

Ковенькин Богдан Евгеньевич

*аспирант кафедры технологических машин и оборудования, Астраханский
государственный технический университет, РФ, г. Астрахань*

Курсанов Даниил Викторович

*аспирант кафедры технологических машин и оборудования, Астраханский
государственный технический университет, РФ, г. Астрахань*

Храмова Ирина Андреевна

*магистрант кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых
месторождений, Астраханский государственный технический университет,
РФ, г. Астрахань*

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ СУШКИ В ПИЩЕВЫХ СИСТЕМАХ: ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ, ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОДЫ

Аннотация. Цель работы — провести системный анализ устойчивости технологий сушки, применяемых в пищевой промышленности. Актуальность темы обусловлена необходимостью снижения энергозатрат и уменьшения воздействия на окружающую среду в условиях изменения климата и глобальной продовольственной безопасности. В статье рассмотрены различные методы сушки с акцентом на удельное энергопотребление и тепловую эффективность. Проведен энергетический анализ, выявляющий наиболее эффективные технологии сушки для пищевых систем. Эксергетический подход позволяет более точно оценить полезные потери энергии и термодинамическую необратимость процесса. Особое внимание уделено низкотемпературным и нетермическим технологиям, повышающим энергоэффективность. Оценка воздействия на окружающую среду проведена на основе углеродного следа, связанного с разными источниками энергии. Выявлена важность внедрения возобновляемых источников энергии и тепловых насосов для повышения устойчивости. Полученные результаты помогут в разработке

ресурсосберегающих технологий сушки. Выводы актуальны для повышения устойчивости и устойчивости агропродовольственных производств.

Abstract. The aim of this study is to perform a systematic assessment of the sustainability of drying technologies used in the food industry. The relevance of the topic lies in the growing need to reduce energy consumption and environmental impact under climate change and global food security challenges. The paper examines various drying methods with a focus on their specific energy consumption and overall thermal performance. An energy analysis identifies the most efficient drying techniques for food systems. The exergy approach allows for a deeper understanding of useful energy losses and thermodynamic irreversibility. Special attention is given to low-temperature and non-thermal drying technologies, which improve both energy and exergy efficiency. Environmental impacts are evaluated through the lens of carbon footprint associated with different energy sources. Renewable energy integration and heat pump-based systems are identified as key drivers of sustainability. The findings provide valuable insights for the design of resource-efficient drying technologies. Results are applicable for improving resilience and sustainability in agri-food production.

Ключевые слова: сушка, энергоэффективность, эксергия, углеродный след, пищевая промышленность, тепловой насос, устойчивость, энергетический анализ.

Keywords: drying, energy efficiency, exergy, carbon footprint, food industry, heat pump, sustainability, energy analysis.

Введение

Изменения климата, пандемии и растущая взаимосвязанность глобального продовольственного рынка усиливают актуальность разработки устойчивых технологий консервирования, в частности — сушки [1, С. 3]. Этот процесс, направленный на продление срока хранения продуктов путём удаления влаги, сегодня рассматривается не только с технологической, но и с экологической и социально-экономической точки зрения. В условиях роста энергозатрат и

углеродного следа, поиск устойчивых решений в области сушки становится важной задачей для пищевых систем.

Современные методы сушки оказывают комплексное влияние — от потребления ресурсов до участия в формировании продовольственной безопасности, особенно в условиях перебоев с поставками [2, С. 111-112]. Поэтому устойчивость таких технологий должна оцениваться в рамках системного подхода, включающего энергетический, эксергетический, экологический и социально-экономический анализ. Используемые энергоисточники, квалификация персонала, доступ к обучению и степень занятости — все эти факторы требуют учета при выборе и совершенствовании сушильных технологий [1, С. 4-5].

Актуальность темы усиливается необходимостью достижения Целей устойчивого развития ООН, таких как ликвидация голода, энергоэффективность и ответственное потребление. Однако на сегодняшний день отсутствуют унифицированные критерии, позволяющие объективно сравнивать технологии сушки с позиций устойчивого развития.

Цель настоящей работы — выявить ключевые показатели устойчивости технологий сушки, опираясь на системный анализ. Представленные в статье подходы позволят определить приоритетные направления модернизации сушильных процессов в пищевой промышленности, обеспечивающие баланс между технологической эффективностью, экологической безопасностью и социальными выгодами.

