

*Журнал «Научное обозрение. Технические науки» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИИ № ФС77-57440 выдано 27.03.2014. ISSN 2500-0799*

**Двухлетний импакт-фактор РИНЦ – 0,695**  
**Пятилетний импакт-фактор РИНЦ – 0,319**

*Учредитель, издатель и редакция:*  
*ООО НИЦ «Академия Естествознания»,*

*Почтовый адрес: 101000, г. Москва, а/я 47*  
*Адрес учредителя, издателя: 410056, г. Саратов,*  
*ул. им. Чапаева В.И., д. 56*  
*Адрес редакции: 410035, г. Саратов,*  
*ул. Мамонтовой, д. 5*

**Founder, publisher and edition:**  
**LLC SPC Academy of Natural History,**

**Post address: 101000, Moscow, p.o. box 47**  
**Founder's, publisher's address: 410056, Saratov,**  
**5 Chapaev V.I. str.**  
**Editorial address: 410035, Saratov,**  
**5 Mamontovoi str.**

*Подписано в печать 30.08.2024*  
*Дата выхода номера 30.09.2024*  
*Формат 60×90 1/8*

*Типография*  
*ООО НИЦ «Академия Естествознания»,*  
*410035, г. Саратов, ул. Мамонтовой, д. 5*

**Signed in print 30.08.2024**  
**Release date 30.09.2024**  
**Format 60×90 8.1**

**Typography**  
**LLC SPC «Academy Of Natural History»**  
**410035, Saratov, 5 Mamontovoi str.**

*Технический редактор Доронкина Е.Н.*  
*Корректор Галенкина Е.С., Дудкина Н.А.*

*Распространяется по свободной цене*  
*Тираж 1000 экз. Заказ НО 2024/4*  
*Подписной индекс в электронном каталоге*  
*«Почта России»: ПА518*  
*© ООО НИЦ «Академия Естествознания»*

Журнал «НАУЧНОЕ ОБОЗРЕНИЕ» выходил с 1894 по 1903 год в издательстве П.П. Сойкина. Главным редактором журнала был Михаил Михайлович Филиппов. В журнале публиковались работы Ленина, Плеханова, Циолковского, Менделеева, Бехтерева, Лесгафта и др.

**Journal «Scientific Review» published from 1894 to 1903. P.P. Soykin was the publisher. Mikhail Filippov was the Editor in Chief. The journal published works of Lenin, Plekhanov, Tsiolkovsky, Mendeleev, Bekhterev, Lesgaft etc.**



**М.М. Филиппов (M.M. Philippov)**

С 2014 года издание журнала возобновлено  
Академией Естествознания

**From 2014 edition of the journal resumed  
by Academy of Natural History**

Главный редактор: М.Ю. Ледванов  
**Editor in Chief: M.Yu. Ledvanov**

Редакционная коллегия (**Editorial Board**)  
А.Н. Курзанов (**A.N. Kurzanov**)  
Н.Ю. Стукова (**N.Yu. Stukova**)  
М.Н. Бизенкова (**M.N. Bizenkova**)  
Н.Е. Старчикова (**N.E. Starchikova**)  
Т.В. Шнуровозова (**T.V. Shnurovozova**)

---

***НАУЧНОЕ ОБОЗРЕНИЕ • ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ***

***SCIENTIFIC REVIEW • TECHNICAL SCIENCES***

*www.science-education.ru*

*2024 г.*

---



***В журнале представлены научные обзоры,  
статьи проблемного  
и научно-практического характера***

***The issue contains scientific reviews,  
problem and practical scientific articles***

---

## СОДЕРЖАНИЕ

### Технические науки

#### СТАТЬИ

ГИДРОГЕЛИ ДЛЯ АКТИВНОЙ ФОТОНИКИ <i>Ананьев Р.О.</i> .....	5
ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И МЕТОДОВ В ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ <i>Обичкин Р.Ю., Данилов А.В., Петухов С.В., Надеин В.Ф.</i> .....	9
СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УТИЛИЗАЦИИ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ КОНДЕНСАТОРА ПАРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ В ТЕПЛОФИКАЦИОННОМ ЦИКЛЕ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ <i>Хвостиков А.С.</i> .....	14
<b>НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ</b>	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КАТАЛИТИЧЕСКОГО ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ПЛОДООВОЩНОГО СЫРЬЯ. ОБЗОР ПРЕДМЕТНОГО ПОЛЯ <i>Бурак Л.Ч., Востриков А.В.</i> .....	21
ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В КОНСТРУКЦИЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН <i>Хнычев Д.А.</i> .....	35

---

## CONTENTS

### Technical sciences

#### ARTICLES

##### HYDROGELS FOR ACTIVE PHOTONICS

*Anan'ev R.O.* ..... 5

##### THE USE OF MODERN TECHNOLOGIES AND METHODS IN THE OPTIMIZATION OF POWER SUPPLY SYSTEMS

*Obichkin R.Yu., Danilov A.V., Petukhov S.V., Nadein V.F.* ..... 9

##### COMPARISON OF THE EFFICIENCY OF UTILIZATION OF LOW-POTENTIAL HEAT OF A STEAM TURBINE CONDENSER IN A HEATING CYCLE USING HEAT PUMPS

*Khvostikov A.S.* ..... 14

#### REVIEWS

##### USING CATALYTIC INFRARED RADIATION TECHNOLOGY IN PROCESSING FRUIT AND VEGETABLE RAW MATERIALS. A SUBJECT FIELD REVIEW

*Burak L.Ch., Vostrikov A.V.* ..... 21

##### OVERVIEW OF THE APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE DESIGNS OF ELECTRICAL MACHINES

*Khnychev D.A.* ..... 35

## СТАТЬИ

УДК 544.773.432

## ГИДРОГЕЛИ ДЛЯ АКТИВНОЙ ФОТОНИКИ

Ананьев Р.О.

*ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,  
Москва, e-mail: 2005roma.roman@mail.ru*

В работе рассматриваются последние достижения в области фотоники на основе гидрогеля и нанотехнологии изготовления гидрогелей, даны представления о будущих направлениях и перспективах деформируемой гидрогелевой фотоники, а также ее потенциальных практических применениях. Целью исследования является анализ, классификация на основе фотонных свойств и производственных процессов гидрогелевых фотонных методов нанопроизводства. Исследование основано на анализе научных публикаций, посвященных фотонике и гидрогелям. Основные использованные в работе методологические принципы – анализ достижений в рассматриваемой области, сравнение между собой методов нанопроизводства. Обычные фотонные устройства демонстрируют статические оптические свойства, зависящие от конструкции, показателя преломления материала и геометрические параметры. Метаповерхности, которые состоят из массивов наноструктур, достигли беспрецедентной производительности, позволяя пользователю модулировать фазу и амплитуду. Однако даже несмотря на то, что необычные оптические свойства метаповерхностей определяются материалами и структурным проектированием, все еще наблюдается отсутствие динамических оптических свойств после изготовления. В результате были предложены критерии для классификации методов нанопроизводства, а также представлены перспективы гидрогелевой фотоники. Гидрогелевая фотоника стала многообещающим решением в области активной фотоники, обеспечивая в первую очередь деформируемые геометрические параметры в ответ на внешнее воздействие.

**Ключевые слова:** гидрогель, фотолитография, электронно-лучевая литография, метаповерхность, активная фотоника, наноимпринтная литография

## HYDROGELS FOR ACTIVE PHOTONICS

Ananev R.O.

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, e-mail: 2005roma.roman@mail.ru*

The paper discusses recent advances in hydrogel-based photonics and nanotechnologies for hydrogel fabrication. Additionally, it provides insights into future directions and prospects for deformable hydrogel photonics, as well as its potential practical applications. The goal of the research is to analyze and classify hydrogel-photonics nanofabrication methods based on photonic properties and production processes. The study is based on an analysis of scientific publications focused on photonics and hydrogels. The main methodological principles used in the work are the analysis of achievements in the considered field and the comparison of nanofabrication methods. Conventional photonic devices exhibit static optical properties that depend on design, material refractive index, and geometric parameters. Metasurfaces, which consist of arrays of nanostructures, have achieved unprecedented performance, allowing users to modulate phase and amplitude. However, despite the unique optical properties of metasurfaces being defined by materials and structural design, there remains a lack of dynamic optical properties after fabrication. As a result, criteria for classifying nanofabrication methods have been proposed, and the prospects of hydrogel photonics have been presented. Hydrogel photonics has emerged as a promising solution in the field of active photonics, primarily providing deformable geometric parameters in response to external stimuli.

**Keywords:** hydrogel, active photonics, photolithography, electron beam lithography, metasurface, nanoimprint lithography

## Введение

Фотонные устройства стали неотъемлемой частью повседневной жизни. Конструкция этих фотонных устройств обычно предполагает использование пленок для контроля их оптических характеристик. Этот подход к проектированию позволяет точно манипулировать поведением света, обеспечивая индивидуальные функциональные возможности и повышая производительность оптических систем. Благодаря развитию методов нанопроизводства, таких как фотолитография (ФЛ) [1], электронно-лучевая литография (ЭЛЛ) [2] и наноимпринтная литография (НИЛ) [3], стало возможным изготавливать сложные кон-

струкции [4]. Также появился новый тип фотонного устройства, известный как метаповерхность, который относится к категории структурированных форм. Метаповерхности используют хорошо спроектированные периодические или квазипериодические массивы субволновых структур, которые могут контролировать взаимодействие между светом и материей [5].

Согласно хорошо известному механизму в фотонике, динамический оптический отклик в фотонике может быть достигнут при выполнении одного из следующих условий: (1) контроль падающего света, (2) модуляция показателя преломления материала или окружающей среды, (3) контроль

геометрических параметров конструкций [6]. В условии (1) обычно используются жидкие кристаллы (ЖК), где независимые ЖК-ячейки преимущественно прикреплены к фотонным устройствам для настройки поляризации. Однако для условия (2) используется подход для достижения оптической модуляции путем замены статических материалов динамическими материалами, которые проявляют различные оптические свойства в ответ на внешнее воздействие. Проводились попытки использования условия (3) в деформируемых материалах, оптическим откликом которых можно управлять путем изменения геометрических параметров с помощью внешних воздействий, таких как деформация, температура, влажность и др.

**Целью исследования** является анализ, классификация на основе фотонных свойств и производственных процессов таких гидрогелевых фотонных методов нанопроизводства, как рост пленки (покрытие и синтез), ФЛ, ЭЛЛ и НИЛ, а также представление перспектив гидрогелевой фотоники.

#### Материалы и методы исследования

Исследование основано на библиографическом поиске и последующем анализе научных публикаций, посвященных фотонике и гидрогелям. Используются материалы из открытых источников интернета, базы данных РИНЦ, Web Of Science и Scopus. Основные использованные в работе методологические принципы – анализ достижений в рассматриваемой области, сравнение между собой методов нанопроизводства.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Свойства гидрогелей определяются взаимодействиями между полимерными цепя-

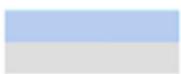
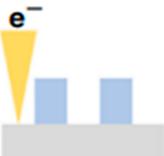
ми и молекулами воды. Полимерные цепи содержат гидрофильные группы ( $-\text{NH}_3$ ,  $-\text{COOH}$ ,  $-\text{CONH}_2$ ,  $-\text{CONH}-$ ,  $-\text{OH}$  и т.д.), которые могут взаимодействовать с молекулами воды посредством водородных связей, электростатических взаимодействий или сил Ван-дер-Ваальса.

Гидрогели обладают замечательными свойствами материала. Однако для поддержания чувствительности гидрогелей к внешнему воздействию после изготовления и достижения желаемых форм необходимо использовать совместимые методы изготовления. В данном подходе классификация гидрогелей происходит на основе процессов изготовления, которые позволяют реализовать фотонные устройства на основе пленки/структуры (таблица).

Были проведены обширные исследования по фотоническому применению реконфигурируемых гидрогелевых пленок с использованием уникальных свойств гидрогелей. Хотя могут быть различия в методологии, используемой для формирования этих пленок в зависимости от требований к материалу, для создания тонких гидрогелевых пленок используются общие подходы нанесения покрытия и процессов синтеза. Традиционно конфигурация металл – изолятор – металл (МИМ) является мощным и простым решением [7]. Конфигурации МИМ включают как режим отражения, так и режим передачи в зависимости от толщины нижнего металлического зеркала. Конфигурация металл – гидрогель – металл (МГМ), в которой изоляционный слой заменен гидрогелем, позволяет настраивать оптические реакции посредством внешнего воздействия.

В последующих исследованиях был предложен новый подход для повышения чувствительности датчиков.

Методы изготовления фотонных устройств на основе гидрогеля с пленками/структурами

Производство	Рост пленки	ФЛ	ЭЛЛ	НИЛ
Схема				
Механизм	Синтез покрытия	УФ-полимеризация	Электронный луч	Давление
Стоимость/ время	Низкая/быстро	Низкая/быстро	Высокая/медленно	Низкая/быстро
Разрешение	–	~ 100 нм	< 50 нм	~ 50 нм
Фотонный подход	Резонатор	Фотонно-кристаллический резонатор	Фотонный кристалл, мета-атом	фотонный кристалл, мета-атом

Для улучшения влагопроницаемости верхний напыленный металл был заменен неупорядоченным слоем наночастиц (НЧ) Ag в МГМ. Улучшенное проникновение влаги, обусловленное эффектом Кнудсена, связанным с потоком газа в неплотной системе [8], способствовало увеличению чувствительности этого колориметрического датчика.

Сообщалось также об использовании полимера (N-изопропилакриламида), который менял форму при определенной температуре [9]. Кроме того, фотолюминесцентные гидрогели с добавленными эмиттерами были интегрированы в полость МГМ для создания платформы с настраиваемым излучением [10]. Цвет образца обратимо менялся с увеличением и уменьшением значительной относительной влажности от 3 до 80%, что приводило к красному смещению резонанса резонатора на 40 нм, с 548 до 588 нм и почти двукратному увеличению интенсивности излучения. Значительный спектральный сдвиг был замечен и имел существенное значение, особенно для сенсорных приложений.

Благодаря дальнейшим достижениям МГМ вместо верхнего металлического слоя для динамических плазменных цветных дисплеев стали использоваться структурные металлические наноматрицы. Было продемонстрировано переключение связанного состояния в пространстве, управляемого влажностью через перенесенную металлическую нанорешетку в конфигурации металл – гидрогель [11].

Гидрогелевые композиты создавались смешиванием суперпарамагнитных НЧ  $Fe_3O_4$  со смесью акриловой кислоты и поли(этиленгликоль)диакрилата для структурной окраски. Фотонные кристаллы на основе гидрогеля были получены путем магнитно-индуцированной самосборки НЧ  $Fe_3O_4$ .

При изготовлении наноструктур, включающих травление, гидрогели могут непосредственно служить резистом, обеспечивая прямое формирование наноструктур. Когда электронный луч воздействует на определенную область пленки гидрогеля, высокая энергия разрывает молекулярные связи внутри гидрогеля, образуя радикалы, что приводит к сшиванию соседних полимерных цепей [12]. После сшивания структурированные гидрогели сохраняют свои характеристики гидрогелей, но становятся неразрывными в растворителях.

Поскольку гидрогели имеют низкое значение  $n$  ( $\sim 1,5$ ), они демонстрируют слабые характеристики модуляции. Чтобы преодолеть это ограничение, были предприняты

попытки ввести конфигурации резонатора, которые облегчают модуляцию посредством интерференции дополнительного света внутри резонатора. Кроме того, фотонные устройства в аналогичной конфигурации продемонстрировали мультиплексирование изображений с поведением, реагирующим на влажность, на основе ступенчатой МГМ.

Помимо формирования рисунка с помощью источника света и воздействия электронного луча, были попытки изготовить фотонные устройства с простым механизмом механического давления с нулевым сопротивлением. НИЛ – процесс, обеспечивающий полупостоянное и параллельное производство путем печати на смоле с использованием мягкой формы, скопированной с мастер-формы.

Присутствие гидрогеля внутри пикселя может привести к красному смещению резонансного пика из-за набухания в ответ на увеличение относительной влажности от 20 до 90%, что позволяет отображать всю гамму RGB в каждом пикселе. Прямое центрифугирование Ag НЧ на напечатанных образцах позволяет получать изображения-хамелеоны с высоким разрешением, состоящие из ярких пикселей.

Последующие исследования показали, что метаповерхность на основе поливинилового спирта (ПВС) обладает необратимым/обратимым оптическим шифрованием. Метаповерхность из ПВС была создана методом центрифугирования водного раствора ПВС на мягкую форму, после чего она была отпечатана на подложке путем приложения давления. Благодаря использованию водорастворимой смолы форму можно промывать водой и использовать повторно. Устройство было предназначен для мультиплексирования голограмм (дальнего поля) и структурных цветов (ближнего поля) с геометрическим фазовым дизайном.

Вышеупомянутое исследование продемонстрировало совместимость процессов гидрогеля и НИЛ, что привело к последующим исследованиям, направленным на обеспечение производительности. Этот метод может обеспечить быстрое производство за счет интеграции мастер-формы и расположенных под ней нагревателей Джоуля на основе n-легированного кремния, поскольку тепло удерживается структурированной поверхностью и быстро нагревается/охлаждается. Разработка быстрого процесса изготовления может облегчить развитие гидрогелевой фотоники как с точки зрения коммерциализации, так и с точки зрения академических исследований.

Таким образом, разработка и создание фотонных устройств на основе гидрогеля

с помощью различных процессов микро/нанопроизводства открыли новые возможности в области нанофотоники. Гидрогели совместимы с различными платформами микро/нанопроизводства, такими как покрытия, фотополимеризация, ЭЛЛ и НИЛ, что обеспечивает преимущества при изготовлении. В частности, фотоника на основе гидрогеля подходит для коммерциализации из-за простоты ее изготовления, такой как НИЛ, что обеспечивает массовое производство. НИЛ можно комбинировать с методами рулонной печати, увеличивая потенциал высокопроизводительного производства. Кроме того, гидрогели демонстрируют новый механизм геометрической модуляции, что обеспечивает возможность настройки фотонных устройств. Продолжающееся развитие процесса производства и разработки гидрогелей продемонстрировало их огромный потенциал.

В биоиндустрии предпринимались попытки коммерциализировать гидрогели, обладающие нетоксичностью, способностью к набуханию и прозрачностью. Тем не менее гидрогели до сих пор не достигли заметной коммерциализации в области активной фотоники.

