

ОБЗОР СПОСОБОВ СУШКИ ЗЕРНА РАННИХ ФАЗ СПЕЛОСТИ

В.И. Пахомов, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии и оборудование переработки продукции АПК», v.i.pakhomov@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-8715-0655;

Д.В. Рудой, доктор технических наук, доцент, декан факультета «Агропромышленный», rudoj.d@gs.donstu.ru, ORCID ID: 0000-0002-1916-8570;

Т.А. Мальцева, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии пищевых производств», tamaltseva.donstu@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3973-6846;

Т.С. Чуксеева, преподаватель кафедры «Техника и технологии пищевых производств», taniadmitrienko666@gmail.com, ORCID ID: 0009-0001-0385-797x;

*Донской государственный технический университет,
344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1*

Истощение традиционных кормовых ресурсов актуализирует поиск альтернативных видов сырья для комбикормовой промышленности. Зерновой ворох пшеницы ранних фаз спелости как новое кормовое сырье предстает значительный интерес благодаря высокому содержанию белка и витаминов. Однако его использование в кормопроизводстве ограничивается существенным недостатком – повышенной влажностью (до 60 %), которая провоцирует процессы самосогревания и развития микроорганизмов в зерновой массе. Для устранения данных негативных факторов требуется проведение сушки, обеспечивающей максимальное сохранение питательной ценности продукта и витаминов. В связи с этим в настоящем обзоре представлен сравнительный анализ способов сушки зерна пшеницы ранних фаз спелости: конвективный, сушка с помощью СВЧ и инфракрасный. Проведена оценка характеристики каждого метода, выявлены их ключевые преимущества и недостатки. Установлено, что наиболее эффективным является инфракрасный метод сушки, поскольку он сочетает щадящий температурный режим (40–60 °C) с высокой скоростью процесса, что позволяет максимально сохранить питательные вещества в готовом продукте. Конвективный метод представляется малоэффективным ввиду высокой вероятности перегрева исходного продукта. СВЧ-сушка может применяться преимущественно на этапе досушки, поскольку ее использование для обработки высоковлажного сырья нерентабельно.

Ключевые слова: кормовое сырье, ворох пшеницы, методы сушки, ИК-сушка, СВЧ, конвективная сушка.

Для цитирования: Пахомов В.И., Рудой Д.В., Мальцева Т.А., Чуксеева Т.С. Обзор способов сушки зерна ранних фаз спелости // Зерновое хозяйство России. 2025. Т. 17, № 6. С. 97–100. DOI: 10.31367/2079-8725-2025-101-6-97-100.



REVIEW OF GRAIN DRYING METHODS AT THE EARLY STAGES OF MATURITY

V.I. Pahomov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technologies and Equipment for Processing Agricultural Products, v.i.pakhomov@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-8715-0655;

D.V. Rudoy, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of Agribusiness faculty, rudoj.d@gs.donstu.ru, ORCID ID: 0000-0002-1916-8570;

T.A. Maltseva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Food Production Engineering and Technology, tamaltseva.donstu@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3973-6846;

T.S. Chukseeva, lecturer of the Department of Food Production Engineering and Technology, taniadmitrienko666@gmail.com, ORCID ID: 0009-0001-0385-797x;
*Don State Technical University,
344003, Rostov-on-Don, Gagarin Sq., 1*

The depletion of traditional feed resources makes the search for alternative raw materials for the feed industry extremely crucial. A heap of early-maturing wheat is of significant interest as a new feed raw material due to its high protein and vitamin percentage. However, its use in feed production is limited by such significant drawback as high moisture content (up to 60 %), which promotes self-heating and microbial growth in the grain mass. To eliminate these negative factors, drying is required to ensure maximum preservation of nutritional value and vitamins in the product. The current review has presented a comparative analysis of such methods for drying early maturing wheat grain as convection, microwave drying, and infrared drying. There have been considered the characteristics of each method and identified their key advantages and disadvantages. There has been established that the infrared drying method is the most effective, since it combines a gentle temperature regime (40–60 °C) with a high speed of the process, which allows preserving maximum nutrients in the finished product. The convective method has been found ineffective due to the high risk of overheating the initial product. Microwave drying should be used primarily at the final drying stage, as it is unprofitable to use it for processing high-moisture raw materials.

