

Муханбетова Ильмира Руслановна, аспирант кафедры технологических машин и оборудования, Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань

Кирсанов Даниил Викторович, аспирант кафедры технологических машин и оборудования, Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань

Храмова Ирина Андреевна, магистрант кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОДЫ К УСТОЙЧИВОЙ СУШКЕ: ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И СНИЖЕНИЯ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА

Аннотация. Устойчивость рассматривается как многомерный показатель воздействия современных технологических процессов на будущее. В настоящем обзоре концепция устойчивого развития адаптирована к сушке пищевых продуктов, где анализируются влияние технологий сушки на энергопотребление, ресурсоэффективность, экологическую нагрузку и социальные аспекты. Основное внимание уделено системному подходу к оценке устойчивости, включающему энергетический, эксергетический, экологический и экономический анализы. В качестве индикаторов предлагается использовать удельное энергопотребление и удельное эксергопотребление (в кДж/кг извлечённой влаги), отражающие эффективность использования энергии и невозобновляемых ресурсов. Экологическая устойчивость оценивается через углеродный след и предполагаемый налог на выбросы, экономическая — через срок окупаемости и чистую приведённую стоимость, зависящие от конкретного продукта. Обсуждается влияние сушки на продовольственную безопасность и

необходимость перехода к возобновляемым источникам энергии. Предложенные показатели позволяют сопоставлять технологии сушки по критерию устойчивости и способствуют разработке более экологичных и эффективных решений.

Sustainability is considered a multidimensional indicator of the impact of modern technological processes on the future. In this review, the concept of sustainable development is adapted to food drying, analyzing the effects of drying technologies on energy consumption, resource efficiency, environmental impact, and social aspects. The focus is on a systemic approach to sustainability assessment, including energy, exergy, environmental, and economic analyses. Specific energy consumption and specific exergy consumption (in kJ/kg of removed moisture) are proposed as indicators, reflecting the efficiency of energy and non-renewable resource use. Environmental sustainability is assessed through carbon footprint and projected carbon taxes, while economic sustainability is evaluated based on payback period and net present value, which vary depending on the product. The impact of drying on food security and the need for a transition to renewable energy sources are also discussed. The proposed indicators enable the comparison of drying technologies in terms of sustainability and contribute to the development of more environmentally friendly and efficient solutions.

Ключевые слова: устойчивость, сушка пищевых продуктов, энергопотребление, эксергия, углеродный след, системный анализ, возобновляемая энергия, продовольственная безопасность, экономическая эффективность, экологическая оценка.

Keywords: sustainability, food drying, energy consumption, exergy, carbon footprint, system analysis, renewable energy, food security, economic efficiency, environmental assessment.

Введение

Климатические изменения, пандемии и глобализация продовольственного рынка усилили потребность в эффективных и устойчивых технологиях консервирования пищи, включая сушку. Современные методы сушки

направлены на удаление влаги из сырья с целью продления срока хранения продуктов, однако их воздействие выходит за рамки технологических характеристик. Сушка — энергоёмкий процесс, и её устойчивость определяется не только техническими показателями, но и влиянием на окружающую среду, экономику и общество [1].

Для комплексной оценки устойчивости технологий сушки необходим системный подход, включающий энергетический, эксергетический, экологический и социально-экономический анализ. Источники энергии, используемые при сушке, могут увеличивать углеродный след, а требования к квалификации персонала влияют на трудовую занятость и доступ к образованию. Кроме того, сушёные продукты играют ключевую роль в обеспечении продовольственной безопасности, особенно в условиях нестабильных поставок.

Устойчивое развитие стало глобальным приоритетом, закреплённым в Повестке ООН до 2030 года, включающей 17 целей [2]. Технологии сушки напрямую связаны с рядом из них — такими как ликвидация голода, энергоэффективность, ответственное потребление и устойчивое производство. Тем не менее, в настоящее время отсутствуют единые показатели устойчивости, позволяющие объективно сравнивать различные методы сушки.

Цель данной работы — рассмотреть и обосновать ключевые показатели устойчивости технологий сушки на основе системного анализа, включая технические, энергетические, экологические и социальные аспекты. Обсуждение этих параметров поможет определить направления развития более устойчивых и ресурсосберегающих решений в пищевой промышленности.

Энергетический анализ

Энергоёмкость процессов сушки делает энергетический анализ ключевым этапом оценки устойчивости технологий. Согласно Целям устойчивого развития ООН, рациональное использование энергии способствует доступу к современным энергоресурсам, снижению воздействия на климат и охране экосистем [1]. Хотя точные доли энергопотребления, приходящиеся на сушку,

варьируются, общая тенденция остаётся неизменной — стремление к снижению энергетических затрат.