Для оценки характеристик гидрогелевой фотоники следует использовать два основных фактора: время восстановления и диапазон деформации. В целом время восстановления можно представить как разницу во времени, необходимом для достижения интенсивности от 10 до 90% ( $T_{10-90}$ ) и от 90 до 10% ( $T_{90-10}$ ) каждого равновесного состояния. Однако динамический отклик гидрогелей обусловлен молекулами гидрогеля, и не существует определенного молекулярного соотношения для сравнения характеристик. В частности, ПВС, чувствительный к влажности, имеет нелинейную связь с модулем упругости ПВС.

Глубокое исследование динамических характеристик гидрогелей на наноуровне и стандартизация их физических свойств может способствовать успешной коммерциализации. Однако по-прежнему сложно анализировать изменения морфологии и показателя преломления в реальном времени, связанные с набуханием гидрогеля на наноуровне. Кроме того, путь к коммерческому успеху требует создания комплексных протоколов характеристик производительности и испытаний. Эти протоколы должны оценивать надежность и стабильность работы гидрогелевых фотонных устройств

в различных условиях окружающей среды, таких как температура, влажность или pH. Обеспечивая свою функциональность и долговечность в различных условиях, гидрогели могут расширить возможности применения фотонных устройств на основе гидрогеля.

### Заключение

Интеграция гидрогелей и фотонных устройств обеспечивает дополнительные средства настройки оптических реакций с помощью внешнего воздействия и сама по себе является уникальным полем исследований. Кроме того, гидрогели недороги, экологичны и совместимы с различными производственными процессами, что делает их многообещающим материалом. Была продемонстрирована их применимость в процессах массового производства, таких как НИЛ, и ожидается, что их потенциальное применение будет постепенно расширяться.

### Список литературы

1. Bratton D., Yang D., Dai J., Ober C.K. Recent progress in high resolution lithography // *Polymers for Advanced Technologies*. 2006. Vol. 17, Is. 2. P. 94–103.
2. Tseng A.A., Chen K., Chen C.D. & Ma K.J. Electron beam lithography in nanoscale fabrication: recent development // *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*. 2003. Vol. 26, Is. 2. P. 141–149.
3. Rogers J.A. & Nuzzo R.G. Recent progress in soft lithography // *Materials Today*. 2005. Vol. 8, Is. 2. P. 50–56.
4. Kim I. et al. Cascade domino lithography for extreme photon squeezing // *Materials Today*. 2020. Vol. 39, Is. 1. P. 89–97.
5. Moon S.W., Kim Y., Yoon G., Rho J. Recent progress on ultrathin metalenses for flat optics // *iScience*. 2020. Vol. 23, Is. 12. P. 34.
6. Raees-Hosseini N. & Rho J. Metasurfaces based on phase-change material as a reconfigurable platform for multifunctional devices // *Materials*. 2017. Vol. 10, Is. 9. P. 23.
7. Ogawa S., Kimata M. Metal-insulator-metal-based plasmonic metamaterial absorbers at visible and infrared wavelengths: a review // *Materials*. 2018. Vol. 11, Is. 3. P. 12.
8. Wang L. Fundamental transport mechanisms, fabrication and potential applications of nanoporous atomically thin membranes // *Nature Nanotechnology*. 2017. Vol. 12, Is. 1. P. 509–522.
9. Chervinskii S. Humidity- and temperature-tunable metal-hydrogel-metal reflective filters // *ACS Applied Materials & Interfaces Journal*. 2021. Vol. 13, Is. 1. P. 50564–50572.
10. Ghindani D. Humidity-controlled tunable emission in a dye-incorporated metal-hydrogel-metal cavity // *ACS Photonics*. 2022. Vol. 9, Is. 7. P. 2287–2294.
11. Zheng M. Moisture-driven switching of plasmonic bound states in the continuum in the visible region // *Advanced Functional Materials*. 2023. Vol. 33, Is. 3. P. 1–10.
12. Abou Elmaaty T., Okubayashi S., Elsisy H. & Abouelenin S. Electron beam irradiation treatment of textiles materials: a review // *Journal of Polymer Research*. 2022. Vol. 29, Is. 117. P. 44–54.

УДК 004:001.89

## ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И МЕТОДОВ В ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Обичкин Р.Ю., Данилов А.В., Петухов С.В., Наденин В.Ф.

ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»  
Высшая школа энергетики нефти и газа, Архангельск, e-mail: r.obichkin@narfu.ru

Системы электроснабжения играют ключевую роль в современном мире, обеспечивая энергией различные промышленные и бытовые объекты. Оптимизация этих систем становится все более важной задачей в условиях растущего потребления электроэнергии и стремительного развития технологий. Цель исследования – использование новейших технологий и подходов в оптимизации систем электропитания для повышения продуктивности и устойчивости энергетических систем. Проведение исследования было основано на литературных данных, которые были предоставлены в открытом доступе на онлайн – платформе «Киберленинка», научной электронной библиотеки eLIBRARY и размещены в фонде библиотеки ФГАОУ ВО Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. Для улучшения эффективности и надежности систем электроснабжения применяются современные технологии и методы, которые позволяют снизить потери энергии, повысить безопасность и обеспечить стабильную подачу электроэнергии. Для оптимизации систем электроснабжения широко используются такие технологии, как умные сети (Smart Grids) позволяющие автоматизировать и оптимизировать процессы управления потоками электроэнергии, применение устройств аккумулирования энергии таких как кинетические накопители, энергоэффективные трансформаторы способствующие уменьшению потерь энергии в процессе передачи. Использование возобновляемых источников энергии позволяющих снизить зависимость от традиционных источников электроэнергии и способствует экологической устойчивости. В данной статье рассмотрены основные направления для применения современных технологий и методов в оптимизации систем электроснабжения, перспективы использования искусственного интеллекта и математического программирования, а также приведены практические примеры их использования. Применение современных технологий и методов в оптимизации систем электроснабжения не только повышает эффективность и надежность энергоснабжения, но и способствует экономии ресурсов и снижению негативного воздействия на окружающую среду. Развитие этого направления играет значительную роль в обеспечении устойчивого развития энергетики.

**Ключевые слова:** электроэнергия, электроснабжение, математическое программирование, искусственный интеллект

## THE USE OF MODERN TECHNOLOGIES AND METHODS IN THE OPTIMIZATION OF POWER SUPPLY SYSTEMS

Obichkin R.Yu., Danilov A.V., Petukhov S.V., Nadein V.F.

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov Higher School of Oil  
and Gas Energy, Arkhangelsk, e-mail: r.obichkin@narfu.ru

Power supply systems play a key role in the modern world, providing energy to various industrial and domestic facilities. Optimizing these systems is becoming an increasingly important task in the face of increasing energy consumption and rapid technological developments. The purpose of the study is to use the latest technologies and approaches in optimizing power systems to increase the productivity and sustainability of energy systems. The research was based on literature data that was made publicly available on the online platform “Cyberleninka”, the scientific electronic library eLIBRARY and placed in the library collections of the Federal State Educational Institution of Higher Education of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. To improve the efficiency and reliability of power supply systems, modern technologies and methods are used to reduce energy losses, improve safety and ensure a stable supply of electricity. Technologies such as smart grids are widely used to optimize power supply systems allowing to automate and optimize the processes of managing electricity flows, the use of energy storage devices such as kinetic storage devices, energy-efficient transformers that help reduce energy losses during the transmission process. The use of renewable energy sources reduces dependence on traditional sources of electricity and contributes to environmental sustainability. This article discusses the main directions for the use of modern technologies and methods in optimizing power supply systems, prospects for the use of artificial intelligence and mathematical programming, and also provides practical examples of their use. The use of modern technologies and methods in optimizing power supply systems not only increases the efficiency and reliability of power supply, but also helps to save resources and reduce the negative impact on the environment. The development of this area plays a significant role in ensuring sustainable energy development.

**Keywords:** electric power, power supply, mathematical programming, artificial intelligence

### Введение

В современном мире запросы к системам электроснабжения становятся все более высокими. С появлением нового обо-

рудования, изобретением различных способов производства и передачи электроэнергии, особенно нетрадиционными методами, многие системы могут работать нестабиль-

но и все они требуют постоянного контроля за текущей ситуацией. При оптимизации систем электроснабжения необходимо внедрять новые, современные методы.

Содержательное определение оптимизации систем электроснабжения сформулировали И.В. Жежеленко с соавторами: «Оптимизация систем электроснабжения представляют собой совокупность действий, направленных на установление лучшего варианта функционирования систем электроснабжения, соответствующего экстремальному значению критерия оптимальности при выполнении ограничений, накладываемых на оптимизируемые параметры» [1, с. 70]. Авторы В.Я. Любченко, С.В. Родыгина предлагают: «Для того чтобы решить задачу поиска оптимального решения, необходимо выполнить ряд условий. Прежде всего, задача должна иметь минимум два варианта решения. Кроме того, она должна обладать возможностью создания критерия, который поможет выбрать наиболее оптимальный вариант» [2, с. 10].

С использованием новейших технологий и приемов, например, механизации и встраивания интеллектуальных сетей в системы электроснабжения, возможно успешно контролировать мощность данной системы, разделять энергию в соответствии с требованиями безопасности и предотвращать перегрузки. Это дает возможность экономить силы и уменьшить нагрузку на сеть, преимущественно в периоды максимального потребления.

Использование автоматического контроля и управления систем электроснабжения позволяет достичь высокой эффективности работы системы, а также уменьшить потери электроэнергии. Кроме того, разработка интеллектуальных алгоритмов позволяет предсказать возможные аварийные ситуации и применить соответствующие меры по предотвращению отключений или повреждений оборудования.

Еще одна значимая сфера улучшения электроэнергетических систем – внедрение удаленного контроля. С применением новейших технологий коммуникации и механизации возможно дистанционно наблюдать и управлять всей системой подачи электроэнергии. Это дает возможность быстро реагировать на неполадки и катастрофы, уменьшает вероятность возникновения простоев и повышает уровень обслуживания.

**Цель исследования.** Использование новейших технологий и подходов в оптимизации систем электропитания для повышения продуктивности и устойчивости энергетических систем. Регулирование энергозатрат, удаленное управление и применение аль-

тернативных источников энергии представляют собой значимые пути прогресса в данной сфере. Использование данных технологий дает возможность не только экономить электричество и материалы, но и улучшать устойчивость и экологическую безопасность электросистем.

### Материалы и методы исследования

Проведение исследования было основано на литературных данных, которые были предоставлены в открытом доступе на онлайн – платформе «Киберленинка», научной электронной библиотеки eLIBRARY и размещены в фонде библиотеки ФГАОУ ВО Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. Ключевыми методами стали применение общенаучного подхода и деконструкции.

### Результаты исследования и их обсуждение

Одной из ключевых технологий, применяемых в оптимизации систем электроснабжения, является автоматизация. Автоматизация позволяет управлять электрическими сетями с высокой точностью и оперативностью, оптимизируя распределение энергии и управление нагрузками. С помощью автоматических систем мониторинга и управления, операторы электрических сетей могут получать информацию о состоянии системы в любое время, прогнозировать нагрузки, оптимизировать распределение мощности и управлять аварийными ситуациями. Такие системы уже давно применяются в различных сферах промышленности в сетях электроснабжения.

Следующим интересным, по мнению авторов данного исследования, способом улучшения систем электропитания является применение устройств аккумулирования энергии, которые разрешают сохранять электрическую энергию во время низкого потребления и применять ее в пиковые моменты, когда требование к энергии высокое. Такие устройства могут быть построены на применении технологий аккумуляции энергии, накопления гидроэнергии, сохранения тепла-холода и других. Сейчас уже используются кинетические накопители энергии способные отдавать в нагрузку до 250 кВт мощности, при этом имея не большие габариты (до 1,5 метров). Производство таких систем пока является дорогостоящим.

Один из методов, объединяющий различные подходы к решению задач оптимизации, является «Математическое программирование», которое служит основой изучения операций. Целью математическо-

го программирования является выбор программы действий, направленной на решение задачи. При возникновении проблем, связанных с оптимизацией, необходимо учитывать, что они имеют большой объем и сложность в решении, поэтому их реализация возможна только при помощи использования компьютерных программ.

Методы машинного обучения и искусственного интеллекта могут быть применены для изучения информации об использовании энергии, прогнозирования нагрузки, оптимизации распределения энергии и контроля нагрузок. Такие устройства могут изучать огромные объемы информации и принимать решения, опираясь на полученные факты. Вследствие применения искусственного разума, вероятно улучшение продуктивности электропитания и уменьшение расходов.

Автоматизирование, применение умных сетей, устройств хранения энергии и искусственный разум являются главными составляющими в современной оптимизации системы электропитания.

После анализа различных источников и литературы было установлено два наиболее перспективных направления развития системы электроснабжения: использование искусственного интеллекта на основе нейросети и компьютерное моделирование.

Компьютерное моделирование представляет собой метод решения задачи анализа сложной системы на основе изучения её компьютерной симуляции – одну из важных техник в улучшении электроэнергетических систем. Данная методика способствует проведению исследования и улучшению различных составляющих структуры, включая нагрузки, разделение электрической мощности, производство и распределение тепла.

Одним из главных привилегий компьютерной симуляции является способность прогнозировать разные сценарии функционирования устройства и определить оптимальные характеристики для достижения желаемого эффекта. В дополнение к этому компьютерное моделирование дает возможность эффективно исследовать воздействие различных факторов, таких как: изменение мощности, применение разных источников энергии, технические характеристики оборудования, погодные условия и их влияние на функционирование сетей электроснабжения.

Имеются различные типы компьютерного моделирования, которые используются в улучшении функционирования электропитания. Один из них представляет собой статистическое моделирование, которое

базируется на изучении прошлых сведений о нагрузке и прогноз будущих тенденций развития. Это дает возможность установить наилучшую тактику управления электроэнергетической системой и уменьшить издержки на электричество.

Ещё одной формой компьютерного моделирования является динамическая симуляция, которая дает возможность анализировать функционирование системы в режиме непосредственного времени. Использование моделирования позволяет учитывать изменение нагрузки и других факторов в течение времени и прогнозировать их воздействие на работу системы электропитания. Это дает возможность выявить наиболее подходящий режим работы системы и уменьшить затраты на энергию и оборудование. «Для управления системой необходимо моделировать внутреннюю, микро- и макросреду. Модель среды создается на основе методов системного анализа» [3, с. 96].

Компьютерная симуляция также используется в улучшении распределения электроэнергии в различных системах электроснабжения. С применением данной методики возможно вычислить наилучшие маршруты передачи энергии, уменьшить потери энергии при передаче и компенсировать нагрузку на сеть. В дополнение к сказанному, компьютерные симуляции дают возможность прогнозировать и контролировать электрические сети в реальном времени, что особенно важно в ситуациях увеличивающейся части возобновляемых источников энергии.

На данный момент присутствует огромное количество программных инструментов, специально созданных с целью компьютерного моделирования. Они допускают формирование моделей систем питания и их выполнение, изучение и улучшение характеристик. Широкие возможности предоставляет программа для компьютерного моделирования MATLAB [4, с.11] с встроенным математическим аппаратом. Программа MATLAB использует матричное представление данных с матричными операциями над ними [4, с.12].

Данная технология уже широко применяется, в том числе в учебном процессе. Так авторами [5, с.299] была выполнена модель статического реле РСТ-11, и была показана возможность создания с помощью стандартных программных пакетов моделей статических реле, соответствующих реальным образцам с достаточной для инженерных практик точностью. При моделировании приходилось сталкиваться с некоторыми сложностями: во-первых – необходимостью подбора импортных ана-

логов микросхем отечественным, так как при производстве статических реле производители чаще используют российские электронные элементы; во-вторых – нестандартные входные и выходные блоки реле, используемые как гальванические развязки в схемах различного назначения. Как показали исследования, при сравнении созданных авторами некоторых моделей реле с реальными образцами, разница напряжений в контрольных точках схемы не превышала допустимых 5%.

К сожалению данная программа покинула Российский рынок, что в свою очередь позволило пробиться отечественным проектам, таким как SimInTech. Появляются виртуальные платформы, работающие с пакетами Simulink MATLAB.

На основе изучения теоретических и практических исследований возникает следующий вывод. Компьютерное моделирование является неотъемлемой составляющей проектирования и улучшения систем энергоснабжения. Это дает возможность исследовать и прогнозировать разные варианты функционирования системы, определить оптимальные характеристики и методы управления, снизить издержки на электричество и оборудование.

Роберт Каллан отмечает «Разработка искусственного интеллекта началась ещё на заре XX столетия, но только в 90-х годах, когда были преодолены некоторые теоретические барьеры, а вычислительные системы стали достаточно мощными, нейронные сети получили широкое признание» [6, с. 13]. В.И. Ширяев продолжил «Широкое распространение нейронных сетей в разных областях вызвано и тем, что во многих случаях формализация процедур решения сложных задач зачастую оказывается либо сложной, либо по каким-либо причинам невозможной» [7, с. 10]. Инструментарий искусственного разума (ИР) – это сфера информатики, которая исследует перспективы разработки умных систем, способных эмулировать познавательные возможности человека, такие как восприятие, обучение, организация, выбор и т.п. Искусственные нейронные сети, или нейросети, представляют собой основной инструмент обработки информации в рамках искусственной интеллектуальности. Не без оснований автор А.И. Галушкин утверждает, что «Теория нейронных сетей является, в настоящее время, самостоятельным направлением науки...» [8, с. 458].

При использовании искусственного разума на базе нейросети в оптимизации систем электроснабжения происходит формирование умной модели сети, способной

изучать и прогнозировать различные характеристики электроэнергетической системы. Это дает возможность быстро принимать решения по улучшению функционирования системы и увеличению энергосбережения.

Одним из применений искусственного интеллекта в оптимизации систем питания является прогнозирование нагрузок на сети систем электроснабжения. С использованием архивных сведений и актуальных факторов нейронная сеть может прогнозировать будущие показатели нагрузок и модифицировать функционирование энергоснабжающей системы, согласно этим показателям. Это дает возможность эффективно контролировать производство и разброс электрической энергии, что в свою очередь приводит к сокращению затрат и увеличению уровня обслуживания клиентов.

Сегодня все большее число энергетических систем применяет возобновляемые источники энергии, такие как солнечная и атмосферная энергия. Тем не менее, эти источники энергии являются изменчивыми и непредсказуемыми, что требует научного подхода и оптимизации функционирования энергетической системы для обеспечения надежного электропитания. Искусственные интеллекты могут приспосабливаться к переменным условиям и принимать решения об оптимальном использовании возобновляемых ресурсов энергии, учитывая не только текущую производительность, но и прогноз спроса на электричество.