Keywords: feed raw material, wheat heap, drying methods, IR drying, microwave, convective drying.

Введение. В условиях прогнозируемого ООН роста численности населения Земли с 8,23 (2025 г.) до 10,3 млрд человек (2080 г.) возникает объективная необходимость в увеличении объемов и качества продовольствия, включая продукты животного происхождения. Ключевым ответом на этот вызов является модернизация комбикормовой промышленности, предполагающая как наращивание производственных мощностей, так и совершенствование рецептур. Последнее достигается за счет включения в состав комбикормов высокоэффективных добавок и компонентов, гарантирующих ресурсоэффективное и качественное кормление всех категорий сельскохозяйственных животных и рыб.

Зерновой ворох пшеницы ранних фаз спелости может служить ценным кормовым сырьем для использования в комбикормовом производстве. Зерновой ворох состоит из зерна и половы. Это сырье отличается высоким содержанием белка (на 40 % выше в сравнении со стадией полной спелости), а также включает в себя микро- и макроэлементы (B, E, A, Fe, P, Se) (Малкандуев и др., 2021; Meskhi et al., 2025). Кроме того, зерновой ворох пшеницы ранних фаз спелости обладает пробиотическими свойствами – способствует более активному росту и развитию полезных микроорганизмов в желудочно-кишечном тракте животных. Применение такого сырья совместно с пробиотическими кормовыми добавками будет способствовать укреплению иммунитета животного, что в свою очередь будет снижать частоту использования антибиотиков при их выращивании и уменьшать значения конверсии комбикорма. Это будет интенсифицировать производство качественной продукции животного происхождения без использования антибиотиков.

Уборка пшеницы в ранние фазы спелости (молочно-восковая) позволяет получить зерновой ворох с повышенным содержанием питательных веществ, однако его ключевой технологический недостаток – высокая влажность, достигающая 20–60 %. Такие показатели делают сырье непригодным для длительного хранения, провоцируя процессы самосогревания и развития микробиологической порчи (Малкандуев и др., 2021; Байрамов, 2024; Meskhi et al., 2025). В связи с этим возникает технологическая задача – в сжатые сроки провести активную сушку зерна, обеспечив при этом максимальную сохранность его кормовой ценности, в частности, белкового комплекса, который наиболее уязвим к термическим воздействиям. Для сушки данного материала необходимо использовать бережные и энергоэффективные способы сушки для сохранения кормовых качеств. Цель настоящего обзора – систематизировать и проанализировать существующие методы сушки для высоковлажного зерна ранних фаз спелости.

Классификация и анализ методов сушки. Один из наиболее энергозатратных этапов

в технологических циклах пищевой и комбикормовой промышленности связан с уменьшением влажности сырья. Сущность процесса сушки заключается в одновременном теплообмене и массообмене, направленном на удаление жидкости за счет ее испарения из твердых, пастообразных или жидких материалов. В данном случае это высоковлажный ворох пшеницы, влажность которого доходит до 60 %.

Ключевые различия между распространенными методами сушки, такими как конвективный, инфракрасный и СВЧ, определяются фундаментальными различиями в механизмах подвода тепловой энергии и массопереноса влаги, что непосредственно влияет на их технологическую реализацию и эффективность (Захаатнов, 2021).

Конвективная сушка. Данная технология предполагает обезвоживание материала путем его контакта с нагретым теплоносителем, температура которого превышает температуру обрабатываемого сырья. В основе процесса лежит передача тепловой энергии от сушильного агента (например, парогазовой смеси) к продукту, что приводит к испарению влаги и ее последующему удалению потоком этого агента. Для описания и расчета данного процесса используются уравнения теплового и материального баланса.

