
5. Лобачевский Я. П., Ценч Ю. С. *Принципы формирования систем машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации технологических процессов в растениеводстве. Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. № 4. С. 4–12.
6. Будников Д. А. *Система управления экспериментальной установкой электрофизического воздействия на зерно* // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2022. Т. 17. № 2 (66). С. 59–67. doi: 10.12737/2073-0462-2022-57-63.
7. Дринча В. М., Ценч Ю. С. *Эволюция зерно-семяочистительной техники в России. Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. № 1. С. 24–33.
8. Загоруйко М. Г., Башмаков И. А. *Интенсификация теплообмена в каналах подачи агента сушки* // *Аграрный научный журнал*. 2024. № 7. С. 105–109. doi: 10.28983/asj.y2024i7pp105-109.
9. Васильев А. А., Тихомиров Д. А., Васильев А. Н. *Исследование на компьютерной модели влияния элементов конструкции и влажности зерна на добротность СВЧ-конвективной зоны* // *Агроинженерия*. 2024. Т. 26. № 1. С. 73–79. doi: 10.26897/2687-1149-2024-1-73-79.
10. Щетинин М. П., Урманов А. И. *Моделирование и математическая обработка результатов опытов по сушке семян рапса* // *Ползуновский вестник*. 2023. № 2. С. 131–135. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.017.
11. Исаев А. В., Бастрон А. В., Яхонтова В. С. *Исследование влияния степени неравномерности нагрева семян рапса в ЭМП СВЧ на их энергию прорастания и всхожесть* // *Вестник Красноярского ГАУ*. 2016. № 4. С. 131–137.
12. *Разработка мобильной зерносушилки и обоснование ее конструктивно-режимных параметров* / Д. Ю. Данилов, С. С. Казаков, Е. А. Криштанов и др. // *Аграрная наука*. 2022. № 11. С. 122–127. doi: 10.32634/0869-8155-2022-364-11-122-127.
13. *Особенности процесса сушки зерна пшеницы в элементарном слое* / Г. В. Карпенко, В. И. Курдюмов, А. А. Павлушин и др. // *Пермский аграрный вестник*. 2021. № 4(36). С. 4–13. doi: 10.47737/2307-2873_2021_36_4.
14. Голубкович А. В., Павлов С. А. *Оптимизация сушки зерна при осциллирующем режиме* // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2014. № 1. С. 10–13.
15. Drincha V. M., Tsench Yu. S. *Fundamentals and prospects for the technologies development for post-harvest grain processing and seed preparation*. // *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Т. 14. № 4. С. 17–25.

Поступила в редакцию 21.04.2025
После доработки 10.05.2025
Принята к публикации 03.06.2025