Дополнительно, искусственный интеллект, основанный на нейронной системе, может применяться для улучшения функционирования сетей связи. С приближением прогресса информационных технологий и увеличением числа присоединенных аппаратов, нагрузка на сети связи значительно увеличивается. Использование искусственных нейронных сетей дает возможность оптимизировать функционирование сети и распределить поток данных с учетом особенностей применяемых сервисов. Кроме того, нейронные сети способны прогнозировать потенциальные сбои в сети и осуществлять резервное сохранение информации, гарантируя надежность и защищенность работы сетевых систем.

Таким образом, применение искусственного интеллекта на основе нейронных сетей в улучшении систем электропитания имеет огромные возможности для увеличения эффективности и надежности работы энергетических устройств. Использование данной методики дает возможность прогнозировать нагрузки, приспосабливаться к переменным условиям и рационализировать функционирование сетей связи.

Лучшую сходимость результатов решения комплексных задач оптимизации показывают искусственные нейронные сети Хопфилда, используемые для энергоблоков с непрерывной или частично-прерывистой функцией цены топлива.

Большой спрос на нейронные сети породил множество интересных проектов, которые направлены на исследование и распознавание различных видов технической проектной документации, например нейросеть «Konegy». Она способна производить распознавание принципиальных схем с помощью графических технологий. Программа осуществляет подбор компонентов для различных электротехнических устройств, которые имеют разные комбинации. Нейросеть перебирает множество брендов и помимо этого, она рассчитывает стоимость изготовления низковольтных комплектных устройств. То есть, что раньше занимало у проектировщиков несколько дней, теперь решается за несколько минут.

Достоинство, и одновременно недостаток, нейросетей при оптимизации систем электроснабжения в том, что, обладая достаточными знаниями, её можно создать в узком кругу. В основе проектирования нейронных сетей лежат простые, чаще всего однородные элементы или ячейки, которые имитируют процесс согласованной схемы. Имеется риск, что это может быть использовано во вред, поэтому применение нейросетей в системах электроснабжения, с точки зрения безопасности, должно быть ограничено.

### Заключение

Анализ различных источников и литературы позволил установить наиболее перспективные направления в оптимизации систем электроснабжения.

Одним из ключевых методов в улучшении системы электропитания является применение интеллектуальных сетей. Интеллектуальные сети – это сети, оборудованные современными техническими устройствами, позволяющими автоматизировать контроль за электроэнергетическими операциями. Структура таких сетей дает возможность рационализировать раз-

деление электрической энергии, управлять использованием электрических устройств, контролировать и устранять нештатные ситуации в электрической системе. Интеллектуальные сети способствуют улучшению стандарта электропитания и повышению энергоэффективности.

Использование современных техник и подходов в оптимизации системы электрообеспечения играет ключевую функцию в увеличении энергетической эффективности, уменьшении издержек на электричество и усовершенствовании стабильности электрообеспечения. Интеграция умных сетей, приемов энергетического аудита, управляющих систем энергопотребления и возобновляемых энергетических источников позволяет успешно оптимизировать электрическое снабжение и достигать экономии ресурсов и устойчивого развития энергетической отрасли.

### Список литературы

1. Жежеленко И.В., Долгополов В.П., Слепов Ю.В., Хойнов В.И., Оптимизация систем электроснабжения целлюлозно-бумажных предприятий. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Лесная промышленность, 1988. 263 с.
2. Любченко В.Я., Родыгина С.В. Оптимизация систем электроснабжения. Задачи линейного и нелинейного программирования: учебное пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. 90 с.
3. Филиппова Т.А., Сидоркин Ю.М., Русина А.Г. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем: учебник. 2-е изд. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. 356 с.
4. Костюченко Л.П. Имитационное моделирование систем электроснабжения в программе MATLAB: учебное пособие. Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет 2012, 215 с.
5. Надеин В.Ф., Симаков В.Д., Автухов С.С. Моделирование работы серийных статических реле в различных режимах работы электрической сети. Наука XXI века: проблемы академической мобильности исследователя и методологии исследования: материалы I Международной научно-практической конференции «Энергетика и энергоэффективность в условиях геостратегического развития и освоения Арктического региона» (г. Архангельск, 21-22 апреля 2011 г.) / под общ. ред. З.А. Демченко. Архангельск: ИПЦ САФУ, 2012. 460 с.
6. Каллан Р. Нейронные сети: Краткий справочник. М.: Вильямс И.Д., 2017. 288 с.
7. Ширяев В.И. Финансовые рынки: Нейронные сети, хаос и нелинейная динамика. М.: Ленанд, 2019. 232 с.
8. Галушкин А.И. Нейронные сети: основы теории. М.: РиС, 2015. 496 с.

## СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УТИЛИЗАЦИИ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ КОНДЕНСАТОРА ПАРОТУРБИНОЙ УСТАНОВКИ В ТЕПЛОФИКАЦИОННОМ ЦИКЛЕ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

Хвостиков А.С.

*ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»,  
Комсомольск-на-Амуре, e-mail: knastu@list.ru*

В работе представлены результаты расчетов паротурбинных установок с системами утилизации тепловой энергии конденсатора. Целью исследования является определение наиболее рационального метода утилизации низкопотенциальной теплоты конденсатора. Выполнен расчет двух вариантов утилизации низкопотенциального тепла паротурбинной установки паротурбинного и абсорбционного тепловых насосов. Создана модели, действующей на КТЭЦ-2 турбоустановки Т50/55-130, проводили с помощью программы Aspen Hysys, определяющей технико-экономические показатели на основе решения балансовых уравнений. Проведена оценка эффективности работы турбины с этими системами в зависимости от режимных нагрузок. Коэффициент использования топлива растет у абсорбционного насоса быстрее, так как у него коэффициент преобразования теплоты больше, чем у парокompрессионного. Применение тепловых насосов более эффективно для повышения выработки тепловой энергии в условиях ее дефицита. Замена тепловой мощности вырабатываемой в турбоагрегате не дает столь значительного эффекта из-за сокращения выработки на тепловом потреблении. Тепловые насосы позволяют передать низкопотенциальную теплоту циркуляционной воды на теплоснабжение и снизить расход топлива на выработку электроэнергии. Наиболее перспективными в применении являются абсорбционные насосы в связи с низким потреблением электроэнергии. Однако применение абсорбционных тепловых насосов несколько изменяет соотношение отборов пара в турбине, изменяя соотношение пара в разных ее частях. Использование систем утилизации низкопотенциального тепла позволяет повысить эффективность работы теплоэлектростанции за счет более полного использования тепла топлива.

**Ключевые слова:** тепловой насос, низкопотенциальное тепло, энергоэффективность, паротурбинная турбоустановка, конденсатор, теплофикация

## COMPARISON OF THE EFFICIENCY OF UTILIZATION OF LOW-POTENTIAL HEAT OF A STEAM TURBINE CONDENSER IN A HEATING CYCLE USING HEAT PUMPS

Khvostikov A.S.

*Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, e-mail: knastu@list.ru*

The paper presents the results of calculations of steam turbine installations with heat recovery systems of the condenser. The aim of the study is to determine the most rational method of utilization of low-potential heat of the condenser. The calculation of two options for the utilization of low-potential heat of a steam turbine installation of steam turbine and absorption heat pumps has been performed. The creation of a model operating on KTEP-2 of the T50/55-130 turbine unit was carried out using the Aspen Hysys program, which determines technical and economic indicators based on solving balance equations. The efficiency of the turbine with these systems has been evaluated depending on the operating loads. The fuel utilization coefficient increases faster for an absorption pump, since its heat conversion coefficient is higher than that of a compression pump. The use of heat pumps is more effective for increasing the production of thermal energy in conditions of its shortage. Replacing the thermal power generated in the turbine unit does not have such a significant effect due to a reduction in heat consumption. Heat pumps allow you to transfer the low-potential heat of circulating water to heat supply and reduce fuel consumption for electricity generation. Absorption pumps are the most promising in application, due to low energy consumption. However, the use of absorption heat pumps slightly changes the ratio of steam extraction in the turbine by changing the ratio of steam in different parts of it. The use of low-potential heat recovery systems makes it possible to increase the efficiency of a thermal power plant due to a more complete use of fuel heat.

**Keywords:** heat pump, low-potential heat, energy efficiency, steam turbine turbine unit, condenser, heating

### Введение

Одним из определяющих факторов эффективного внедрения утилизации на тепло-технологических объектах является нахождение рациональных конструктивных характеристик и компоновочных решений установок, обеспечивающих высокую эффективность, надежность эксплуатации и полноту утилизации. Повышение эффек-

тивности получения энергии от низкопотенциальных источников теплоты является актуальной задачей, решение которой позволит не только выполнить требования федерального закона, но также производить энергию без первичных энергоресурсов.

Важным показателем повышения эффективности является термический коэффициент полезного действия энергоуста-

новки, зависящий от начальных и конечных параметров пара. Наиболее популярным методом повышения эффективности энергоустановки является повышение начальных параметров пара. При этом значительно возрастает влияние температуры на надежность энергоустановки [1, 2]. Для повышения эффективности можно воспользоваться снижением конечной температуры в конденсаторе за счет более полной утилизации низкопотенциального тепла.

При совместной выработке тепловой и электрической энергии наибольшие потери происходят в конденсаторе, где теряется до 50% тепловой энергии. Использование теплоты конденсатора не представляется возможным вследствие низких температур теплоносителя.

В последние годы набирает популярность использование энергосберегающих технологий на предприятиях энергетики, нефте-, газодобычи и др. Получили популярность системы на основе органического цикла Ренкина, цикла Калины, тепловые насосы различных конструкций. Тепловые насосы по циклам и схемам работы подразделяются на компрессионные (парокомпрессионные и газокompрессорные) и сорбционные (абсорбционные и адсорбционные). Мало распространены системы утилизации низкопотенциальной теплоты, основанные на эффекте Ранка, двойного цикла Ренкина, цикла Стирлинга, цикла Брайтона, цикла Калины, а также термоэлектрические и обращенный топливный элемент. Проведя обзор способов утилизации низкопотенциальной теплоты, можно констатировать, что наиболее перспективными методами являются встраивания, утилизация тепла конденсатора с помощью тепловых насосов [3].

Для определения технико-экономических параметров совместной работы были определены параметры тепловых насосов. По результатам энергетических расчетов были смоделированы процессы теплообмена. Методика моделирования наиболее полно описана в работе [4]. В условиях существующих и вновь проектируемых турбоустановок существует проблема охлаждения конденсаторов в условиях недостатка охлаждающей воды [5]. Для решения этой проблемы возможна установка комплексов утилизирующих низкопотенциальное тепло конденсатора для улучшения показателей турбоустановки.

**Цель исследования** заключается в определении наиболее рационального метода повышения эффективности выработки теплоты и электроэнергии ТЭЦ посредством применения систем утилизации в структуре ТЭЦ для обеспечения тепловой нагрузки потребителя.

#### Материалы и методы исследования

Технико-экономические показатели теплового насоса зависят от параметров теплофикации. Для парокомпрессионного теплового насоса с температурой нагрева системы теплофикации 65°C результаты расчета сведены в таблицу. Для абсорбционного теплового насоса. Абсорбционный тепловой насос наиболее целесообразно проектировать на основе солей бромистого лития [6]. Результатами расчета абсорбционного бромисто-литиевого теплового насоса стали для установки с тепловой мощностью 25 МВт, количество подводимой энергии в генератор из теплофикационного отбора 3049, 482 кВт, утилизируемая низкопотенциальная теплота в конденсаторе 2371,54 кВт, кратность циркуляции раствора 6,48.

Характеристики схем включения ТНУ

Характеристика	Режим загрузки		
	Номинальный	частичная 1	частичная 2
Теплопроизводительность, МВт	14,258	10,184	8,147
Холодопроизводительность, МВт	11,3	8,5	6,9
Расход хладагента, кг/с	11,57	8,26	6,59
Максимальная температура сжатия/температура конденсации, °С	154/70	130/60	1119/55
Давление сжатия перед конденсатором, МПа	3,3	2,6	2,3
Удельная работа компрессора, кДж/кг	253	204	183
Коэффициент трансформации	3,7	4,6	5,1
Энергетическая мощность компрессора, МВт	3,853	2,217	1,587
КПД ТНУ	0,525	0,532	0,524

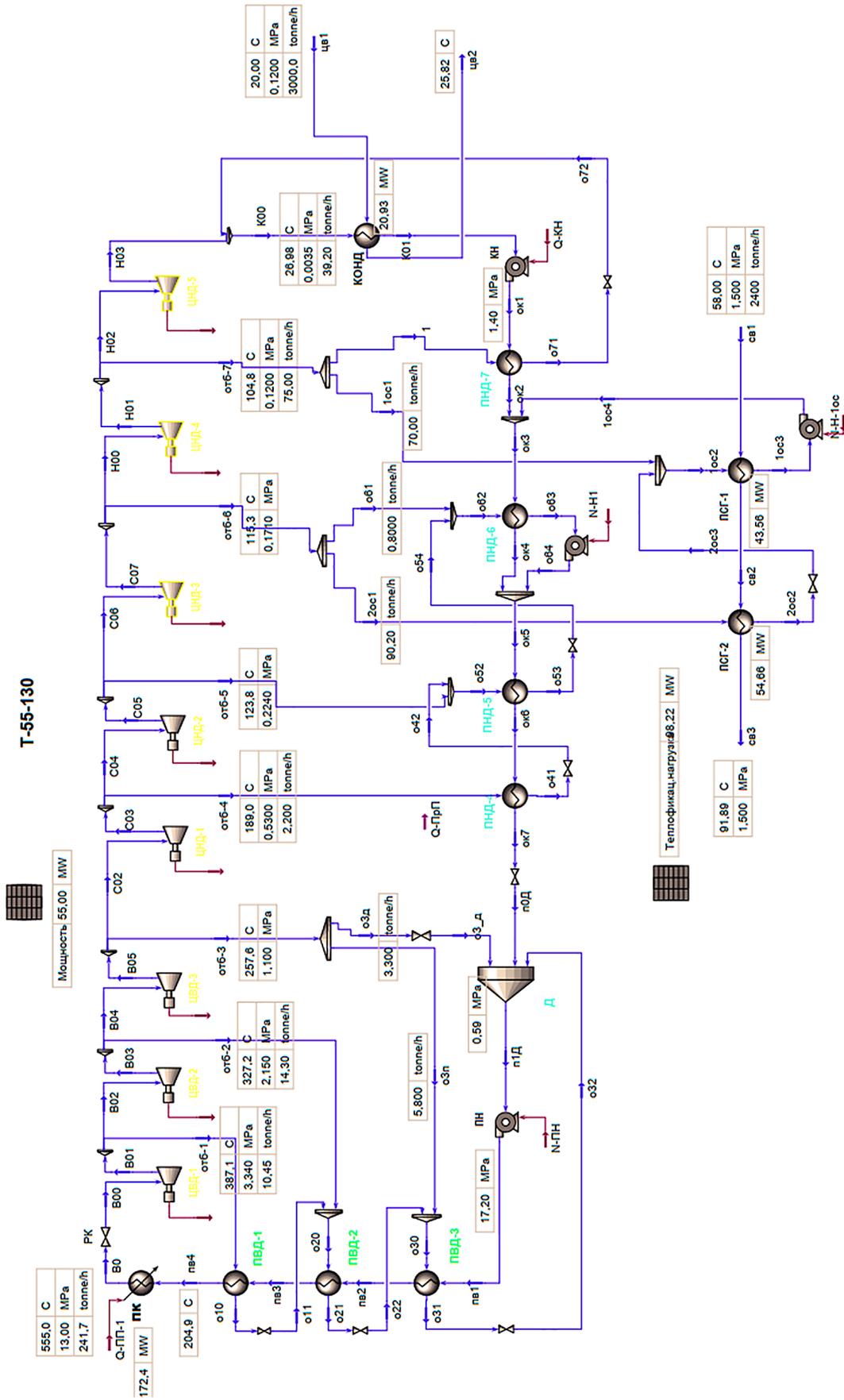


Рис. 1. Тепловая схема турбоустановки Т-50/55-130

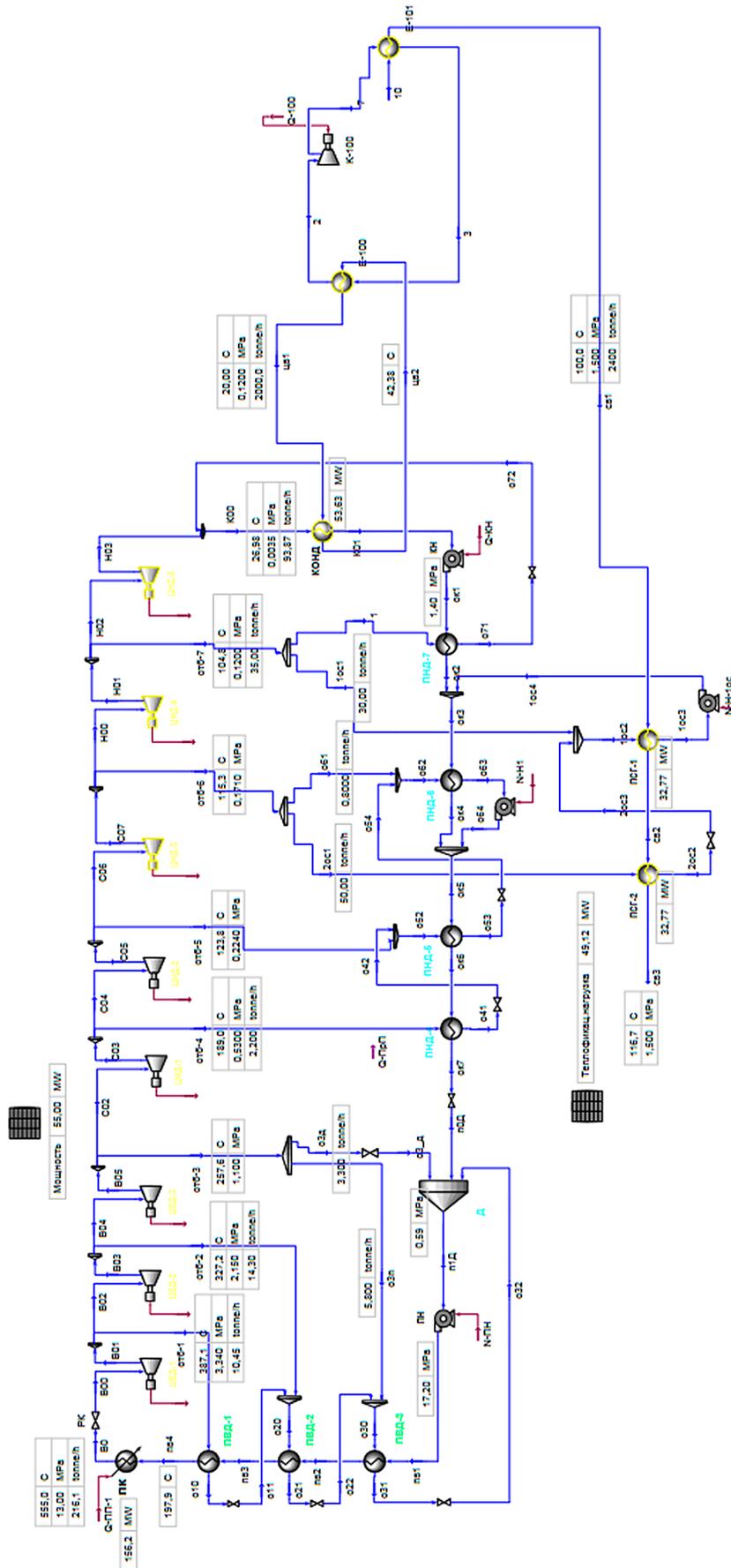


Рис. 2. Модель технологического цикла ТНУ в схеме турбины Т-50/55-130 в ПК Aspen Hysys

Создание модели, действующей на КТЭЦ-2 турбоустановки Т50/55-130, проводили с помощью программы Aspen Hysys. На начальном этапе исследования были заданы компоненты установки и произведена настройка пакета свойств, построена топология всех потоков турбоустановки со всеми входящими в ее состав элементами. Тепловая схема турбоустановки Т50/55-130 показана на рис. 1. Проведена настройка параметров турбоустановки и расчет этих параметров.