Энергетический анализ технологий сушки в пищевых системах

Сушка — один из наиболее энергоёмких процессов в пищевой промышленности, и её энергетический анализ является важным этапом при оценке устойчивости [1, С. 6]. В условиях глобального стремления к энергоэффективности, закреплённого в Целях устойчивого развития ООН, выбор технологии сушки напрямую влияет на уровень энергопотребления, выбросы парниковых газов и экономическую доступность готовой продукции.

Ключевым показателем является удельное энергопотребление (SEC, Specific Energy Consumption), определяемое по формуле:

$$SEC = \frac{Q_{total}}{mH_2O},$$

где Q_{total} — общее количество энергии, затраченной на процесс (кДж), mH_2O — масса удалённой влаги (кг). Этот параметр позволяет объективно сравнивать технологии между собой и является особенно значимым для пищевых систем, где сушка применяется для стабилизации продукции с высоким содержанием влаги: фруктов, овощей, мясных и молочных продуктов [4, С. 4-6].

Дополнительным критерием является энергетическая эффективность, показывающая, какая часть подведённой энергии пошла непосредственно на испарение влаги:

$$\eta_E = \frac{Q_{испар}}{Q_{ввод}}$$

Поскольку процесс сушки динамичен, полезно использовать также мгновенные значения эффективности $\eta_E(t)$ для точного мониторинга и оптимизации работы в реальном времени [4, С. 5-6].

Для оценки теплопередачи применяется тепловой коэффициент полезного действия η_{th} :

$$\eta_{th} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_\infty}$$

где T_1 — температура воздуха на входе в сушильную камеру, T_2 — температура на выходе, T_∞ — температура окружающей среды. Приближение η_{th} к 1 говорит о близости выходного воздуха к насыщению, что свидетельствует об эффективном использовании тепла.

Среди распространённых методов наибольшее энергопотребление наблюдается у лиофильной сушки — 10 000–20 000 кДж/кг, несмотря на высокое качество продукции. Конвективная сушка горячим воздухом требует 4000–8000 кДж/кг и сопровождается значительными потерями тепла. Более эффективными являются барабанная (3000–5000 кДж/кг), вакуумная (2000–4000 кДж/кг) и инфракрасная (1500–4000 кДж/кг) технологии. Существенно снижают SEC

микроволновые сушилки (1000–3000 кДж/кг), системы с тепловым насосом (1000–2500 кДж/кг), а также инновационные методы — электрогидродинамическая сушка (<1000 кДж/кг) и ультразвук (2000–4000 кДж/кг), особенно при комбинированных режимах [3, С. 2114].

Таким образом, энергетический анализ позволяет не только оптимизировать энергозатраты, но и повысить устойчивость пищевых систем. Однако для более полной оценки эффективности сушильных технологий необходимо учитывать и качество использованной энергии, что требует эксергетического подхода, рассмотренного в следующем разделе.

Эксергетический анализ технологий сушки в пищевых системах

Эксергетический анализ позволяет глубже оценить эффективность сушильных процессов, чем традиционный энергетический подход, поскольку учитывает только ту часть энергии, которая может быть реально преобразована в полезную работу [1, С. 8-9]. В условиях пищевого производства значительная доля подводимой тепловой энергии не участвует напрямую в испарении влаги, а теряется в окружающую среду. Поэтому анализ доступной (эксергетической) энергии, а не общей, позволяет точнее определить реальную продуктивность технологии.

Эксергия (E_x) — это максимальное количество полезной работы, которую система может совершить, переходя в термодинамическое равновесие с окружающей средой. При сушке эталонными считаются температура и влажность воздуха, поэтому эксергетическая эффективность (η_{ex}) выражается как [3, С. 2113]:

$$\eta_{ex} = \frac{E_{x_{\text{ВЫХОД}}}}{E_{x_{\text{ВХОД}}}},$$

где $E_{x_{\text{ВХОД}}}$ — эксергия подведённого тепла, а $E_{x_{\text{ВЫХОД}}}$ — эксергия, использованная для испарения влаги. Чем выше температура воздуха и теплопотери, тем ниже значение η_{ex} , особенно при конвективной сушке. Повышение массового расхода

воздуха также увеличивает необратимые потери, что снижает эксергетическую эффективность.