Одним из главных количественных показателей является удельное энергопотребление (SEC, Specific Energy Consumption), измеряемое в кДж на 1 кг удалённой влаги:

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

где Q_{total} — суммарное потребление энергии (кДж), mH_2O — масса испарённой воды (кг).

Этот показатель может быть рассчитан как среднее значение за весь цикл сушки или как мгновенное значение в конкретные моменты времени [3]. Второй вариант особенно полезен при оптимизации процессов в режиме реального времени.

Термин энергетическая эффективность часто определяется как отношение энергии, непосредственно затраченной на испарение влаги, к общей подведённой энергии:

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

Однако сушка — это динамичный процесс, где теплообмен меняется по ходу удаления влаги. Для более точного описания рекомендуется использовать мгновенную энергетическую эффективность $\eta_E(t)$, которая отражает текущую эффективность процесса в каждый момент времени.

Также широко используется тепловой КПД (η_{th}), выражаемый через температурные параметры:

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

где T_1 — температура воздуха на входе в сушильную камеру, T_2 — температура на выходе, T_∞ — температура окружающей среды.

Этот показатель демонстрирует, насколько эффективно тепло используется для испарения влаги. Приближение η_{th} к 1 указывает на оптимальное приближение выходного воздуха к условиям насыщения.

Однако оба этих коэффициента являются относительными и зависят от конкретного оборудования и обрабатываемого материала. Поэтому для универсального сравнения технологий предпочтительнее использовать SEC в абсолютных единицах [4].

Таблица 1 - Сравнительная характеристика SEC различных технологий сушки.

№	Технология сушки	Средний SEC, кДж/кг H ₂ O	Сушильная среда	Примечания
1	Горячий воздух (конвективная)	4000–8000	Воздух	Простота, но значительные тепловые потери.
2	Барабанная (контактная)	3000–5000	Твёрдая поверхность	Хороший теплообмен, особенно для вязких продуктов.
3	Вакуумная	2000–4000	Воздух при низком давлении	Щадящий режим, подходит для чувствительных материалов.
4	Лиофильная (сублимационная)	10000–20000	Вакуум, лёд	Высокое качество, но крайне энергозатратна.
5	Микроволновая (СВЧ)	1000–3000	ЭМ-поле	Быстрая и энергоэффективная, требует точного контроля.
6	Инфракрасная	1500–4000	ИК-излучение	Быстрый нагрев поверхности, неравномерность внутри.
7	С тепловым насосом	1000–2500	Рециркулируемый воздух	Высокая энергоэффективность, особенно при низких температурах.
8	Электрогидродинамическая (ЭГД)	<1000	Ионный ветер	Очень низкий SEC, перспективная, но малораспространённая.
9	Ультразвуковая	2000–4000	Акустическое давление	Эффективна при комбинировании с другими методами.

Несмотря на популярность горячего воздуха, его низкая теплопроводность (~0,02 Вт/м·К) ограничивает эффективность. Контактные методы (барабан, жидкостная сушка) или альтернативные источники (СВЧ, вакуум, тепловой насос) значительно снижают SEC и повышают устойчивость [5]. При этом термические методы всегда сопряжены с потерями доступной энергии —

поэтому одного энергетического анализа недостаточно, и в следующем разделе будет представлен эксергетический подход, более полно оценивающий термодинамическую эффективность.

Эксергетический анализ

Эксергетический анализ даёт более точную оценку эффективности процесса сушки по сравнению с традиционным энергетическим подходом, поскольку учитывает только ту часть энергии, которая может быть использована с пользой, то есть эксергию. В условиях сушки часть энергии, особенно тепловой, теряется или оказывается недоступной для испарения влаги. Например, ощутимое тепло насыщенного пара нередко снижает производительность, не способствуя самому процессу испарения. Именно поэтому важно анализировать не всю подводимую энергию, а только её полезную долю.

Понятие эксергии ввёл Зоран Рант в 1956 году, хотя основы идеи были сформулированы раньше Уиллардом Гиббсом через концепцию свободной энергии. В основе эксергетического анализа лежит второй закон термодинамики, согласно которому любая система стремится к росту энтропии, а эксергия разрушается в результате необратимых процессов, таких как передача тепла в окружающую среду. В современной интерпретации этот закон формулируется как тенденция энергии к самопроизвольному рассеиванию при отсутствии ограничений, что также ведёт к уменьшению эксергии вплоть до её обнуления.

Эксергия всегда определяется по отношению к конкретным условиям окружающей среды, в которую погружена система. Так, при сушке эталонными считаются температура и влажность окружающего воздуха. Эти условия могут значительно меняться в зависимости от географического положения или времени года, поэтому выбор эталонных параметров существенно влияет на расчёты [1, 2]. В терминах формулы эксергетическая эффективность определяется как отношение выходной эксергии к входной, подводимой в отсутствие продукта. Таким образом, эффективность зависит не только от свойств материала, но и от внешней среды.