На следующем этапе нам необходимо:

- описать фазовое равновесие и свойства системы компонентов;
- определиться с логикой внешних и внутренних потоков турбоустановки;
- определиться со спецификациями турбоустановки.

Задаем параметры рабочего тела, в нашем случае это пар с температурой 555°C, давление 13,0 МПа. Так же задаются параметры по отборам турбоустановки. Задавая расход перегретого пара, получаем номинальную мощность турбоагрегата 55 МВт.

При номинальном режиме работы турбоустановки с включенной теплофикацией получаем параметры отборов пара. В параметрах отбора задаем давление и расход пара, требуемый для подогрева питательной воды и основного конденсата до требуемых температур. Остальные параметры считаются по балансовым уравнениям энергетических потоков [7, 8].

Создание модели турбоустановки с пароконденсационным тепловым насосом ПКТН в программе Aspen Hysys не имеет отличия от создания модели турбоустановки без теплового насоса.

В систему охлаждения конденсатора добавляем контур с теплообменником пароконденсационного теплового насоса, способного, забирая тепло циркуляционной воды на выходе из конденсатора турбины, повысить ее температуру и передать ее сетевой воде на входе в ПСГ-1 [9]. Модель технологического цикла турбоустановки с ПКТН, рассчитанная в программе Aspen Hysys, представлена на рис. 2.

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

Тепловые насосы при разных режимах работы дают разные показатели эффективности: так, АБТН дает большее значение КПД при большей тепловой нагрузке, а ПКТН показывает лучшие показатели при меньшей тепловой нагрузке.

При использовании пароконденсационного теплового насоса расходуется электрическая энергия на привод компрес-

сора, и, следовательно, удельный расход на выработку электроэнергии значительно увеличивается. В абсорбционном режиме зависимости не столь значительны. В качестве показателей эффективности выбран коэффициент полезного действия по производству электроэнергии, расход пара на производство электрической и тепловой энергии (рис. 3) и коэффициент использования топлива (рис. 4).

КПД по производству электроэнергии представляет собой соотношение произведенной электрической энергии к затратам энергии на ее производство. КПД по выработке электрической энергии у абсорбционного теплового насоса (АБТН) растет, вследствие увеличения выработки электрической энергии на тепловом потреблении. У пароконденсационного же, наоборот, падает из-за потребления электрической энергии на привод компрессора теплового насоса и низменном тепловом потреблении. Значительные расходы электричества на привод компрессора теплового насоса делают применение малоэффективным.

На рис. 3 видим, что при увеличении тепловой нагрузки ПКТН увеличивается удельный расход пара на выработку одного кВт час электроэнергии, а у АБТН удельный расход пара на выработку одного кВт час электроэнергии не меняется от нагрузки теплофикационной установки турбоагрегата.

Удельный расход пара на производство электроэнергии у АБТН остается практически неизменным. Расход пара, идущий на тепловой насос, учитывается как тепловое потребление и мало влияет на показатели энергоэффективности производства электрической энергии. У ПКТН выработка электрической энергии уменьшается из-за затрат на собственные нужды и показатели производства электрической энергии ухудшаются (рис. 3).

Коэффициент использования топлива растет у абсорбционного насоса быстрее, так как у него коэффициент преобразования теплоты больше, чем у пароконденсационного. Коэффициент использования топлива у ПКТН выше при нагрузке 50 МВт по сравнению с АБТН при такой же тепловой нагрузке насоса.

Тепловые насосы позволяют передать низкопотенциальную теплоту циркуляционной воды на теплоснабжение и снизить расход топлива на выработку электроэнергии. Использование ТНУ для утилизации теплоты оборотного водоснабжения приводит к снижению расхода пара теплофикационного отбора, что дает значимую экономию топлива.

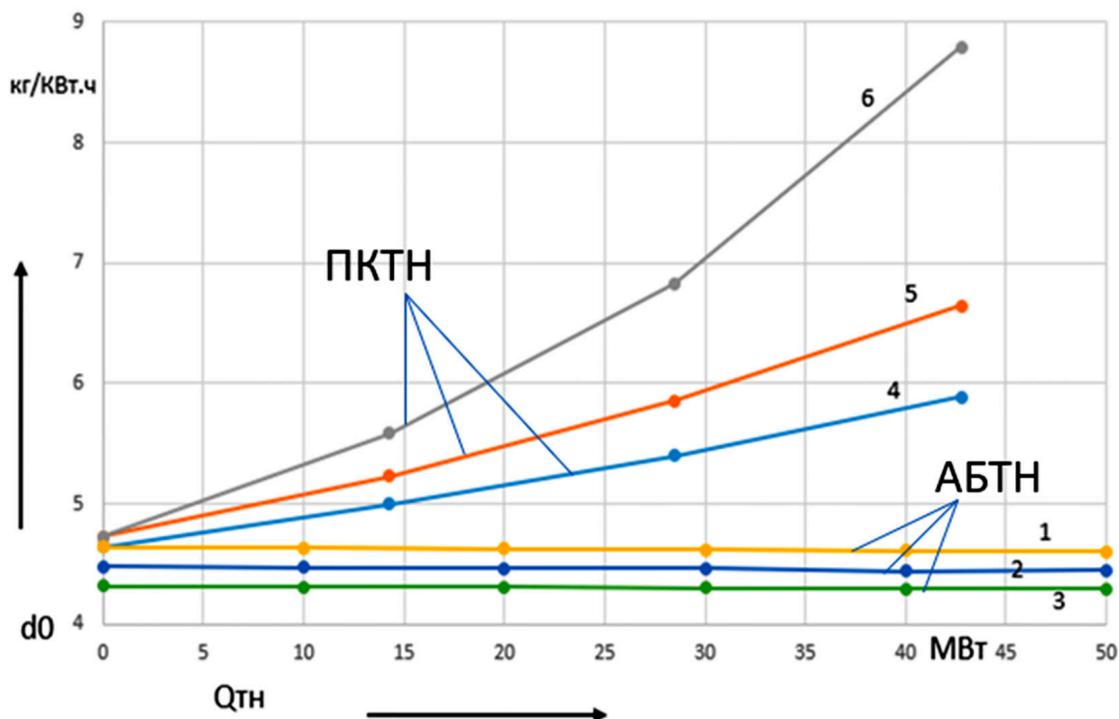


Рис. 3. Сравнение зависимостей удельного расхода пара на выработку 1 кВт час от тепловой нагрузки тепловых насосов: 1 – тепловая нагрузка АБТН 100 МВт; 2 – тепловая нагрузка АБТН 80 МВт; 3 – тепловая нагрузка АБТН 50 МВт; 4 – тепловая нагрузка ПКТН 100 МВт; 5 – тепловая нагрузка ПКТН 80 МВт; 6 – тепловая нагрузка ПКТН 50 МВт

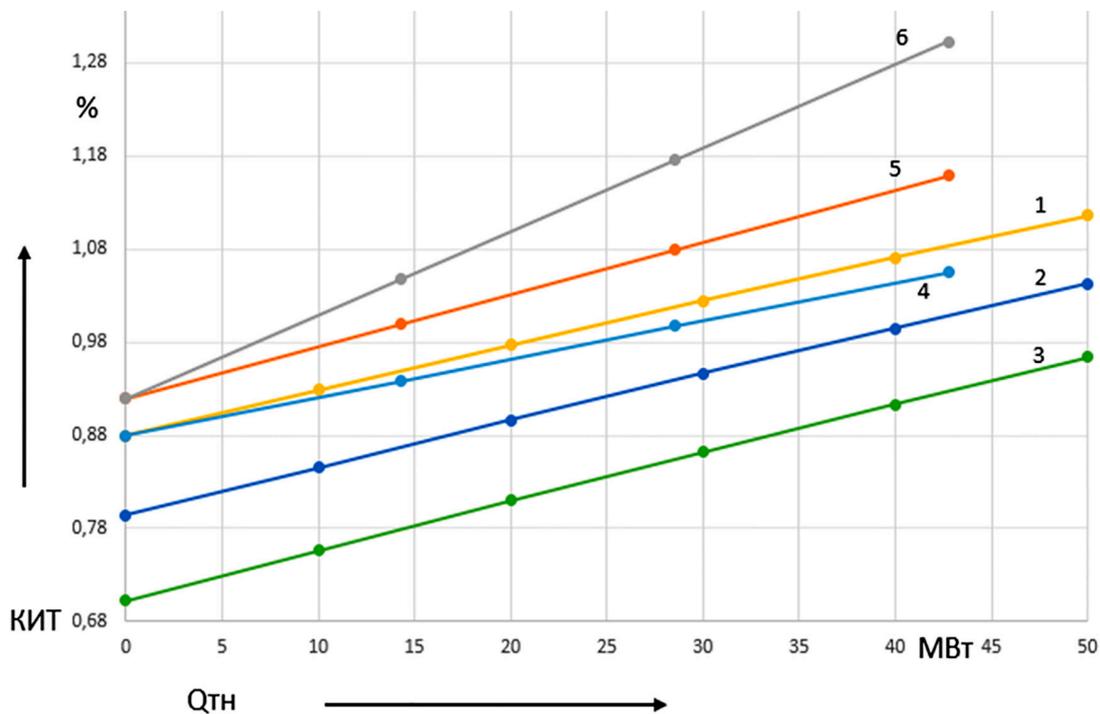


Рис. 4. Сравнение зависимостей коэффициента использования топлива от нагрузки тепловых насосов: 1 – тепловая нагрузка 100 МВт с АБТН; 2 – тепловая нагрузка АБТН 80 МВт; 3 – тепловая нагрузка АБТН 50 МВт; 4 – тепловая нагрузка 100 МВт с ПКТН; 5 – тепловая нагрузка 80 МВт и электрическая нагрузка 40 МВт ПКТН; 6 – тепловая нагрузка ПКТН 50 МВт

### Заключение

По результатам работы можно сделать вывод о целесообразности применения тепловых насосов на ТЭЦ. Наибольшее количество теплоты на электростанции утилизируется в конденсаторе. Утилизация теплоты конденсатора позволяет снизить тепловую нагрузку турбоустановки, повысить коэффициент использования топлива и увеличить КПД. Применение тепловых насосов дает повышение показателей эффективности при увеличении теплового потребления. При замене выработки теплового потребления с теплофикационных отборов на тепловой насос в энергоустановке происходит снижение выработки энергии на тепловом потреблении, и показатели эффективности падают.

Большой прирост показателей эффективности дает абсорбционный тепловой насос, поскольку он для производства тепловой энергии использует тепло отборов турбины. При использовании парокompрессионных тепловых насосов не требуется использования пара отборов турбоустановки, но при этом для работы компрессора затрачиваются значительные объемы электроэнергии. Электрическая энергия – конечный продукт электрической станции, вследствие чего более дорогой, и использование ее для производства тепловой энергии нецелесообразно.

Тепловой насос позволяет более эффективно охлаждать конденсатор, что приведет к равномерному и постоянному температурному режиму. Замкнутая система охлаждения конденсатора турбоустановки с тепловым насосом исключает возможность загрязнения конденсатора органическими веществами, примесями и отложениями. Так же снижается количество выбросов

вредных примесей в окружающую среду, как при оборотном водоснабжении.

### Список литературы

1. Шаломов В.И. Численное исследование эффективности замещающей турбины с повышенной температурой свежего пара для технического перевооружения турбоустановок семейства Т-100 // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 5 (53). С. 11–18.
2. Шаломов В.И. Оценка эффективности применения повышенных докритических начальных параметров пара для теплофикационного энергоблока мощностью 200–250 МВт // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2020. № 5 (45). С. 4–11.
3. Курнакова Н.Ю., Нуждин А.В., Волхонский А.А. О возможности повышения энергоэффективности тепловой схемы ТЭС с применением теплового насоса // iPolytech Journal. 2018. № 7. С. 114–122.
4. Ким К.К., Просолович А.А., Иванов С.Н. Алгоритм CFD-моделирования процесса теплопереноса в совмещенном электротехническом устройстве // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2020. № 3 (43). С. 65–72.
5. Шаломов В.И. Предварительный анализ эксплуатационных показателей паротурбинных установок новой Советско-Гаванской теплоэлектроцентрали // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2023. № 3 (67). С. 28–34.
6. Гришкова А.В., Нечаев А.В. Применение абсорбционных тепловых насосов на паротурбинных ТЭЦ // Молодежный научный вестник. 2018. № 6. С. 119–127.
7. Андрианов И.К. Построение обобщенного критерия оптимизации конкурирующих параметров тепловой защиты оболочечных элементов в условиях теплового и силового нагружения // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 1 (49). С. 4–9.
8. Андрианов И.К. Численная модель многокритериальной оптимизации тепловой защиты оболочечных элементов в условиях теплового и силового нагружения // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 3 (51). С. 14–20.
9. Фецов С.С. О моделировании нестационарного охлаждения пористых саморазогревающихся объектов методом конечных объемов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 5 (53). С. 52–54.

## НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ

УДК 664.8.022

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КАТАЛИТИЧЕСКОГО  
ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ  
ПЛОДООВОЩНОГО СЫРЬЯ. ОБЗОР ПРЕДМЕТНОГО ПОЛЯ****Бурак Л.Ч., Востриков А.В.***ООО «БЕЛПРОСАКВА», Минск, e-mail: leonidburak@gmail.com, info@belrosakva.by*

Инфракрасная технология широко используется на многих предприятиях по переработке фруктов и овощей из-за ее универсальности, обеспечивающей равномерный нагрев, высокую эффективность теплопередачи и минимальное повреждение тканей фруктов и овощей. Цель исследования – критический анализ и обобщение результатов научных исследований по применению каталитического инфракрасного излучения при переработке фруктов и овощей. В качестве материалов исследования послужили научные статьи, опубликованные в период с 2005 по 2024 гг. Научный поиск релевантной литературы осуществлялся через научные базы данных, такие как Scopus, Web of Science и РИНЦ, а также с использованием системы Google Scholar. Исследование включало работы, опубликованные на английском и русском языках. Систематический обзор результатов исследований был проведен согласно критериям PRISMA 2020. Отбор источников для анализа реализовался по следующим ключевым словам: «каталитическое инфракрасное излучение», «качество», «пищевая ценность», «бланширование», «очистка овощей и фруктов», «сушка плодоовощного сырья», «инактивация ферментов», «микробиологическое загрязнение». Среди статей, соответствующих критериям включения, для составления данного обзора было выбрано 50 исследований. В результате анализа результатов научных исследований установлено, что в настоящее время метод каталитического инфракрасного нагрева разработан и эффективно внедрен на различных технологических процессах переработки плодоовощного сырья. Изучены физико-химические свойства и основные механизмы каталитического инфракрасного излучения, а также его использования в технологических процессах обработки фруктов и овощей, такими как бланширование, очистка, обеззараживание и сушка. Метод каталитического инфракрасного излучения, по сравнению с традиционным электрическим инфракрасным нагревом, работает на природном или сжиженном газе, что позволяет повысить термический коэффициент полезного действия и при этом значительно снизить энергоемкость процесса. Следует отметить, что метод каталитического инфракрасного излучения более энергоэффективен и экологичен, чем традиционный метод инфракрасного нагрева, он может значительно повысить эффективность обработки, улучшить фитохимическое содержание и качество продукции, а также снизить загрязнение окружающей среды и потери сырья. Несмотря на то, что было проведено значительное количество научных исследований по использованию технологии каталитического инфракрасного излучения при переработке фруктов и овощей, остается ряд ограничений для его широкого промышленного внедрения. Поэтому необходимы дальнейшие исследования для углубленного анализа технологии каталитического инфракрасного излучения и ее применения в промышленном производстве.