Различные сушильные технологии демонстрируют значительный разброс значений η_{ex} . Так, у конвективных установок она составляет не более 14%, что связано с высокими теплотерями. Для вакуумной сушки показатели колеблются от 10 до 25% в зависимости от условий, а тепловые насосы демонстрируют эффективность до 30%, особенно при температуре воздуха 40–70 °С. При этом лиофильная сушка, несмотря на отличное качество продукта, обладает эксергетической эффективностью не более 10%, из-за значительных затрат энергии на фазовые переходы при низких температурах [5, С. 1378-1382].

Оптимизация параметров подачи тепла — одно из ключевых условий повышения η_{ex} . Минимальная разность температур между теплоносителем и продуктом снижает потери и сохраняет структуру сырья, особенно актуальную для фруктов, овощей и молочных продуктов [7, С. 8]. Повышение эксергетической эффективности возможно и за счёт использования систем рециркуляции воздуха и низкотемпературных режимов, особенно в сушилках с тепловыми насосами, где коэффициент полезного действия достигает 2,3–3,5. Важно учитывать и источник энергии: при применении возобновляемых ресурсов (солнечной, биогаза, геотермальной энергии) эксергетические потери снижаются, в то время как при сжигании ископаемого топлива они существенно возрастают.

Таким образом, эксергетический анализ является более точным и экологически ориентированным инструментом для оценки сушильных технологий в пищевых системах. Он позволяет учитывать не только количество, но и качество энергии, что особенно важно для устойчивого проектирования производственных процессов.

Анализ влияния процесса сушки на окружающую среду

Процессы сушки, будучи энергоёмкими, оказывают значительное воздействие на экологию, особенно в контексте глобальных выбросов парниковых газов. В 2022 году мировые выбросы CO₂ от энергетического

сектора достигли 36,8 млрд тонн, что значительно превышает уровни, установленные Парижским климатическим соглашением для ограничения глобального потепления [6, С. 1209-1211]. Энергетика остаётся одним из крупнейших источников выбросов, уступая лишь транспорту, промышленности и сельскому хозяйству, а процессы сушки в пищевой промышленности вносят ощутимый вклад в общий углеродный след.

Выбор источника энергии для сушильного оборудования является критическим фактором экологической устойчивости. Традиционные конвективные сушилки, работающие на ископаемом топливе, характеризуются значительными тепловыми потерями — до 85% подведённой энергии уходит в окружающую среду, не участвуя в испарении влаги. При этом отношение массы испарённой воды к объёму выделяемого CO₂ может составлять всего 8:1, что указывает на высокую углеродоёмкость процесса [1, 12-13]. Такая низкая эффективность негативно сказывается на общей экологической картине производства.

Для иллюстрации влияния различных технологий сушки на окружающую среду в таблице 1 представлены ключевые показатели энергоёмкости и сопутствующих выбросов CO₂.

Таблица 1.

Сравнительная характеристика по выбросам CO₂ и энергопотреблению разных технологий сушки.

Метод	SEC (MJ/кг H ₂ O)	Источник энергии	CO ₂ -емиссия
Конвективная	4–8	Газ/уголь	≈ 8 кг CO ₂ /кг H ₂ O
Комбинированная IR/MW	~20	Электричество (смесь)	< 5 кг CO ₂ /кг H ₂ O
С тепловым насосом	1–2.5	Электричество/воздушная рециркуляция	Низкая при чистой энергии
Вакуумная	2–4	Электричество	5–10 кг CO ₂ /кг H ₂ O

Продолжительная эксплуатация термических сушилок, особенно на крупных производствах, приводит к существенным выбросам парниковых газов. Например, только в Канаде ежегодное энергопотребление на процессы сушки достигает 330 ПДж, что эквивалентно более 10 млн тонн CO₂ [5, С. 1384-1385]. В таких масштабах очевидна необходимость внедрения альтернативных технологий, использующих возобновляемые источники энергии, такие как солнечная, геотермальная или биогазовая энергия, которые значительно снижают углеродный след производства.

Кроме того, нетермические методы сушки, например, микроволновая или электрогидродинамическая сушка, демонстрируют потенциал для снижения выбросов и повышения энергоэффективности [6, С. 1209-1210]. Интеграция систем с рециркуляцией воздуха и применение тепловых насосов позволяют оптимизировать процесс, минимизируя тепловые потери и сокращая время сушки, что также положительно отражается на экологическом балансе.