Конвективная сушка в неподвижном или малоподвижном слое реализуется в таких типах установок, как ленточные, камерные, тоннельные и шахтные (Рахманкулов и др., 2024). Эти аппараты, как правило, работают в периодическом режиме и позволяют за один цикл снизить влажность продукта до 15–20 %. Подобный метод эффективен для обработки крупногабаритных объектов, зерновых культур, а также строительных и керамических материалов. Температура нагрева материала составляет 60–120 °C в зависимости от типа сушильного аппарата.

К основным недостаткам конвективного способа можно отнести значительную продолжительность процесса, неравномерность просушки по объему материала, высокие энергозатраты, необходимость ручного труда и, как следствие, потенциальное снижение качества готовой продукции (Вендин и др., 2021; Байрамов, 2024).

Инфракрасная сушка представляет собой процесс обезвоживания материалов под воздействием инфракрасного излучения. В настоящее время данный метод находит применение в различных отраслях промышленности и считается перспективным направлением для переработки пищевых продуктов.

Принцип действия ИК-сушки основан на способности излучения определенной длины волн возбуждать молекулы материала, вызывая их интенсивные колебания и преобразование электромагнитной энергии в тепловую (Вендин и др., 2021; Байрамов, 2024). Ключевой особенностью метода является глубина проникновения излучения в пищевые

продукты, составляющая 2–6 мм, а температура нагрева варьирует от 40 до 90 °С. При этом нагрев внутренних слоев материала (например, на глубине 7 мм) происходит значительно интенсивнее по сравнению с конвективными методами. Также преимуществами ИК-сушки является то, что установки имеют относительно невысокую стоимость и мобильность. Данный метод сушки является экологически чистым и безопасным для окружающей среды. В работе (Сергеев, 2022) доказана эффективность применения инфракрасного метода сушки высоковлажного сырья с высоким содержанием фенольных веществ. Автор отмечает, что такой способ позволяет эффективно провести сушку и сохранить полезные вещества.

СВЧ-сушка основана на способности электромагнитных волн воздействовать на дипольные молекулы воды в структуре материала. Ключевой особенностью данного метода является объемный характер нагрева, обеспечивающий равномерное температурное поле по всему сечению продукта. Глубина проникновения электромагнитных волн может достигать 10 см, что позволяет эффективно обрабатывать мате-

риалы значительной толщины. Важным аспектом технологии является возможность проведения процесса при сравнительно низких температурных режимах (30–60 °С). Благодаря щадящему термическому воздействию в готовом продукте максимально сохраняются термолабильные компоненты, такие как витамины (C, B₁, B₂, B₃), минеральные вещества, эфирные масла и прочие биологически активные соединения. Аналогично инфракрасному методу, СВЧ-сушка классифицируется как экологически безопасный процесс, поскольку в качестве единственного источника энергии используется электричество (Белов, 2024).

К основным технологическим ограничениям СВЧ-сушки относится относительно низкий коэффициент полезного действия (порядка 60 %), что делает экономически оправданным его применение главным образом для досушки продукции с невысокой исходной влажностью. В связи с этим представленный метод для высоковлажного сырья будет менее эффективным (Белов, 2024). В таблице 1 представлен сравнительный анализ методов сушки.