**Ключевые слова:** фрукты, овощи, инфракрасное излучение, качество, пищевая ценность бланширование, очистка, сушка, инактивация ферментов, микробиологическая обсемененность

**USING CATALYTIC INFRARED RADIATION TECHNOLOGY  
IN PROCESSING FRUIT AND VEGETABLE RAW MATERIALS.  
A SUBJECT FIELD REVIEW****Burak L.Ch., Vostrikov A.V.***BELROSAKVA LLC, Minsk, e-mail: leonidburak@gmail.com, info@belrosakva.by*

Infrared technology is widely used in many fruit and vegetable processing plants due to its versatility in providing uniform heating, high heat transfer efficiency and minimal damage to fruit and vegetable tissue. The purpose of the study is to critically analyze and summarize the results of scientific research on the use of catalytic infrared radiation in the processing of fruits and vegetables. The research materials were scientific articles published between 2005 and 2024. The scientific search for relevant literature was carried out through scientific databases such as Scopus, Web of Science and RSCI, as well as using the Google Scholar system. The study included works published in English and Russian. A systematic review of research results was carried out according to the PRISMA 2020 criteria. The selection of sources for analysis was carried out using the following keywords: "catalytic infrared radiation", "quality", "nutritional value", "blanching", "cleaning of vegetables and fruits", "drying of fruits and vegetables" raw materials", "enzyme inactivation", "microbiological contamination". Among the articles that met the inclusion criteria, 50 studies were selected for this review. As a result of the analysis of the results of scientific research, it was established that at present the method of catalytic infrared heating has been developed and effectively implemented in various technological processes for processing fruit and vegetable raw materials. The physicochemical properties and basic mechanisms of catalytic infrared radiation, as well as its use in technological processes for processing fruits and vegetables, such as blanching, cleaning, disinfection and drying, have been studied. The catalytic infrared radiation method, compared to traditional electric infrared heating, operates on natural or liquefied gas, which allows to increase the thermal efficiency and at the same time significantly reduce the energy intensity of the process. It should be noted that the catalytic infrared heating method is more energy efficient and environmentally friendly than the traditional infrared heating method, it can greatly improve the processing efficiency, improve the phytochemical content and product quality, and reduce environmental pollution and raw material loss. Although a significant amount of scientific research has been conducted on the use of catalytic infrared technology in fruit and vegetable processing, several limitations remain for its widespread industrial implementation. Therefore, further research is needed to in-depth analyze catalytic infrared technology and its application in industrial production.

**Keywords:** fruits, vegetables, infrared radiation, quality, nutritional value blanching, drying, enzyme inactivation, cleaning, microbiological contamination

### Введение

Инфракрасное (ИК) излучение – это электромагнитные волны, которые находятся между видимым светом и микроволнами и охватывают диапазон от 0,78 до 1000 мкм. В зависимости от длины волны ИК-диапазон делится на три области: ближнюю ИК (0,78–1,4 мкм), среднюю ИК (1,4–3,0 мкм) и дальнюю ИК (3,0–1000 мкм) [1]. Ближний ИК-диапазон обычно используется в пищевой промышленности для неразрушающего контроля сырья и готовой продукции, тогда как средний и дальний ИК-диапазон используются в пищевой промышленности для нагрева и сушки фруктов и овощей. Во время ИК-нагрева энергия может быстро передаваться от излучателя к продуктам питания в виде волн без нагрева окружающей среды, что снижает потери тепла и сводит к минимуму ухудшение качества продукта, что еще больше сокращает время обработки и затраты на электроэнергию. Эффективность ИК-нагрева в основном зависит от того, насколько материал поглощает ИК-излучение; чем больше поглощение ИК-излучения, тем эффективнее нагрев. Когда длины волн излучателя совпадают с длинами волн нагретого материала, генерируемая ИК-энергия может быть максимально поглощена, вызывая резонанс и трение между молекулами материала, что приводит к повышению его температуры [2]. Поглощение ИК-энергии варьируется в зависимости от сырья или пищевых продуктов из-за различий в составе, структуре и форме. Диапазон поглощения каждого материала по существу представляет собой комбинацию ИК-спектров поглощения его компонентов. Примечательно, что вода демонстрирует три отчетливых пика поглощения в среднем и дальнем ИК-диапазоне (3,0, 4,7 и 6,0 мкм), что делает ИК-излучение приемлемым методом для обработки свежих фруктов и овощей с высоким содержанием влаги по сравнению с другими методами обработки, такими как сушка горячим воздухом (СГВ) [2]. Большинство исследований, связанных с ИК-обработкой фруктов и овощей, были сосредоточены на дальнем ИК-излучении из-за совпадения длин волн поглощения воды и органических соединений, которые преобладают в плодоовощном сырье. Однако в последнее десятилетие начали изучать применение короткого и среднего ИК-диапазона, которые обеспечивают более глубокое проникновение и более высокую частоту излучения [3, 4]. Большинство ИК-технологий используют электричество в качестве источника энергии для нагрева, предлагая преимущества высокой эффективности нагрева, про-

стой конструкции оборудования и простоты эксплуатации, что широко применяется в пищевой промышленности [2]. Однако его энергопотребление относительно выше, чем у каталитического ИК (КИК), где источником энергии является газ. Кроме того, керамическое ИК – это еще один тип ИК-метода, в котором керамические материалы используются в качестве резистивного проводника для нагрева, что может эффективно предотвратить перегрев проводника и продлить срок его службы [5]. В целом керамические ИК-излучатели обладают высокой излучающей способностью и могут работать в широком диапазоне температур, однако глазурь керамики склонна к плавлению при высоких температурах во время работы, а керамика подвержена разрушению при ударе, что ограничивает ее использование [2]. В отличие от них все большее внимание привлекает КИК-нагрев, новая технология, использующая природный газ или пропан для выработки тепловой энергии посредством окислительных реакций в присутствии кислорода под действием катализаторов [2]. Учитывая, что энергия преобразуется напрямую из природного газа, устройства КИК значительно эффективнее используют энергию по сравнению с электрическим оборудованием (ЭИК) [6]. Диапазон длин волн, генерируемых КИК, составляет 3–8 мкм, охватывая три пика поглощения воды, что позволяет быстро удалить влагу из пищевых продуктов и сократить время обработки. До внедрения в пищевой промышленности метод КИК широко использовался в таких отраслях, как текстильная, автомобильная, деревообрабатывающая и электронная [7]. Многие из ранее опубликованных научных обзоров в основном сосредоточены на общих аспектах ИК-нагрева. Поэтому, **цель данного исследования** – критический анализ результатов научных исследований за последние десятилетия использования метода каталитического инфракрасного излучения (КИК) при переработке фруктов и овощей. В данной статье представлен анализ и основные механизмы метода КИК, как отдельно, так и в сочетании с другими методами обработки различных видов плодоовощного сырья, такими как бланширование, сушка, жарка, очистка и инактивация микрофлоры.

### Материалы и методы исследования

Для анализа применения каталитического инфракрасного нагрева при переработке плодоовощного сырья был проведен обзор научных публикаций и электронных ресурсов за период с 2005 по 2024 годы. Поиск релевантной литературы осуществ-

влялся через научные базы данных, такие как Scopus, Web of Science и РИНЦ, а также с использованием системы Google Scholar. Исследование включало работы, опубликованные на английском и русском языках. Систематический обзор результатов исследований был проведен согласно критериям PRISMA 2020 [8, 9]. Отбор источников для анализа реализовался по следующим ключевым словам: “catalytic infrared radiation”, “quality”, “nutritional value”, “blanching”, “cleaning of vegetables and fruits”, “drying of fruit and vegetable raw materials”, “enzyme inactivation”, “microbiological contamination”, «каталитическое инфракрасное излучение», «качество», «пищевая ценность», «бланширование», «очистка овощей и фруктов», «сушка плодоовощного сырья», «инактивация ферментов», «микробиологическое загрязнение». Критерии включения для статей, подлежащих анализу:

1. Статья написана в период 2005–2024 гг;
2. Статья соответствует теме исследования;
3. Типы анализируемых статей – оригинальные исследовательские статьи, обзорные статьи, краткие отчеты.

Критерии исключения для статей, подлежащих анализу:

1. Статья не соответствует теме данного обзора: не касается тематики использования технологии каталитического инфракрасного нагрева при обработке плодов и овощей;
2. Статья написана не на английском языке, статья на русском языке не входит в РИНЦ;
3. Содержание статьи дублируется. Если из разных баз данных или разных электронных библиотечных систем были извлечены повторяющиеся источники, их классифицировали только один раз

### **Результаты исследования и их обсуждение**

В результате проведенного научного поиска и анализа результатов научных исследований установлено, что в настоящее время метод каталитического инфракрасного нагрева разработан и эффективно внедрен на различных технологических процессах переработки плодоовощного сырья. Краткий обзор использования КИК при переработке фруктов и овощей представлены в таблице.

#### **1. ОБРАБОТКА КАТАЛИТИЧЕСКИМ ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ПЛОДООВОЩНОГО СЫРЬЯ**

##### ***1.1. Каталитическое инфракрасное бланширование***

Бланширование – одна из основных операций предварительной обработки перед

сушкой, консервированием или замораживанием фруктов и овощей. Бланширование горячей водой (БГВ) и бланширование острым паром (БОП) обычно используются для предварительной обработки фруктов и овощей в пищевой промышленности. Хотя эти методы экономически эффективны и просты в эксплуатации, они все же имеют и некоторые недостатки. Например, они могут привести к потере водорастворимых питательных веществ, длительному времени обработки и низкой энергоэффективности [31, 32]. Являясь энергосберегающим и эффективным методом нагрева, КИК может в значительной степени снизить негативное влияние температуры процесса бланшировки на пищевую ценность и качество плодовоовощного сырья.

##### ***1.1.1 Инактивация ферментов***

Основная цель процесса бланширования – инактивировать в пищевом сырье эндоферменты, такие как полифенолоксидаза (ПФО), пероксидаза (ПОД) и каталаза, которые отвечают за потемнение пищевых продуктов и выделение неприятных запахов во время обработки и хранения. Среди этих эндоферментов ПОД был идентифицирован как один из наиболее термостойких ферментов во фруктах и овощах и, следовательно, может использоваться в качестве индикатора для оценки эффективности обработки бланшированием [33-35]. Основным преимуществом КИК-бланширования (КИКБЛ) является его способность за короткий период времени инактивировать ферменты во фруктах и овощах благодаря быстрому и равномерному процессу нагревания. Результаты исследований показали, что КИК значительно снижает активность эндоферментов фруктов и овощей. Так в ходе исследования было изучено влияние КИКС и сушки горячим воздухом (СГВ) на ферментативную активность ломтиков банана при различных температурах [13]. Результаты показали, что процесс КИКС инактивировал большую часть ПФО в течение первых 20 минут, тогда как обработка горячим воздухом (ГВ) активировала фермент на начальном периоде, где все время инактивации превышало 180 минут. Предполагается, что это может быть связано с тем, что длина волны КИК соответствует пикам поглощения воды и белка, тем самым способствуя передаче тепла от поверхности к внутренней части ломтиков банана, что способствует денатурации ПФО. Chen J. с соавторами исследовали предварительную обработку ломтиков моркови вакуумным КИК, установив, что активность ПОД в ломтиках моркови снижалась примерно до 25% в течение 150 с. [11].

## Краткий обзор использования КИК при переработке фруктов и овощей

Обрабатываемое сырье	Метод обработки	Цель процесса обработки	Параметры обработки	Полученные результаты	Источник
Сладкий картофель	КИК бланширование на конвейерной ленте	Инактивация ферментов Удаление влаги Сохранение цвета и питательных веществ	Толщина: 3 мм расстояние КИК: 12 см скорость: 0,16 м/мин.	При достижении 90% инактивации ПОД образцы были более твердыми, чем образцы после БВ (1812,0 > 433,9 г), с меньшим разрушением клеток и лучшими показателями качества (сохранение витамина С: 54,30–75,16% > 40,72–45,36%). Сохранение β-каротина и общее содержание фенола составило: 78,34%, 7,41, 1690,4 г, 75,16%, 133,49% и 1,03 мг/г соответственно.	[10]
Морковь	КИК бланширование на конвейерной ленте	Инактивация ферментов, удаление влаги. Сохранение цвета и питательных веществ	Расстояние: 70 мм, мощность: 552 Вт, время: 110 с, температура 80°C, продолжительность 45 мин.	По сравнению только с БОП, время высухания сократилось на 45,0%, а цвет стал более ярким, хрустящая консистенция, а остаток ПОД меньше. Содержание витамина С было на 19,03% выше, чем в образцах, обработанных БПП.	[11]
Зелёный чай	КИК сушка	Инактивация ферментов, удаление влаги. Сохранение цвета и питательных веществ	Расстояние 20см, время 150 с	ПФО инаktivирована на 90%, удалено 45% воды, необходимое время сушки меньше по сравнению с СГВ, сохранение витамина С (0,3214 > 26,79 мг/мл) и содержание полифенолов (93,1% > 26,79%) а также выше чем контрольных образцах	[12]
Бананы	КИКС сушка	Инактивация ферментов, удаление влаги. Сохранение цвета и питательных веществ	Толщина 5 мм, температура 60° С	Обработка КИКС имеет более высокую скорость высухания (время достижения необходимой температуры: 2 < 108 мин)	[13]
Картофель (картофельные чипсы)	КИК-бланширование и сушка	Влияние КИК бланширования и сушки на содержание масла, улучшение вкусовых качеств	Расстояние КИКБЛ бланширования 9,5 см, время : 180 с. Расстояние КИКС: 21,5 см, время 120 с Толщина: 9 мм, температура КИКБЛ: 146, 160 и 174°C. Время КИКБЛ: 7 мин	Общее содержание масла в образцах, обработанных КИК снизилось более чем на 13,79%, а результаты органолептической оценки были лучше, чем при БВ	[14].
			Толщина: 9,43 мм, время КИКБЛ: 200 с Толщина: 0,8 мм, время КИКБЛ: 150 с. Расстояние КИКБЛ: 9,5 см время: 330 с. Расстояние: 21,5 см	В образцах, обработанных КИК, общее содержание масла снизилось на 30–37,5%, сократилось необходимое время жарки (11,42–14,13 < 18,16–20,27 мин), снизилось содержание воды (57,76–60,96% < 59,13–63,89%) и образцы были вкуснее. Образцы КИКБЛ имеют более низкое содержание масла (5% < 20%), чем образцы БГВ при аналогичном энергопотреблении. После обработки КИК-образец толщиной 0,8 мм имеет более высокую хрупкость (98,79 ± 23,13 Н), меньшее содержание воды (3,85% ± 0,36%) и лучший вкус (сенсорная оценка: 15) по сравнению с образцами другой толщины.	[15].
					[16]
					[17]

Продолжение табл.

Обрабатываемое сырье	Метод обработки	Цель процесса обработки	Параметры обработки	Полученные результаты	Источник
Ядра миндаля	КИК-обеззараживание	Снижение микробиологической обсемененности Сохранение пищевой ценности	Интенсивность КИК: 5458 Вт/м <sup>2</sup> , время: 30–45 с. Продолжительность обработки: 60 мин.	КИК-нагрев с последующей выдержкой при высокой температуре позволил добиться более чем 7,5-логарифмического снижения количества <i>Salmonella enteritidis</i> по сравнению с образцами, обработанными только КИК (0,63, 1,03 и 1,51 log).	[18]
Виноградные косточки	КИК-обеззараживание	Снижение микробиологической обсемененности Сохранение пищевой ценности	Время КИК: 98 с, температура КИК: 75°C. Время выдержки: 60 мин.	Общее количество бактерий в виноградных косточках, обработанных КИК, снизилось до 1,66 log КОЕ/г, что на 43,14% и 65,99% ниже, чем в невыдержанных и необработанных косточках, а выход масла 10,39% (дб), что на 46,96% выше, чем у необработанных образцах	[19]
Грибы шиитаке	КИК-обеззараживание	Снижение микробиологической обсемененности Сохранение пищевой ценности	Температура 70°C, время: 10,8–15,2 мин. Скорость подачи: 38–50 кг/ч. Температура выдержки: 70°C. Время выдержки: 30–60 мин.	Общее количество плесени составляло менее 2 log КОЕ/г образцов, обработанных КИК, и за это время влажность снижена на 2,2–6,0%	[20]
Шпинат	КИК-обеззараживание	Снижение микробиологической обсемененности	Время КИК: 180 с, температура выдержки 70°C, время выдержки: 45 мин.	Общее количество бактерий после обработки КИК составило $1,98 \pm 0,05 \log$ , $\Delta E$ составило $5,17 \pm 0,83$ , а содержание содержания хлорофилла составила 84,62%.	[21]
Томаты	КИК-очистка от кожуры	Очистка от кожуры, снижение потерь мякоти	Время нагрева пламени: 10 с. Температура нагрева пламени: 350°C. Время КИК: 4 мин Время КИК: 30–75 с	Обработка Flame-CIR (КИК) обеспечила более высокое удержание содержания целлюлозы, гемицеллюлозы, пектина и ликопина (53,73 мг/кг), чем образцы, обработанные БГВ (91,67%, 94,08%, 98,66% > 67,75%, 74,52%, 84,89%). По сравнению с ЦО, КИК-очистка способствует лучшему отслаиванию и имеет меньшие потери (8,3–13,2% < 13,2–15,8%), меньшую толщину кожуры (0,39–0,91 < 0,85–1,06 мм) и более плотную текстуру продукта (10,30–19,72 > 10,59–12,65 Н), чем образцы, обработанные ЦО	[22]
Томаты черри	КИК-очистка от кожуры	Очистка от кожуры, снижение потерь мякоти	Расстояние КИК 30 см, время 3 мин.	По сравнению с БОП и ЦО очистка КИК оказывает лучший эффект очистки томатов черри, а также снижается потеря мякоти (соотношение качества кожицы и мякоти: 7,68%)	[24]

Окончание табл.