Технологические параметры оказывают значительное влияние на уровень эксергетической эффективности. Повышение температуры подаваемого воздуха, как правило, увеличивает теплопотери, снижая как энергетическую, так и эксергетическую эффективность. Увеличение массового расхода воздуха имеет аналогичный эффект. При этом при непрерывной сушке эффективность остаётся практически стабильной, тогда как в случае периодической сушки она возрастает ближе к окончанию процесса. Это связано с тем, что по мере приближения к термодинамическому равновесию снижается движущая сила испарения и, как следствие, уменьшаются эксергетические потери [3]. Из этого следует, что чем ближе система к равновесию, тем обратимее становится процесс, что подтверждает второй закон термодинамики. Кроме того, сушка при более низких температурах способствует сохранению качества продукта и экономии энергии.

Увеличение эксергетической эффективности наблюдается при снижении температуры воздуха на входе и выходе из сушилки, при низком исходном содержании влаги, а также при минимальной разности температур между теплоносителем и продуктом. Однако такие условия требуют увеличения времени сушки и могут повышать эксплуатационные затраты. Внедрение систем с рециркуляцией осушающего воздуха, особенно при пониженных температурах, может значительно повысить эффективность. Этот подход широко применяется в сушках с тепловыми насосами.

Интересен тот факт, что в отличие от традиционных конвективных сушилок, где повышение температуры снижает эффективность, в тепловых насосах увеличение температуры осушающего воздуха способствует повышению эксергетической эффективности, сокращая общее время процесса. Это особенно ценно в промышленных условиях, где важна скорость обработки. Тепловые насосы обычно характеризуются коэффициентом полезного действия (COP) от 2,3 до 3,5, что указывает на способность устройства отдавать больше тепла, чем оно потребляет [3, 5]. Однако при расчётах следует учитывать первичный энергетический коэффициент (PEF), особенно если источником энергии является электричество, получаемое от ископаемого топлива. В таких

случаях эксергетические потери возрастают и зависят от местных условий генерации электроэнергии.

Если при производстве используется энергия из возобновляемых источников, таких как солнечная, геотермальная или биогаз, общая эксергетическая эффективность увеличивается. Это связано с тем, что часть эксергии поставляется устойчивым источником, тем самым снижая зависимость от невозобновляемых ресурсов и уменьшая общее эксергетическое разрушение. Напротив, сжигание углеводородного топлива приводит к значительным потерям эксергии и увеличивает термоэкономические затраты [3].

Сравнение различных сушильных технологий по энергетическим и эксергетическим показателям представлено в таблице ниже.

Таблица 2 - Сравнение энергетической и эксергетической эффективности различных технологий сушки.

№	Технология	Температура, °С	Энергетическая эффективность, %	Эксергетическая эффективность, %	Комментарий
1	Конвективная	100–180	5–45	≤ 14	Высокие теплотери, чувствительность к условиям
2	Тепловой насос	40–70	50–70	до 30	Повышенная эффективность при низких температурах
3	Вакуумная	40–80	30–60	10–25	Снижение потерь, но высокая стоимость
4	Лиофильная	–20 – +40	20–35	5–10	Энергозатратный процесс, но сохраняется структура продукта

Максимизировать эксергетическую эффективность возможно путём согласования параметров подачи энергии с требованиями испарения влаги. В случае термической сушки это означает, что температура теплоносителя должна лишь немного превышать температуру продукта [6]. Для вакуумной сушки необходимо поддерживать умеренный градиент давления пара, достаточный для испарения, но не вызывающий чрезмерных затрат на поддержание вакуума.

Аналогично, при сушке с помощью теплового насоса требуется дополнительная энергия для конденсации водяного пара.

Эксергетическая эффективность может использоваться в качестве целевой функции при оптимизации процесса. Так как параметры, необходимые для её расчёта, измеряются в реальном времени, её удобно применять для мониторинга и управления. В отличие от обычной энергоэффективности, эксергетический подход учитывает качество энергии и её потенциальную полезность, что делает его более точным инструментом анализа и устойчивого проектирования. Таким образом, эксергетический анализ не только отражает реальные потери, но и позволяет минимизировать экологическое воздействие сушки, что делает его особенно важным для современных устойчивых производств.