Сравнительный анализ методов сушки Comparative analysis of drying methods

Метод сушки	Температурный режим, °С	Мощность, кВт	Энергоэффективность	Ключевые недостатки
Конвективный	60–120	85–120	Низкая, наблюдаются потери тепла с уходящим сушильным агентом	Длительность процесса, возможный неравномерный прогрев продукта
СВЧ-сушка	30–60	70	Низкая, КПД 60 %, хорошо нагревает продукт, но высокий расход электроэнергии	Малоэффективна для влажного сырья, подходит только для досушки продукта
ИК-сушка	40–90	2,1	Средняя. Потери происходят при нагреве воздуха	Ограниченнная глубина проникновения в сырье (2–6 мм)

Каждый из представленных методов сушки имеет различное сочетание преимуществ и недостатков. Выбор наилучшего метода сушки зависит от технологических показателей исходного сырья, требований к качеству готового продукта, а также экономических факторов, включающих в себя затраты на обработку сырья.

Выводы. На основании сравнительного анализа для обработки зернового вороха пшеницы ранних фаз спелости наиболее предпочтительным является инфракрасный метод сушки. По сравнению с другими рассмотренными методами, ИК-сушка характеризуется более высокой энергоэффективностью и сокращением продолжительности процесса, что нельзя

сказать о конвективном методе, отличающемся своей длительностью. Кроме того, благодаря щадящему температурному режиму ИК-сушка позволяет избежать пересушивания поверхности зерна, характерного для высокотемпературной конвективной сушки (60–120 °С), и тем самым максимально сохранить питательную ценность и кормовые достоинства сырья. СВЧ-сушка в сравнении с ИК и конвективной менее эффективна для сырья с высокой влажностью, такую имеет ворох пшеницы на ранних фазах спелости (20–60 %).

Финансирование. Работа проведена в рамках выполнения проекта «Разработка новой технологии дифференцированной уборки зерновых колосовых культур» (FZNE-2024-0014).

Библиографический список

1. Байрамов Р.З. Результаты экспериментальных исследований сушилки пророщенного зерна // Аграрный научный журнал. 2024. № 2. С. 95–101. DOI: 10.28983/asj.y2024i2pp95-101
2. Белов А.А. Влияние микроволновой обработки на питательные факторы соевых бобов // Техника и оборудование для села. 2024. № 8(326). С. 32–35. DOI: 10.33267/2072-9642-2024-8-32-35
3. Вендин С.В., Саенко Ю.В., Окунев А.Ф. Сушилка пророщенного зерна // Техника и технологии в животноводстве. 2021. № 1(41). С. 71–75. DOI: 10.51794/27132064-2021-1-71
4. Захахатов В.Г. Моделирование процесса сушки зерна в неподвижном слое // АПК России. 2021. Т. 28, № 2. С. 217–221.
5. Кибирев Л.К., Панков Ю.В., Юсупов М.Л. Кинетика удаления влаги из зерна при вакуумной сушке гороха // Научно-технический вестник: Технические системы в АПК. 2023. № 3(19). С. 4–9.

6. Малкандуев Х.А., Шамурзаев Р.И., Малкандуева А.Х. Технологические свойства озимой пшеницы в процессе послеуборочного дозревания // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2021. № 6(104). С. 146–154. DOI: 10.35330/1991-6639-2021-6-104-146-154
7. Петроченко Н.О. Технология заготовки плющеного зерна // Наше сельское хозяйство. 2021. № 16(264). С. 34–39.
8. Рахманкулов Т., Эркинжонов А., Каримов К.А., Адилова Ш.Р., Тураходжаев Н.Д., Мирмухамедов М.М., Шарипов Дж.Х., Обидов З.Р., Комолов Х. Условия проведения экспериментальных исследований по сушке зерна // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2024. Т. 17. № 2. С. 186–192.
9. Сергеев М.А. Экспериментальное исследование равномерности нагрева высоковлажного растительного сырья в устройстве динамической инфракрасной сушки // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2022. № 177. С. 219–231. DOI: 10.21515/1990-4665-177-012
10. Meskhi B., Pakhomov V., Rudoy D., Maltseva T., Olshevskaya A., Mazanko M. Early maturity wheat as a highly valuable feed raw material with prebiotic activity // Agriculture. 2025. Vol. 15, № 3. Article number: 317. DOI: 10.3390/agriculture15030317