Обрабатываемое сырье	Метод обработки	Цель процесса обработки	Параметры обработки	Полученные результаты	Источник
Грецкие орехи	КИК в сочетании с другими технологиями сушки	Сокращение времени сушки. Инактивация ферментов Сохранение цвета и питательных веществ Уничтожение микробов	Расстояние 30 см. Температура КИК: 300, 400°C. Скорость движения ролика: 1,5, 2,0 об/мин., время: 22,5 мин. Температура СГВ: 43°C, скорость воздуха: 3 м/с, время сушки воздухом 14 часов	По сравнению с СГВ, масло грецкого ореха, обработанное КИК, имело на 28,85% более низкое кислотное число и на 20% более низкое перекисное число, а также содержания полифенолов на 10,92% было выше.	[25]
Миндаль	КИК в сочетании с другими технологиями сушки		Время КИК: 1 час, температура 70°C. Время выдержки 2 ч, Время СГВ 2 ч	По сравнению с СГВ время сушки КИК меньше на 2 часа, перекисное число масла увеличилось ( $1,34 > 0,57$ Мэкв/кг), а количество <i>Enterococcus faecium</i> снизилось на $1,52 \pm 0,31 \log$ КОЕ/продукт.	[26]
Фисташки	КИК в сочетании с другими технологиями сушки	Сокращение времени сушки, инактивация ферментов, уничтожение микробов. Сохранение цвета и питательных веществ	Время КИК: 2 ч., температура выдержки 70°C. Время – 2 ч.	Снижение содержания <i>E. faecium</i> в ядре и скорлупе составило 6,1 и 5,41 log КОЕ/г соответственно. Время сушки было сокращено на 40 минут по сравнению с СГВ, при конечном содержании влаги 9%.	[27]
Бананы	КИК в сочетании с другими технологиями сушки	Сокращение времени сушки	Мощность: 4000 Вт/м <sup>2</sup> , толщина: 5 мм, время КИК 10 мин.	Обработка КИК сократила время сушки на 2 часа по сравнению с обычной сублимационной сушкой.	[28]
Клубника	КИК в сочетании с другими технологиями сушки	Сокращение времени сушки	Толщина: 4 мм, мощность КИК 3000, 4000 и 5000 Вт/м <sup>2</sup> . КИК сушка до снижения веса на 30%, 40% и 50%. Субли. сушка до влажности 5%.	Обработка КИК сокращает время сушки на 42% (предварительное обезвоживание до 40%) по сравнению с обычной сублимационной сушкой, обеспечивая при этом лучший цвет, хрупкость и усадку.	[29]
Морковь	КИК в сочетании с другими технологиями сушки	Сокращение времени сушки	Температура в Уз ванне: 60, 70 и 80°C., время 5 мин. Температура КИК: 70 ± 2°C Расстояние 15,5 см	Предварительная обработка Уз-бланшированием перед КИКС снизила активность ферментов на 65,21%, 73,33% и 81,43% по сравнению с БГВ, а время КИКС сократилось на 2,5%, 1,5% и 21%	[30]

Условные обозначения: КИКС – каталитическая инфракрасная сушка; КИКБЛ – каталитическое инфракрасное бланширование; БГВ – бланширование горячей водой; БОП – бланширование острым паром; СГВ – сушка горячим воздухом; ЩО – сушка горячим воздухом; ЩО – щелочная очистка; ПФО – полифенолоксидаза; ПОД – пероксидаза; Уз – ультразвуковая обработка

Song и соавторы исследовали влияние КИК на процесс инактивации эндоферментов ломтиков сладкого картофеля разной толщины в различных условиях обработки (расстояния между эмиттером КИК и лотком для образцов и скоростью конвейера) и установили, что чем ближе эмиттер КИК к образцу, тем быстрее и эффективнее происходит инаktivация, а влияние расстояния нагрева на эффективность инаktivации фермента было намного больше, чем толщина образца [10]. Аналогичный результат был показан в исследовании Wu и соавторов, которые обнаружили, что остаточная активность ПФО чайных листьев колебалась от 4,1% до 16,0% после обработки КИК в течение 120–210 с на разных расстояниях облучения, причем чем ближе расстояние облучения, тем выше скорость инаktivации ПФО [17]. Это может быть связано с тем, что интенсивность излучения увеличивается с уменьшением расстояния и, следовательно, температура поверхности образца повышается быстрее. Стоит отметить, что при расстоянии излучения 15 см чайные листья частично обуглились, что отразилось на качестве чая. Аналогичный результат наблюдался в исследовании Chen J. и других авторов [11]. Поэтому необходимо контролировать расстояние между излучателем КИК и лотком для проб при обработке КИКБЛ.

### 1.1.2 Снижение содержания влаги

Помимо значительного эффекта инаktivации ферментов, каталитическое инфракрасное бланширование (КИКБЛ) также положительно влияет на удаление влаги. В традиционных методах БГВ включает погружение материалов в горячую воду при температуре от 70 до 100°C на несколько минут, тогда как бланшировка острым паром (БОП) предполагает воздействие на пищевое сырье острого пара при температуре выше 100°C, в зависимости от характеристик материала и требований к инаktivации ферментов [36]. По сравнению с БГВ, бланширование паром может уменьшить потерю минералов и водорастворимых веществ. Однако малая скорость пара и низкая эффективность теплопередачи делают БОП трудоемким, что приводит к неравномерному нагреву образцов. Кроме того, конденсация пара на поверхности образца также может вызывать размягчение тканей. В ходе этих процессов адсорбция воды материалами увеличивает энергоёмкость последующих операций (например, сушки), потому как для удаления этой части воды требуется больше энергии. По сравнению с традиционными методами предва-

рительной обработки БГВ и БОП, КИКБЛ представляет собой метод сухого бланширования без использования воды в качестве среды, при этом содержание воды в обрабатываемом материале после бланширования значительно ниже. Wu, Wang и соавторы установили, что содержание воды в картофельных чипсах, обработанных БГВ, составляло 97,4%, тогда как в образцах обработанных КИКБЛ только 32,0%. [17]. Кроме того, КИКБЛ может удалять часть воды и снижать энергоёмкость процесса [32]. Более того, Wu и соавторы изучали результат воздействия КИК на листьях зеленого чая и обнаружили, что при одном и том же источнике излучения, чем ближе образец к источнику, тем быстрее теряется вода чайных листьев, а скорость обезвоживания имеет тенденцию сначала увеличиваться, а затем уменьшаться [12]. Это может быть связано с быстрым ростом температуры в начальный период сушки и увеличением скорости обезвоживания. Аналогично, в случае фиксированного расстояния КИК-излучения, чем больше время облучения, тем влажность таро постепенно снижалась. Содержание влаги образцов таро после КИКБЛ снижалась быстрее, чем у контрольных образцов, обработанных БГВ. Таро, обработанное КИКБЛ, требовало более короткого времени сушки, чем образец без бланширования в тех же условиях БОП [37]. В исследовании бланшировки КИК банановых чипсов было установлено, что при КИКБЛ необходимые температуры (60, 70 и 80°C) достигались за 9 минут по сравнению с более чем 90 минутами для БОП, что в основном объяснялось более высокой скоростью нагрева. КИК также более эффективно переносит тепло, значительно сокращая время достижения необходимой температуры [13]. Кроме того, Chen J. и соавторы установили, что бланширование КИК способствовало 14,5% влаги из ломтиков моркови и сокращало соответствующее время сушки на 32,3%, 41,1% и 45,0% при 60, 70 и 80°C соответственно [11]. Это может быть связано с тем, что быстрое повышение температуры, вызванное КИК вызвало миграцию внутренней влаги ломтиков моркови наружу и испарение, а это привело к более высоким начальным температурам поверхности после бланширования, что является основной причиной сокращения времени сушки. В своем исследовании Song et al получили аналогичные результаты для чипсов из сладкого картофеля, обработанных КИКБЛ, которые показали, что предварительная обработка бланшированием КИКБЛ может способствовать снижению влажности на 45,77–79,15%, одновременно обеспечивая инаktivацию

ферментов в ломтиках сладкого картофеля [10]. Авторы также установили, что скорость сушки увеличивается с уменьшением расстояния КИК-излучения и толщины срезов образца, поскольку чем короче расстояние, тем сильнее облучение, а чем тоньше толщина, тем быстрее тепло может передаваться к внутренней поверхности образца, тем самым способствуя испарению влаги. Помимо ускорения диффузии воды за счет повышения температуры, высокая температура, вызванная КИК-излучением, также приводит к тому, что клеточная мембрана становится более проницаемой или более разрываемой и может удалить с поверхности материала некоторые воски, которые препятствуют диффузии воды, что в итоге способствует диффузии воды из образцов наружу и ее испарению [10,36]. Таким образом, КИКБЛ эффективно увеличивает скорость сушки, способствуя диффузии воды за счет быстрого повышения температуры, проницаемости или разрыва клеточных мембран, а также удаления поверхностного воскового слоя, тем самым уменьшая количество влаги и время сушки.

#### *1.1.3 Влияние каталитического инфракрасного бланширования на биологически активные вещества и витамины фруктов и овощей*

Фрукты и овощи содержат витамин С,  $\beta$ -каротин и фенольные вещества, которые полезны для здоровья человека, но могут разрушаться и снижать свое количество под действием различных физико-химических факторов в процессе переработки. Результаты многих научных исследований показывают, что обработка КИКБЛ может эффективнее сохранять эти вещества. В исследовании Chen J. и соавторов содержание витамина С в ломтиках моркови, обработанных КИКБЛ и сушкой горячим воздухом (СГВ), было на 14,39–19,03% выше, чем в ломтиках моркови, обработанных только СГВ [11]. Song et al получили аналогичные результаты: содержание витамина С в сладком картофеле, обработанном КИК, составляло 54,3–75,16% по сравнению с 40,72–45,36% в образцах, обработанных БГВ. Более высокое содержание в образцах, обработанных КИК, вероятно, связано с тем, что витамин С является водорастворимым и термочувствительным соединением и, следовательно, легче разрушается при обработке БГВ. Более того, в этом исследовании влияние расстояния на сохранность витамина С было больше, чем влияние толщины материала [10]. Что касается каротиноидов, Song и соавторы показали, что удержание  $\beta$ -каротина в моркови, обработанной КИК,

достигало 110,05–133,49% по сравнению с 107,04–109,70% в моркови, обработанной БГВ. Это может быть связано со снижением активации ферментов и структурой разрыва клеток, вызванной высокой температурой за короткое время обработки, что облегчает экстракцию  $\beta$ -каротина [10].

Фенольные вещества подобны витамину С и нестабильны по своей природе, поэтому могут разрушаться при высоких температурах. Во всех исследованиях [10,13] были получены результаты более высокого содержания фенолов после обработки КИКБЛ, чем при других обработках бланшированием, вероятно, потому, что КИКБЛ может достичь необходимых целей бланширования за более короткое время и, следовательно, оказывает меньшее влияние на содержание активных соединений во фруктах и овощах.

#### *1.1.4 Улучшение органолептических показателей*

Цвет, аромат и свежесть являются основными показателями, которые современный потребитель оценивает при выборе продуктов питания. Изменение цвета в основном вызвано реакцией Майяра, потерей термочувствительных пигментов, а также ферментативными и неферментативными реакциями потемнения. В исследовании Song et al., значения  $\Delta E$  составляли 7,41–20,59, тогда как образцы, обработанные БГВ, находились в диапазоне 16,02–18,42, и чем толще образец и больше расстояние, тем больше разница в цвете [10]. Это может быть связано с тем, что чем дальше расстояние и толще образец, тем больше времени нагревания требуется для достижения желаемой инактивации фермента, что приводит к более сильному ферментативному потемнению и растворению сахаров и белков в воде. Другими возможными причинами обесцвечивания являются распад термочувствительных пигментов, легкое осахаривание крахмала в сахара из-за набухания во время склеивания и обесцвечивание, вызванное реакцией Майяра [32, 38]. Более того, авторы исследований Pekke, Wu и Xia с соавторами пришли к выводу, что обработка CIRB полезна для сохранения цвета. Основная причина заключается в том, что время нагревания было сокращено при обработке CIRB, а скорость инактивации фермента стала выше, что уменьшило ферментативную реакцию потемнения [13, 12, 39]. Помимо цвета, еще одним важным фактором, стимулирующим выбор потребителей, является аромат. В исследовании Wu и соавторов зеленый чай, обработанный КИКБЛ, был светлым и мягким, и имел

нежный аромат по сравнению с образцом, бланшированным паром, который был пожелтевшим, засохшим [12]. Zhang и соавторы изучали влияние КИКБЛ на таро и установили, что аромат таро был более интенсивным, чем у образцов, обработанных БГВ, а удельная липкость поверхности таро также снижалась после бланширования методом КИКБЛ, что облегчало последующую обработку [37]. Кроме того, Xia и соавторы обнаружили, что содержание летучих ароматобразующих веществ в зеленом перце после КИКБЛ достигло  $61,3 \pm 1,38$  мкг/мл, что было значительно ( $p < 0,05$ ) выше, чем самое высокое международное стандартное значение 30 мкг/мл [39]. Во время бланширования целостность и проницаемость клеточной стенки и клеточной мембраны фруктов и овощей подвергаются обработке, которая может снизить тургорное давление клеток и снизить значение твердости [10, 40]. В исследовании Chen J. и соавторов хрусткость образцов, обработанных КИКБЛ, была выше, чем у не бланшированных образцов при той же температуре, вероятно, потому, что во время КИКБЛ температура быстро повышалась и вода испарялась [11]. Вышеупомянутые исследования доказали, что КИКБЛ является эффективным методом предварительной обработки, позволяющим смягчить или полностью исключить негативное влияние, вызванное традиционными БГВ и БОП с точки зрения инактивации эндоферментов, уменьшения количества воды, сохранения питательных веществ и органолептических показателей качества, что является перспективным для дальнейшего продвижения и применению. Тем не менее, необходимы дальнейшие исследования для определения оптимальных условий обработки с целью получению наиболее эффективных результатов для различных видов плодоовощного сырья в условиях промышленного производства и потребности рынка.

### **1.2 Жарка методом каталитического инфракрасного излучения**

КИК часто использовался для обработки фруктов и овощей, обжаренных во фритюре. При традиционной промышленной технологии обжаривания получают жареные продукты с высоким содержанием масла, что не благоприятно влияет на здоровье потребителей. Поэтому многие зарубежные ученые пытались найти новые современные методы снижения поглощения жиров в жареных продуктах. Например, для снижения содержания масла в картофельных чипсах использовались погружение в растворы сахара или соли, покрытие производными

целлюлозы или обжаривание в вакуумном устройстве. Однако эти методы имеют ограничения, такие как использование синтетических химикатов, высокая энергоёмкость и низкое качество конечной продукции [15]. КИК может удалять часть воды из сырья благодаря частоте своей вибрации, которая соответствует пику водопоглощения [14]. По сравнению с БГВ, КИК можно использовать в качестве предварительной обработки перед жаркой, при которой в качестве среды не используется вода, что может эффективно уменьшить заполнение пустот, образующихся в результате испарения воды в следующем процессе жарки, и помогает снизить содержание масла в жареных продуктах. Исследования по применению КИК при жарке во фритюре ограничены, а предыдущие исследования были сосредоточены на использовании этой технологии при производстве продуктов из жареного картофеля. Было показано, что КИК способ, используемый для жарки картофеля фри и чипсов, снижает содержание масла в конечных продуктах, что приводит к значительному снижению калорийности. Кроме того, в некоторых исследованиях жарки, в которых сначала применялась обжарка КИК с последующим обезвоживанием, было обнаружено, что технология предварительной обработки КИК значительно сокращает последующее время сушки и улучшает сенсорную оценку продукта.

#### *1.2.1 Снижение содержания масла*

Было доказано, что использование технологии КИК при жарке во фритюре позволяет эффективно контролировать содержание масла в жареных продуктах. Такие параметры, как время и температура жарки, форма продукта, предварительная обработка, влажность материала и содержание твердых веществ, могут влиять на поглощение масла жареными продуктами [14]. Во время жарки, при диффузии воды наружу, внутреннее и поверхностное давление воды материала становится выше, тогда как твердое вещество на поверхности материала становится все более компактным. Такое изменение приводит к тому, что внутренняя диффузия воды испытывает большое сопротивление, время жарки увеличивается, что приводит к дальнейшему увеличению содержания масла [41].

Изучая влияние КИК на содержание масла в жареном картофеле, Wu, Wang, и соавторы обнаружили, что в конце жарки образцы, обработанные КИКБЛ, содержали примерно половину содержания масла по сравнению с образцами, обработанными БГВ, общее содержание масла снизилось

более чем на 13,79%, и при том же содержании масла вода испарялась быстрее, чем в образцах, обработанных БГВ [17].

Bingol и соавторы исследовали влияние различных методов предварительной обработки на конечное качество жареных во фритюре картофельных чипсов и обнаружили, что содержание воды в образцах после КИКБЛ составляло  $76,85\% \pm 0,13\%$  по сравнению с  $82,07\% \pm 2,02\%$  после БГВ. Кроме того, конечное содержание масла в образцах, обработанных КИКБЛ, после жарки было снижено более чем на 30% во всех образцах по сравнению с БГВ. По мере увеличения времени жарки увеличивалась и скорость впитывания масла, вероятно, из-за сухой поверхности продукта и образования пустот при испарении воды, что снижало давление проникновения масла. Однако с дальнейшим обжариванием скорость роста содержания масла в продуктах существенно замедлялась, вероятно, за счет внутреннего склеивания крахмала и перемещения внутренних растворенных веществ наружу и образования корки на поверхности [15-16].

### 1.2.2 Улучшение органолептических показателей качества

Преимущества КИК технологии при жарке пищевых продуктов проявляются также в цвете и твердости продуктов, обжаренных во фритюре. Изменение цвета жареных продуктов обусловлено в основном реакциями Майяра, которые зависят главным образом от температуры и времени нагревания. Более того, неравномерное накопление редуцирующих сахаров по биологическим или абиотическим причинам также может привести к неравномерному распределению цвета пищевых продуктов [15]. Как правило жареные картофельные чипсы и картофель фри золотистого цвета более приемлемы для потребителей, и во многих исследованиях цвет образцов, обработанных КИКБЛ, становился золотистым быстрее, чем образцов, обработанных БГВ [14-16]. Например, Wu, Wang, с соавторами установили, что значения  $b^*$  (желтизна/голубизна) картофельных чипсов, обработанных КИК, были значительно ( $p < 0,05$ ) выше, чем у образцов, обработанных БГВ. Вероятно, это связано с потерей сахаров картофеля при обработке БГВ, что в дальнейшем привело к изменениям в реакции Майяра. Кроме того, горячая вода также повреждает пигменты в образцах картофеля, в результате чего конечные чипсы стали более белыми по сравнению с образцами, обработанными способом КИК [5].

Хрустящая корочка является важным показателем, используемым для оценки

вкуса жареных продуктов, и, согласно соответствующим исследованиям, твердость жареных продуктов может использоваться для отражения хрусткости в зависимости от более низкого значения твердости, соответствующего лучшей хрусткости [41-42]. Что касается жареных продуктов, то хрустящая корочка связана с изменениями в исходном содержании воды и содержании таких компонентов, как крахмал и белок. Wu, Wang с соавторами обнаружили, что значение твердости жареных картофельных чипсов уменьшалось с увеличением времени обработки КИК, и соответственно увеличивалась хрустящая корочка. Была выдвинута гипотеза о том, что высокое начальное содержание воды в образцах при коротком времени обработки КИК приводит к клейстеризации крахмала и денатурации белка, что снижает хрустящую корочку жареных картофельных чипсов. По мере продолжения обработки КИК наблюдалась тенденция к увеличению значения твердости, вероятно, из-за длительного времени излучения КИК, которое вызывало образование корки на поверхности ломтиков картофеля, увеличивая значение твердости [5]. Эти исследования, приведенные выше, показали значительные преимущества применения технологии КИК при жарке, включая снижение содержания масла и улучшение хрусткости, цвета и других свойств жареных продуктов. Результаты показали, что метод КИКБЛ можно рассматривать как альтернативу традиционной предварительной обработке БГВ для жареных продуктов и необходимо в дальнейшем ее промышленное использование для производства хрустящих фруктовых и овощных чипсов, предоставляя потребителям более здоровую и низкокалорийную пищу.