Анализ окружающей среды

Хотя ресурсоэффективность сушки уже рассмотрена ранее, важно учесть и её влияние на климат, которое можно оценить по выбросам CO₂. По данным Международного энергетического агентства, в 2022 году мировые выбросы углекислого газа от энергетического сектора достигли 36,8 млрд тонн, что значительно превышает безопасный предел, установленный Парижским соглашением [5]. Энергетика остаётся крупнейшим источником выбросов парниковых газов, уступая лишь транспорту, промышленности и сельскому хозяйству. Эти показатели подчеркивают необходимость радикального сокращения выбросов, включая те, что связаны с процессами сушки.

Выбор источника энергии оказывает ключевое влияние на экологичность сушки. Использование биомассы или органического топлива может привести к увеличению углеродного следа по сравнению с электроэнергией, особенно если последняя получена из низкоуглеродных источников. Конвективные сушилки, в особенности те, что работают на ископаемом топливе, характеризуются высокими тепловыми потерями: до 85% энергии уходит в виде выбросов, а соотношение испаряемой воды к выделенному CO₂ может достигать 8:1 [1]. Таким образом, даже при высокой энергоэффективности оборудования углеродный след остаётся значительным.

Продолжительная работа термических сушилок также усугубляет ситуацию. Например, в Канаде годовое энергопотребление на сушку составляет около 330 ПДж, что эквивалентно более 10 миллионов тонн выбросов CO₂. Решением может стать переход на технологии сушки, использующие возобновляемую энергию или нетермические методы, что снижает как удельное потребление энергии, так и общее воздействие на климат.

Оценка устойчивости любой технологии сушки должна учитывать её альтернативные издержки и долгосрочные экологические последствия. Только при таком подходе возможно внедрение действительно устойчивых решений в промышленных масштабах.

Заключение

Современные технологии сушки требуют переосмысления с позиций устойчивого развития. Классические подходы, основанные исключительно на энергетической эффективности, не позволяют адекватно оценить реальные потери и воздействие на окружающую среду. В этом контексте эксергетический анализ становится ключевым инструментом, позволяющим выявить необратимые потери энергии, оптимизировать параметры процесса и повысить его обратимость. Применение эксергетических показателей демонстрирует, что высокая эффективность может быть достигнута при умеренных температурах, сбалансированной подаче тепла и использовании возобновляемых источников энергии.

Кроме того, интеграция анализа углеродного следа позволяет более точно оценить климатические последствия сушки и выбирать те решения, которые минимизируют выбросы CO₂. Особое внимание следует уделить переходу от традиционных термических методов к альтернативным — нетермическим или основанным на использовании тепловых насосов и возобновляемых ресурсов. Эти технологии не только обеспечивают более устойчивое энергопотребление, но и позволяют улучшить качество конечного продукта.

Таким образом, комплексный подход, сочетающий эксергетический и экологический анализ, должен лечь в основу проектирования новых сушильных

систем. Это обеспечит снижение потребления невозобновляемых ресурсов, уменьшение вредных выбросов и повышение эффективности промышленных процессов, соответствуя глобальным целям устойчивого развития.

Литература

1. Чаван А., Торат Б. Техничко-экономическое сравнение выбранных солнечных сушилок: Кейс-стади // Технология сушки. – 2022. – Т. 40, № 10. – С. 2105–2115.
2. Ламрани Б., Драуи А. Тепловые характеристики и экономический анализ косвенной солнечной сушилки для древесины с интегрированной накопительной системой тепловой энергии с фиксированной насадкой: Кейс-стади применения солнечной энергии // Технология сушки. – 2021. – Т. 39, № 10. – С. 1371–1388.
3. Мюллимаа Т., Хольмберг Х., Ахтила П. Техничко-экономическая оценка сушки биомассы в движущихся слоях: Влияние кинетики сушки на стоимость сушки // Технология сушки. – 2019. – Т. 37, № 10. – С. 1201–1214.
4. Парк С. С. Современная инженерная экономика. – 5-е изд. – Аппер Сэддл Ривер: Прентис Холл, 2011.
5. ФАО, МФСРП, ЮНИСЕФ, ВПП и ВОЗ. Состояние продовольственной безопасности и питания в мире 2022: Перенастройка продовольственных и сельскохозяйственных политик для доступности здорового питания. – 2022. – DOI: 10.4060/cc0639en.
6. Бальдерманн С., Благоевич Л., Фреде К., Клопш Р., Нойгарт С., Нойманн А. и др. Заброшенные растения — пища будущего? // Критические обзоры по ботанике. – 2016. – Т. 35, № 2. – С. 106–119.

Literature

1. Chavan A., Thorat B. Techno-economic comparison of selected solar dryers: A case study // Drying Technology. – 2022. – Vol. 40, № 10. – P. 2105–2115.
2. 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.

3. 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.
4. Park C. S. *Contemporary Engineering Economics*. – 5th ed. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 2011.
5. 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.
6. 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.