References

1. Bayramov R.Z. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovanij sushilki proroshchennogo zerna [Results of experimental study of a sprouted grain dryer] // Agrarnyj nauchnyj zhurnal. 2024. № 2. S. 95–101. DOI: 10.28983/asj.y2024i2pp95-101
2. Belov A.A. Vliyanie mikrovolnovoj obrabotki na pitatel'nye faktory soevykh bobov [Effect of microwave treatment on the nutritional factors of soybeans] // Tekhnika i oborudovanie dlya sela. 2024. № 8(326). S. 32–35. DOI: 10.33267/2072-9642-2024-8-32-35
3. Vendin S.V., Saenko Yu.V., Okunev A.F. Sushilka proroshchennogo zerna [Sprouted grain dryer] // Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve. 2021. № 1(41). S. 71–75. DOI: 10.51794/27132064-2021-1-7
4. Zakhakhatnov V.G. Modelirovanie processa sushki zerna v nepodvizhnom sloe [Modeling the grain drying process in a fixed bed] // APK Rossii. 2021. Т. 28, № 2. S. 217–221.
5. Kibirev L.K., Pankov Yu.V., Yusupov M.L. Kinetika udaleniya vlagi iz zerna pri vakuumnoj sushke gorokha [Kinetics of moisture removal from grain during vacuum drying of peas] // Nauchno-tehnicheskij vestnik: Tekhnicheskie sistemy v APK. 2023. № 3(19). S. 4–9.
6. Malkanduev H.A., Shamurzaev R.I., Malkandueva A.H. Tekhnologicheskie svojstva ozimoj pshenicy v processe posleuborochnogo dozrevaniya [Technological properties of winter wheat during post-harvest ripening] // Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo centra RAN. 2021. № 6(104). S. 146–154. DOI: 10.35330/1991-6639-2021-6-104-146-154
7. Petrochenko N.O. Tekhnologiya zagotovki pliushchenogo zerna [Technology for preparing flattened grain] // Nashe sel'skoe khozyajstvo. 2021. № 16(264). S. 34–39.
8. Rakhmankulov T., Erkinzhonov A., Karimov K.A., Adilova Sh.R., Turakhodjaev N.D., Mirmukhamedov M.M., Sharipov J.H., Obidov Z.R., Komolov H. Usloviya provedeniya eksperimental'nykh issledovanij po sushke zerna [Conditions for conducting experimental study of grain drying] // Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii. 2024. Т. 17. № 2. S. 186–192.
9. Sergeev M.A. Ehksperimental'noe issledovanie ravnomernosti nagreva vysokovlazhnogo rastitel'nogo syr'ya v ustroystve dinamicheskoy infrakrasnoy sushki [Experimental study of the uniformity of heating high-moisture plant materials in a dynamic infrared dryer] // Politematischeskij setevoj elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2022. № 177. S. 219–231. DOI: 10.21515/1990-4665-177-012
10. Meskhi B., Pakhomov V., Rudoy D., Maltseva T., Olshevskaya A., Mazanko M. Early maturity wheat as a highly valuable feed raw material with prebiotic activity // Agriculture. 2025. Vol. 15, № 3. Article number: 317. DOI: 10.3390/agriculture15030317

Поступила: 30.10.25; доработана после рецензирования: 17.11.25; принята к публикации: 20.11.25.

Критерии авторства. Авторы статьи подтверждают, что имеют на статью равные права и несут равную ответственность за plagiat.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторский вклад. Пахомов В.И. – концептуализация исследований, анализ данных и их интерпретация; Рудой Д.В. – концептуализация исследований, сбор данных, анализ данных и их интерпретация; Мальцева Т.А. – проведение обзора исследований, сбор и анализ данных, написание публикации; Чуксеева Т.С. – проведение обзора исследований, сбор и анализ данных, написание публикации.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.