### 1.3 Инактивация микроорганизмов методом каталитического инфракрасного излучения

По причине ограниченного срока хранения фруктов и овощей происходят их значительные потери. С этой целью разработаны и широко применяются многие технологии, направленные на обеспечение качества и микробиологической стабильности плодоовощного сырья. Исследования, проведенные в течение более двух десятилетий, направлены на разработку эффективных технологий, гарантирующих не только безопасность пищевых продуктов, но и повышение их качества (улучшение внешнего вида, сохранение пищевой ценности и т. д.), увеличение срока хранения и снижение производственных затрат [43-44]. Способы обработки и консервирования подразделяют

на методы, основанные на высоких температурах, таких как, омический нагрев, радиочастотный нагрев, микроволновый нагрев и инфракрасный нагрев, а также методы, которые не являются термическими и основаны на собственных химико-физических принципах (ультрафиолетовое излучение, озонирование, высокое гидростатическое давление, ультразвук и мембранные технологии). Современные технологии стерилизации являются эффективными процессами обработки пищевых продуктов и обладают значительными преимуществами по сравнению с термической обработкой. Традиционными методами снижения микробной популяции являются высокотемпературный пар, облучение  $^{60}\text{Co}$ , конвекционная сушка и т. д. Однако все эти методы имеют недостатки, заключающиеся в высоком энергопотреблении, низкой скорости нагрева и использования энергии, а также низком качестве конечной продукции. Кроме того, остатки влаги от пара могут повлиять на последующую сушку, а безопасность облучения  $^{60}\text{Co}$  в настоящее время является спорным вопросом, связанным со здоровьем потребителей [19-21,45]. Обеззараживание методом КИК не получило широкого распространения из-за отсутствия всесторонних и более глубоких исследований. Существующие исследования показали, что обработка КИК способно за короткий период времени снижать микробные популяции на поверхности фруктов и овощей [46]. Это связано с тем, что испускаемое КИК излучение может повреждать ДНК, РНК, рибосомы, клеточные мембраны, белки и другие вещества микробных клеток, тем самым уменьшая их популяцию. Кроме того, технология КИК обеспечивает высокую эффективность обработки при минимальном воздействии на внутреннюю структуру фруктов и овощей, обеспечивая высокое качество продукции. Эта технология, применяемая для уничтожения микробов, не только снижает энергопотребления, но также сокращает время обработки и количество отходов [19, 20, 46]. КИК-излучение может эффективно и за короткое время эффективно уменьшить количество бактерий на поверхности фруктов и овощей. Zhang и соавторы провели исследование снижения микробиологической обсемененности методом КИК на обезвоженном шпинате с влажностью 10–30% [21]. Авторы установили, что логарифмическое количество остаточных бактерий снизилось на 0,42–1,00 log КОЕ/г после воздействия КИК. Они также показали, что исходные образцы шпината имели количество *E. coli* около 240 КОЕ/г, что достигало безопасного значения менее 100 КОЕ/г

после обработки КИК, когда расстояние от лотка для образцов до излучателя КИК составляло 21 дюйм. см, а средняя температура поверхности КИК-излучателя достигала  $397,5 \pm 17,6^\circ\text{C}$ . Контрольные образцы, подвергнутые выдерживанием при высокой температуре, не достигли безопасного диапазона. Кроме того, по мере увеличения влажности и времени облучения была достигнута полная инактивация микробов обработкой КИК на шпинате. Другие результаты снижения микробной нагрузки с помощью технологии КИК представлены в таблице.

Wang и соавторы установили, что уничтожение микробов путем нагревания КИК до определенной температуры и последующего выдерживания в течение некоторого времени было эффективным для сохранения питательных веществ, таких как цвет, общие сахара и фенолы, а также для сглаживания микроструктуры грибов, одновременно обеспечивая сокращение популяции *A. niger* [47]. Вероятно, потому, что температура КИК была низкой, что обеспечивало сохранение качества, в то время как высокая температура и высокая влажность в период выдержки денатурировали белки в спорах плесени, чтобы обеспечить уничтожение микробов. Дезинфицирующее действие КИК было сильнее для *A. niger* в сушеных грибах шиитакэ с более высоким исходным содержанием влаги, что может быть связано со снижением термоустойчивости микроорганизмов с увеличением активности влаги. Это согласуется с результатами, полученными Zhang и соавторов [21].

### 1.3.1 Влияние каталитического инфракрасного излучения на другие показатели

Помимо снижения микробной популяции, действие КИК в определенной степени способствует сохранению качественных показателей обрабатываемого сырья. Например, в исследовании зеленого сычуаньского перца уровень микробиологической обсемененности после 4 минут обработки КИК составил  $2,60 \pm 0,29 \log$ , что значительно ( $p < 0,01$ ) ниже, чем при термической обработке  $1,18 \pm 0,26 \log$ . Кроме того, обработка КИК не вызвала значительного снижения содержания и аромата летучих масел, а цвет также не изменился [39]. Также Zhang с соавторами установили, что обработка КИК позволила инактивировать микроорганизмы и при этом сохранить содержание хлорофилла. Сохранение содержания хлорофилла варьировалось от 77,4% до 98,40% после обработки КИК в сочетании с выдержкой при  $70^\circ\text{C}$  в течение 60 мин, тогда как удержание хлорофилла в обезвоженном

шпинате составляло только 64,98% после 180 с БОП в сочетании с термообработкой при 70°C в течение 30 мин [21]. Обобщая результаты многочисленных исследований по инактивации микроорганизмов методом КИК, можно сделать вывод, что эта технология может стать перспективным направлением исследований, если ее комбинировать с температурной выдержкой для более эффективной инактивации микрофлоры. Следует отметить, что хотя дезинфицирующее действие метода КИК увеличивается с увеличением времени нагрева, он требует подбора оптимального времени нагрева, потому как длительное воздействие оказывает отрицательное влияние на качество сырья.

#### ***1.4 Очистка плодоовощного сырья методом каталитического инфракрасного излучения(КИК)***

Очистка является важным и распространенным процессом при приготовлении продуктов на основе фруктов и овощей. При переработке томатов наиболее распространенными методами очистки являются паровая очистка (ПРВ) и щелочная очистка ЦО. Тем не менее, эти методы могут потреблять большое количество воды и энергии и оказывать негативное воздействие на окружающую среду. Например, действие высокой температуры очисткой острым паром может значительно смягчить текстуру фруктов и овощей. Щелочь вызывает коррозию и химические вещества могут оставаться на поверхности фруктов и овощей, что неблагоприятно для здоровья [22,48]. ИК, как метод очистки, способен быстро проникать в эпидермальную часть фруктов и овощей, чтобы отделить кожуру от мякоти, при этом меньше влияя на свойства мякоти фруктов за короткую продолжительность обработки, что подходит для очистки фруктов и овощей. В настоящее время ИК-излучатели в приложениях имеют разные излучатели, наиболее часто используемые эмиттеры – ЭИР и керамические ИК-излучатели. Хотя эти два излучателя используются более широко, они по-прежнему имеют ограничения в процессе очистки, связанные с высоким энергопотреблением, хрупкостью и низким уровнем безопасности [49]. По сравнению с этим, КИК можно считать альтернативой для устранения этих проблем благодаря тому, что действие КИК представляет собой процесс снятия кожи путем нагревания, при котором материал подвергается непосредственному воздействию КИК-излучения. Этот метод без использования химикатов или воды, который в последние годы вызвал большой интерес ученых способен эффективно сохранять

целостность мякоти фруктов и овощей за счет простого нагрева поверхностного слоя и практически не влияет на внешний вид и физико-химические свойства мякоти. Этот метод позволяет производителям добиться эффективной очистки от кожуры при сохранении высокого качества продукции и снижении производственных затрат [22,24]. Что касается эффективности очистки, как традиционные методы, так и метод КИК были эффективны, но в ходе исследования очистки томатов черри было установлено, что очистка КИК на расстоянии 30 см была более эффективна, чем традиционные методы очистки острым паром и щелочная очистка. Также авторы исследования установили, что эффективность очистки снижается при уменьшении расстояния до 20 см, вероятно, потому что высокая интенсивность ИК-излучения вызывала в определенной степени ожог кожуры помидоров черри. Массовое соотношение мякоти и кожицы томатов черри, очищенных ИК-облучением на расстоянии обработки 30 см в течение 3 мин, составило 7,68%, тогда как соотношение образцов, очищенных ультразвуком (УЗ), увеличилось до 26,87%. Чем ниже соотношение мякоти и кожицы фруктов, тем меньше мякоти прилипает к кожуре; иными словами, тем меньше потери качества при очистке и тем лучше целостность очищенных фруктов [24]. Текстура мякоти плода после очистки является ключевым показателем оценки качества метода очистки. Однако исследования показали, что различные методы очистки снижают текстурные свойства фруктов и овощей [24,50]. Кроме того, мякоть томатов черри, очищенная с помощью КИК, была более твердой, чем другими методами, что в основном связано с уменьшением разложения полисахаридов и давления расширения клеток из-за высокой температуры при короткой продолжительности обработки.

#### **Заключение**

Обзор научных исследований показал, что применение каталитического инфракрасного излучения (КИК) при переработке фруктов и овощей было тщательно изучено. Данный метод представляет собой энергосберегающую и экологически чистую технологию переработки, позволяющую обеспечить потребителей высококачественной плодоовощной продукцией. Помимо того, что метод КИК более энергоэффективен и экологичен, чем традиционный метод ИК, он может значительно повысить эффективность обработки, улучшить фитохимическое содержание и качество продукции, а также снизить загрязнение

окружающей среды и потери сырья. Несмотря на то, что было проведено много исследований по технологии каталитического инфракрасного излучения при переработке фруктов и овощей, остается ряд ограничений для его широкого промышленного внедрения. На сегодняшний день использование метода каталитического инфракрасного нагрева в основном в непищевых отраслях, а в промышленном производстве по переработке овощей и фруктов его использование незначительно. Применение ограничивается свойствами фруктов и овощей (такими как сорт, размер и геометрия), используемым оборудованием и условиями обработки. Также должно быть запроектировано и разработано соответствующее целевое промышленное оборудование, которое должно учитывать возможность оптимизации параметров обработки фруктов и овощей. Поэтому необходимы дальнейшие исследования для углубленного анализа технологии каталитического инфракрасного излучения и ее применения в промышленном производстве.

#### Список литературы

- Liu J., Zhao Y., Shi Q. Research progress and future prospects of novel pretreatment technologies for the drying of fruits and vegetables and aquatic products // *Science and Technology of Food Industry*. 2022. Vol. 43. No. 3. P. 32–42. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110103.
- Rastogi N.K. Recent trends and developments in infrared heating in food processing // *Critical reviews in food science and nutrition*. 2012. Vol. 52. No. 9. P. 737–760. DOI: 10.1080/10408398.2010.508138.
- Li X., Xie X., Zhang C.-H., Zhen S., Jia, W. Role of mid-and far-infrared for improving dehydration efficiency in beef jerky drying // *Drying Technology*. 2018. Vol. 36. No. 3. P. 283–293. DOI: 10.1080/07373937.2017.1326129.
- Бурак Л.Ч. Существующие способы обработки пищевых продуктов и их влияние на пищевую ценность и химический состав // *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания*. 2021. № 3. С. 59–73. DOI: 10.24412/2311-6447-2021-3-59-73.
- Chang A., Zheng X., Xiao H., Yao X., Liu D., Li X., Li Y. Short- and medium-wave infrared drying of cantaloupe (*Cucumis melon L.*) slices: Drying kinetics and process parameter optimization // *Processes*. 2022. Vol. 10. No. 1. P. 114. DOI: 10.3390/pr10010114.
- Sotome I., Takenaka M., Koseki S., Ogasawara Y., Nardachi Y., Okadome H., Isobe S. Blanching of potato with superheated steam and hot water spray // *LWT – Food Science and Technology*. 2009. Vol. 42. No. 4. P. 1035–1040. DOI: 10.1016/j.lwt.2009.02.001.
- Ma H., Chen W. Research status and prospect of emerging physical sterilization technology of solid food based on electromagnetic wave and plasma // *Journal of Food Science and Technology*. 2023. Vol. 41. No. 2. P. 1–15. DOI: 10.12301/spxb202300403.
- Page M.J., Moher D., Bossuyt P.M., Boutron I., Hoffmann T.C., Mulrow C.D., Shamseer L., Tetzlaff J.M., Akl E.A., Brennan S.E., Chou R., Glanville J., Grimshaw J.M., Hróbjartsson A., Lalu M.M., Li T., Loder E.W., Mayo-Wilson E., McDonald S., McGuinness L.A., Stewart L.A., Thomas J., Tricco A.C., Welch V.A., Whiting P., McKenzie J.E. PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews // *BMJ*. 2021. Vol. 372. No. 160. DOI: 10.1136/bmj.n160.
- Page M.J., McKenzie J.E., Bossuyt P.M., Boutron I., Hoffmann T.C., Mulrow C.D., Shamseer L., Tetzlaff J.M., Akl E.A., Brennan S.E., Chou R., Glanville J., Grimshaw J.M., Hróbjartsson A., Lalu M.M., Li T., Loder E.W., Mayo-Wilson E., McDonald S., McGuinness L.A., Stewart L.A., Thomas J., Tricco A.C., Welch V.A., Whiting P., Moher D. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. // *BMJ*. 2021. Vol. 372. No. 71. DOI: 10.1136/bmj.n71.
- Song X., Yu X., Zhou C., Xu B., Chen L., Elgasim A., Yagoub A., Emeka O. C., Wahia H. Conveyor belt catalytic infrared as a novel apparatus for blanching processing applied to sweet potatoes in the industrial scale // *Food Science and Technology*. 2021. Vol. 149. No. 8. P. 111827. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.111827.
- Chen J., Venkatasamy C., Shen Q., Mchugh T.H., Zhang R., Pan Z. Development of healthy crispy carrot snacks using sequential infrared blanching and hot air drying method // *LWT – Food Science and Technology*. 2018. Vol. 97. No. 6. P. 469–475. DOI: 10.1016/j.lwt.2018.07.026.
- Wu B., Xiao M., Liu M., Pan Z., Ma H. Fixation and drying of green tea using sequential catalytic infrared heating and hot air drying // *Food Science*. 2017. Vol. 38. No. 9. P. 126–132. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201709020.
- Pekke M.A., Pan Z., Atungulu G.G., Smith G., Thompson J.F. Drying characteristics and quality of bananas under infrared radiation heating. // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2013. Vol. 6. No. 3. P. 58–70. DOI: 10.3965/j.ijabe.20130603.008.
- Wu B., Guo Y., Wang J., Pan Z., Ma H. Effect of thickness on non-fried potato chips subjected to infrared radiation blanching and drying // *Journal of Food Engineering*. 2018. Vol. 237. No. 11. P. 249–255. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2018.05.030.
- Bingol G., Zhang A., Pan Z., Mchugh T.H. Producing lower-calorie deep fat fried French fries using infrared dry-blanching as pretreatment // *Food Chemistry*. 2012. Vol. 132. No. 2. P. 686–692. DOI: 10.1016/j.foodchem.2011.10.055.
- Bingol G., Wang B., Zhang A., Pan Z., Mchugh T.H. Comparison of water and infrared blanching methods for processing performance and final product quality of French fries // *Journal of Food Engineering*. 2014. Vol. 121. No. 5. P. 135–142. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2013.08.001.
- Wu B., Wang J., Guo Y., Pan Z., Ma H. Effects of infrared blanching and dehydrating pretreatment on oil content of fried potato chips // *Journal of Food Processing and Preservation*. 2018. Vol. 42. No. 3. P. e13531. DOI: 10.1111/jfpp.13531.
- Brandl M.T., Pan Z., Huynh S., Zhu Y., Mchugh T.H. Reduction of Salmonella enteritidis population sizes on almond kernels with infrared heat // *Journal of Food Protection*. 2020. Vol. 71. No. 5. P. 897–902. DOI: 10.4315/0362-028X-71.5.897.
- Fu R., Wang H., Zhang A. Effect of catalytic infrared radiation on pasteurization of grape seeds // *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 19. No. 10. P. 150–156. DOI: 10.16429/j.1009-7848.2019.10.018.
- Li T., Qu W., Wu B., Wang B., Ma H., Pan Z., Jiang, Q. Effect of combined drum catalytic infrared with holding treatment for disinfection and quality of rewetted-dried shiitake mushrooms // *Food and Machinery*. 2021. Vol. 37. No. 7. P. 120–128. DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2021.07.020.
- Zhang X., Qu W., Ma H., Pan Z., Wu B. Effectiveness of catalytic infrared radiation in the sterilization of dehydrated spinach // *Food Science*. 2018. Vol. 34. No. 23. P. 133–137. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201323028.
- Qu W., Liu Y., Feng Y., Ma H. Research on tomato peeling using flame-catalytic infrared radiation // *Food Science and Technology*. 2022. Vol. 163. No. 3. P.113542. DOI: 10.1016/j.lwt.2022.113542.
- Li X., Pan Z., Atungulu G.G., Zheng X., Wood D., Delwiche M., Mchugh T.H. Peeling of tomatoes using novel infrared radiation heating technology // *Innovative Food Science and*