Важно учитывать и косвенное воздействие, связанное с генерацией электроэнергии для сушильных установок. Если электроэнергия производится из ископаемых ресурсов, экологический эффект существенно снижается из-за дополнительных выбросов на стадии производства энергии [4, С. 9-10]. В то же время переход на «зеленую» энергетику снижает общую углеродоёмкость и способствует выполнению международных обязательств по сокращению выбросов парниковых газов.

Таким образом, устойчивое развитие пищевых систем требует комплексного подхода к оценке экологического влияния процессов сушки. Только интеграция энергоэффективных технологий, использование возобновляемых источников энергии и оптимизация технологических режимов позволит существенно снизить углеродный след и минимизировать воздействие на климат. Это, в свою очередь, повысит конкурентоспособность продукции и обеспечит долгосрочную экологическую безопасность пищевой промышленности.

Заключение

Проведённый анализ показал, что процессы сушки играют ключевую роль в энергопотреблении пищевой промышленности, оказывая значительное воздействие на устойчивость продовольственных систем. Традиционный энергетический анализ даёт общее представление об эффективности, однако именно эксергетический подход позволяет более точно оценить термодинамические потери и реальные возможности оптимизации. Наиболее эффективными с точки зрения энергопотребления оказались технологии с тепловым насосом, микроволновые и ЭГД-системы, при этом эксергетическая эффективность остаётся зависимой от температуры, типа теплоносителя и свойств продукта.

Использование удельного энергопотребления (SEC) и эксергетических коэффициентов в качестве критериев позволяет проводить комплексную оценку эффективности сушки. Снижение температуры теплоносителя и внедрение систем рекуперации позволяют существенно повысить эксергетическую эффективность без ущерба для качества продукта. Анализ воздействия на окружающую среду показал, что традиционные конвективные сушилки, особенно работающие на ископаемом топливе, обладают высоким углеродным следом.

Переход к технологиям, использующим возобновляемые источники энергии и энергоэффективные режимы, способен существенно снизить выбросы CO₂. Сушка, как часть цепочки агропищевого производства, должна рассматриваться в контексте общей климатической стратегии и декарбонизации отрасли.

Таким образом, устойчивое развитие технологий сушки возможно только при одновременном учёте энергетической, эксергетической и экологической эффективности. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации промышленных сушильных установок, а также при разработке нормативов энергопотребления и внедрении лучших доступных технологий.

Список литературы:

1. Муханбетова И. Р., Кирсанов Д. В., Храмова И. А. Эксергетический и экологический подходы к устойчивой сушке: пути повышения энергоэффективности и снижения углеродного следа // Нефть и газ: опыт и инновации. — 2025. — Т. 9, № 3. — URL: <https://nigaz.ru/wp-content/uploads/2025/07/ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ-И-ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ-ПОДХОДЫ-К-УСТОЙЧИВОЙ-СУШКЕ-ПУТИ-ПОВЫШЕНИЯ-ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ-И-СНИЖЕНИЯ-УГЛЕРОДНОГО-СЛЕДА.pdf> (дата обращения: 06.07.2025).
2. Baldermann S., Blagojevic L., Frede K., Klopsch R., Neugart S., Neumann A., et al. Are Neglected Plants the Food for the Future? // Critical Reviews in Plant Sciences. – 2016. – Vol. 35, № 2. – P. 106–119.
3. Chavan A., Thorat B. Techno-economic comparison of selected solar dryers: A case study // Drying Technology. – 2022. – Vol. 40, № 10. – P. 2105–2115.
4. FAO, IFAD, UNICEF, WFP, WHO. The State of Food Security and Nutrition in the World 2022: Repurposing Food and Agricultural Policies to Make Healthy Diets More Affordable. – 2022. – DOI: 10.4060/cc0639en.
5. Lamrani B., Draoui A. Thermal performance and economic analysis of an indirect solar dryer of wood integrated with packed-bed thermal energy storage system: A case study of solar thermal applications // Drying Technology. – 2021. – Vol. 39, № 10. – P. 1371–1388.
6. Myllymaa T., Holmberg H., Ahtila P. Techno-economic evaluation of biomass drying in moving beds: The effect of drying kinetics on drying costs // Drying Technology. – 2019. – Vol. 37, № 10. – P. 1201–1214.
7. Park C. S. Contemporary Engineering Economics. – 5th ed. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 2011.