- Emerging Technologies. 2014. Vol. 21. No. 8. P. 123–130. DOI: 10.1016/j.ifset.2013.10.011.
24. Xu B., Zhou T., Wei B., Ren X., Wu B., Zhou C., Ma H. Catalytic infrared radiation improving peeling effect and quality of cherry tomatoes // *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 34. No. 22. P. 299–305. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.24.036.
25. Qu W., Fan W., Zhu Y., Ma H., Shi J., Pan Z. Nutritive quality of walnut dried by variable temperature drum catalytic infrared-hot air // *Science and Technology of Food Industry*. 2021. Vol. 42. No. 1. P. 205–215. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040298.
26. Venkatasamy C., Zhu C., Brandl M.T., Niederholzer J.A., Zhang R., Mchugh T.H., Pan Z. Feasibility of using sequential infrared and hot air for almond drying and inactivation of *Enterococcus faecium* NRRL B-2354 // *Food Science and Technology*. 2018. Vol. 95. No. 8. P. 123–128. DOI: 10.1016/j.lwt.2018.04.095.
27. Venkatasamy C., Brandl M.T., Wang B., Mchugh T.H., Zhang R., Pan Z. Drying and decontamination of raw pistachios with sequential infrared drying, tempering and hot air drying // *International Journal of Food Microbiology*. 2017. Vol. 246. No. 4. P. 85–91. DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2017.02.005.
28. Pan Z., Shih C., Mchugh T.H., Hirschberg E. Study of banana dehydration using sequential infrared radiation heating and freeze-drying // *LWT—Food Science and Technology*. 2008. Vol. 41. No. 10. P. 1944–1951. DOI: 10.1016/j.lwt.2008.01.019.
29. Shih C., Pan Z., Mchugh T., Wood D., Hirschberg E. Sequential infrared radiation and freeze-drying method for producing crispy strawberries // *Transactions of the ASABE*. 2008. Vol. 51. No. 1. P. 205–216. DOI: 10.13031/2013.24205.
30. Guo Y., Wu B., Lu D., Pan Z., Ma H. Tri-frequency ultrasound as pretreatment to infrared drying of carrots: Impact on enzyme inactivation, color changes, nutrition quality parameters and microstructures // *International Journal of Food Engineering*. 2021. Vol. 17. No. 4. P. 275–284. DOI: 10.1515/ijfe-2020-0223.
31. Pan Z., Atungulu G.G. The potential of novel infrared food processing technologies: case studies of those developed at the USDA-ARS Western Region Research Center and the University of California-Davis // *Case Studies in Novel Food Processing Technologies*. 2010. Vol. 14. P. 139–208. DOI: 10.1016/B978-1-84569-551-4.50007-1.
32. Zhu Y. Processing and quality characteristics of apple slices under simultaneous infrared dry-blanching and dehydration with continuous heating // *Journal of Food Engineering*. 2009. Vol. 90. No. 6. P. 441–452. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2008.07.015.
33. Ahmad T., Butt M.Z., Aadil R.M., Inam-Ur-Raheem M., Abdullah Bekhit A.E.-D., Guimarães J.T., Balthazar C.F., Rocha R.S., Esmerino E.A., Freitas M.Q., Silva M.C., Sameen A., Cruz A.G. Impact of nonthermal processing on different milk enzymes // *International Journal of Dairy Technology*. 2019. Vol. 72. No. 4. P. 481–495. DOI: 10.1111/1471-0307.12622.
34. Manzoor M.F., Zeng X.A., Ahmad N., Ahmed Z., Rehman A., Aadil R.M., Roobab U., Siddique R., Rahaman A. Effect of pulsed electric field and thermal treatments on the bioactive compounds, enzymes, microbial, and physical stability of almond milk during storage // *Journal of Food Processing and Preservation*. 2020. Vol. 44. No. 7. P. e14541. DOI: 10.1111/jfpp.14541.
35. Roobab U., Abida A., Afzal R., Madni G.M., Zeng X.A., Rahaman A., Aadil R.M. Impact of high-pressure treatments on enzyme activity of fruit-based beverages: An overview // *International Journal of Food Science and Technology*. 2022. Vol. 57. No. 2. P. 801–815. DOI: 10.1111/ijfs.15492.
36. Deng L.Z., Mujumdar A.S., Zhang Q., Yang X.H., Wang J., Zheng Z.A., Gao Z.J., Xiao H.W. Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: Effects on drying characteristics and quality attributes—A comprehensive review // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2019. Vol. 59. No. 9. P. 1408–1432. DOI: 10.1080/10408398.2017.1409192.
37. Zhang D., Ma X., Wu B., Wang M., Han F. Effect of hot air drying of taros based on infrared fixation technology // *Journal of University of Arts and Science (Natural Sciences)*. 2022. Vol. 36. No. 9. DOI: 10.13804/j.cnki.2095-6991.2022.02.020.
38. Wu B., Guo X., Guo Y., Ma H., Zhou C. Enhancing jackfruit infrared drying by combining ultrasound treatments: Effect on drying characteristics, quality properties and microstructure // *Food Chemistry*. 2021. Vol. 358. No. 2. P. 129845. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.129845.
39. Xia G., Li Y., Tao H., Zhang L., Zhang J. Inactivation mechanism of catalytic infrared against *Pseudomonas aeruginosa* and its decontamination application on dry green Sichuan pepper (*Zanthoxylum schinifolium*) // *Food Control*. 2021. Vol. 132. No. 3. P. 108483. DOI: 10.1016/j.foodcont.2021.108483.
40. Guo Y., Wu B., Guo X., Liu D., Qiu C., Ma H. Effect of thermosonication on texture degradation of carrot tissue in relation to alterations in cell membrane and cell wall structure // *Food Chemistry*. 2022. Vol. 393. No. 6. P. 133335. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.133335.
41. Su Y., Zhang M., Zhang W., Adhikari B., Yang Z. Application of novel microwave-assisted vacuum frying to reduce the oil uptake and improve the quality of potato chips // *LWT—Food Science and Technology*. 2016. Vol. 73. No. 5. P. 490–497. DOI: 10.1016/j.lwt.2016.06.047.
42. Pedreschi F., Moyano P. Oil uptake and texture development in fried potato slices // *Journal of Food Engineering*. 2005. Vol. 70. No. 7. P. 557–563. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2004.10.010.
43. Бурак Л.Ч. Использование современных технологий обработки для увеличения срока хранения фруктов и овощей. Обзор предметного поля // *Ползуновский вестник*. 2024. № 1. С. 99–119. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.013.
44. Бурак Л.Ч., Сапач А.Н. Использование технологии омического нагрева в процессе переработки плодов и овощей. Обзор предметного поля // *Пищевые системы*. 2024. Т. 7, № 1. С. 59–70. DOI: 10.21323/2618-9771-2024-7-1-59-70.
45. Бурак Л.Ч. Современные методы обработки пищевых продуктов. Критический обзор // *The Scientific Heritage*. 2024. № 130. С. 45–59. DOI: 10.5281/zenodo.10632041.
46. Aboud S.A., Altemimi A.B., Al-Hilphy A., Yi-Chen L., Cacciola F. A Comprehensive Review on Infrared Heating Applications in Food Processing // *Molecules*. 2019. Vol. 24. No. 8. P. 4125. DOI: 10.3390/molecules24224125.
47. Wang Y., Li T., Pan Z., Ye X., Ma H. Effectiveness of combined catalytic infrared radiation and holding time for decontamination *Aspergillus niger* on dried shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*) with different moisture contents // *LWT—Food Science and Technology*. 2023. Vol. 176. No. 11. P. 114503. DOI: 10.1016/j.lwt.2023.114503.
48. Wang B., Venkatasamy C., Zhang F., Zhao L., Khir R., Pan Z. Feasibility of jujube peeling using novel infrared radiation heating technology // *LWT—Food Science and Technology*. 2016. Vol. 69. No. 4. P. 458–467. DOI: 10.1016/j.lwt.2016.01.077.
49. Vidyarthi S.K., El Mashad H.M., Khir R., Zhang R., Tiwari R., Pan Z. Evaluation of selected electric infrared emitters for tomato peeling // *Biosystems Engineering*. 2019. Vol. 184. No. 11. P. 90–100. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2019.06.006.
50. Xu P., Zhang Z., Peng X., Yang J., Li X., Yuan T., Jia X., Liu Y., Abdullaev O., Jenis J. Study on vacuum drying kinetics and processing of the *Lonicera japonica* Thunb. aqueous extracts // *LWT—Food Science and Technology*. 2022. Vol. 167. No. 8. P. 113868. DOI: 10.1016/j.lwt.2022.113868.

УДК 621.313.04

## ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В КОНСТРУКЦИЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Хнычев Д.А.

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва,  
e-mail: danila.khnychiov@mail.ru

Статья посвящена исследованию применения аддитивных технологий в конструкции электрических машин, подчеркнута их роль в оптимизации и создании инновационных решений. Целью данной статьи является обзор последних достижений в области применения аддитивных технологий в конструкциях различных типов электрических машин. Исследование основано на анализе научных статей, опубликованных за последние три года, что позволяет отразить актуальные тенденции и инновации в данной области. В рамках исследования рассмотрены конкретные примеры использования аддитивных технологий для создания катушек вентильного реактивного двигателя, магнитопроводов синхронных электродвигателей с аксиальным потоком, роторов синхронных двигателей с постоянными магнитами и оптимизации магнитной системы синхронного генератора для ветроэнергетической установки. Представлены данные о сравнении новых решений на основе аддитивных технологий с традиционными конструкциями. В результате работы выявлено, что с развитием аддитивных технологий открываются новые возможности для проектирования электрических машин и оптимизации их конструкций. Дальнейшее совершенствование аддитивных технологий позволит создавать еще более эффективные электрические машины, отвечающие современным требованиям электромашиностроения. Данное исследование подчеркивает необходимость активного внедрения аддитивных технологий в проектирование и производство электрических машин.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, аддитивное производство, 3D печать, электрические машины

## OVERVIEW OF THE APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE DESIGNS OF ELECTRICAL MACHINES

Khnychev D.A.

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow,  
e-mail: danila.khnychiov@mail.ru

The article is devoted to the study of the application of additive technologies in the design of electrical machines, emphasizing their role in optimization and creation of innovative solutions. The purpose of this article is to review the latest achievements in the field of additive technologies in the designs of various types of electrical machines. The study is based on the analysis of scientific articles published over the past three years, which allows us to reflect current trends and innovations in this field. The study considers specific examples of the use of additive technologies to create coils of a switched reluctance motor, magnetic cores of synchronous electric motors with axial flux, rotors of synchronous motors with permanent magnets and optimization of the magnetic system of a synchronous generator for a wind turbine. Data on the comparison of new solutions based on additive technologies with traditional designs are presented. As a result of the work, it was revealed that with the development of additive technologies, new opportunities for the design of electrical machines and optimization of their designs are opening up. Further improvement of additive technologies will allow creating even more efficient electrical machines that meet modern requirements of electrical engineering. This study emphasizes the need for active implementation of additive technologies in the design and production of electrical machines.

**Keywords:** additive technologies, additive manufacturing, 3D printing, electrical machines

### Введение

В настоящее время аддитивные технологии (АТ) являются одним из ключевых инструментов для совершенствования конструкций электрических машин. Их внедрение открывает новые горизонты для создания инновационных конструкций и оптимизации существующих, что ранее было невозможно при использовании традиционных методов производства.

Благодаря АТ стало возможным изготовление деталей машин со сложной конфигурацией. Кроме того, сокращается трудоемкость производства за счет уменьшения количества технологических опера-

ций. В дополнение к этим преимуществам данная технология является практически безотходной. Все это способствует стремительному росту аддитивного производства.

Целью данного исследования является обзор последних достижений в области применения аддитивных технологий в конструкциях различных типов электрических машин. В работе рассмотрены примеры использования АТ в вентильном реактивном двигателе, синхронном электродвигателе с аксиальным потоком, синхронном двигателе с постоянными магнитами (СДПМ) и синхронном генераторе для ветроэнергетической установки (ВЭУ).

### Материалы и методы исследования

В качестве материалов исследования были использованы научные статьи, опубликованные за последние три года. Поиск материалов осуществлялся по ключевым словосочетаниям: «additive technologies in electric machines», «3D printing in electric machines».

При отборе материалов учитывались следующие критерии:

1) материал написан в период с 2022 по 2024 гг.;

2) материал опубликован в рецензируемых научных журналах или конференциях;

3) тип материала: оригинальные научные статьи, обзорные статьи или материалы конференций.

Для данной обзорной статьи было отобрано 8 материалов, соответствующих указанным критериям.

### Результаты исследования и их обсуждение

В некоторых работах рассматриваются новые возможности проектирования и производства сосредоточенной обмотки вентильного реактивного электродвигателя с использованием технологии 3D-печати [1, 2]. Авторы разработали и изготовили катушку трапецевидной формы из порошка Fe-Si (рис. 1). Применение данной катушки позволит значительно повысить коэффициент заполнения паза, что, в свою очередь, приведет к созданию более энергоэффективной электрической машины. Статор конструкции состоит из секций, что обеспечивает возможность размещения катушек

на зубцах. Кроме того, вместо естественного воздушного охлаждения используется внешняя рубашка с непрямым водяным охлаждением, что способствует более эффективному отведению тепла.

Для печати таких катушек возможно использование алюминия, что даст возможность снизить массу двигателя и его стоимость. Снижение веса катушки составило 32% по сравнению с обычной медной катушкой. При проведении теплового анализа с одинаковой системой охлаждения было установлено, что алюминиевые катушки, напечатанные на 3D-принтере, имеют более низкую температуру по сравнению с традиционными медными катушками. Применение таких катушек не только способствует снижению веса, но и позволяет повысить коэффициент полезного действия (КПД) и удельную мощность вентильного реактивного двигателя, что делает их перспективными для использования в различных областях, требующих высоких энергетических характеристик.

Найдена работа, посвященная исследованию создания магнитопровода статора синхронного электродвигателя с аксиальным потоком [3]. Для изготовления яра и зубцов статора используется 3D-принтер с несколькими соплами, а в качестве материала применяется порошок Fe-Si (рис. 2). Между слоями магнитного материала наносится изолирующий слой.

В исследовании рассматриваются два метода печати сердечника: микроэкструзия и технология LPBF (Laser Powder Bed Fusion).

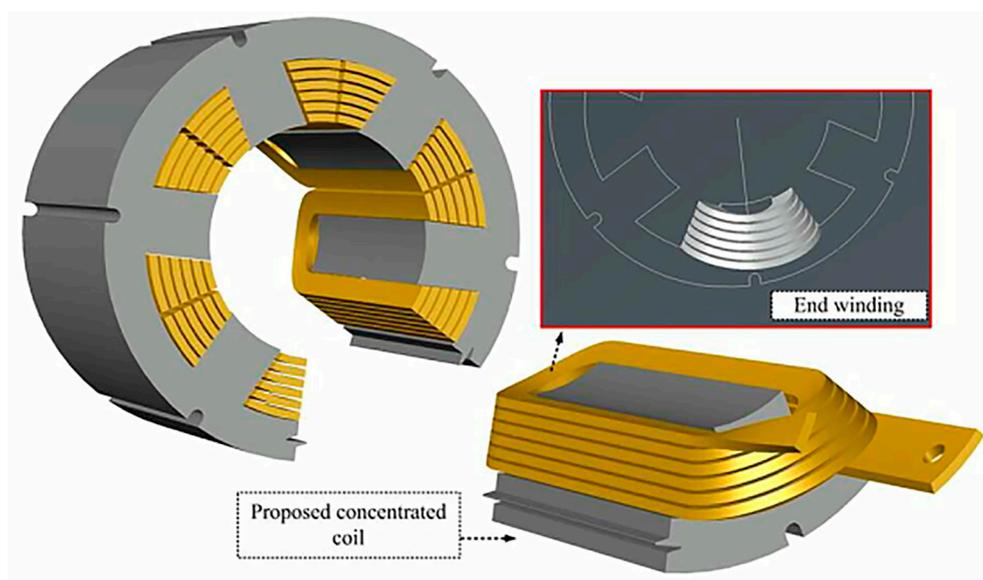


Рис. 1. Катушка трапецевидной формы [1, 2]

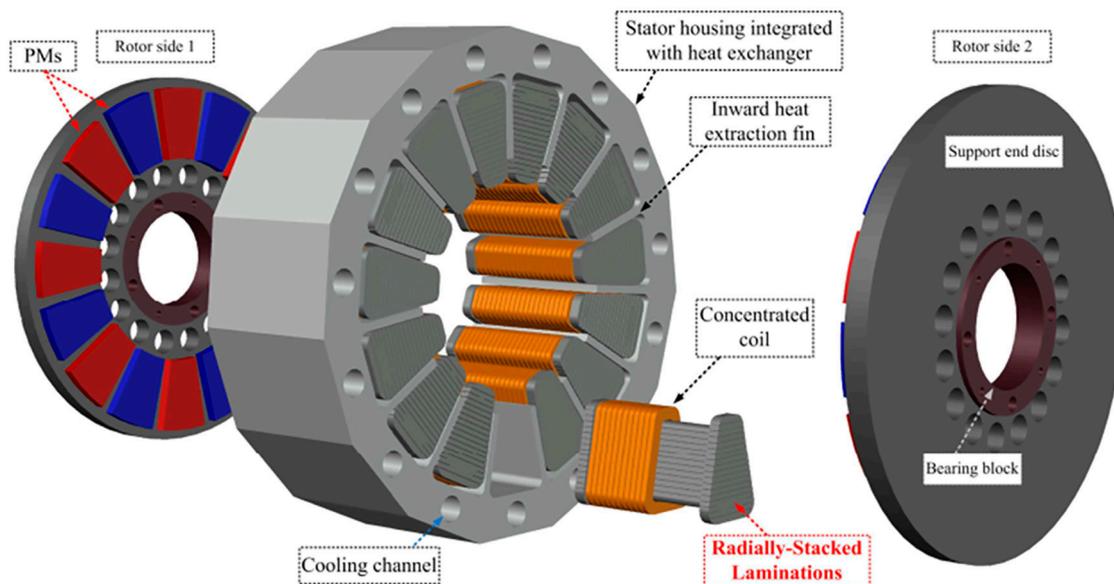


Рис. 2. Конструкция синхронного двигателя с аксиальным потоком [3]

Проведено сравнение магнитных свойств сердечников, изготовленных по данным методам, с сердечником из электротехнической стали марки М270-50А толщиной 0,5 мм. Испытания показали, что магнитопровод, изготовленный с помощью технологии LPBF, демонстрирует наибольшую площадь петли ВН, в то время как у магнитопровода из стали М270-50А она оказывается наименьшей. При анализе удельных потерь в сердечнике при частоте 50 Гц было установлено, что наибольшие потери наблюдаются

у образца, изготовленного по технологии LPBF, тогда как наименьшие потери фиксируются у магнитопровода из стали М270-50А. Эти результаты указывают на то, что микроэкструзия является более предпочтительным методом для изготовления магнитопроводов, чем технология LPBF.

Авторами в одной из работ исследовался синхронный электродвигатель с аксиальным потоком, у которого магнитопровод статора изготовлен с использованием аддитивного производства (рис. 3).

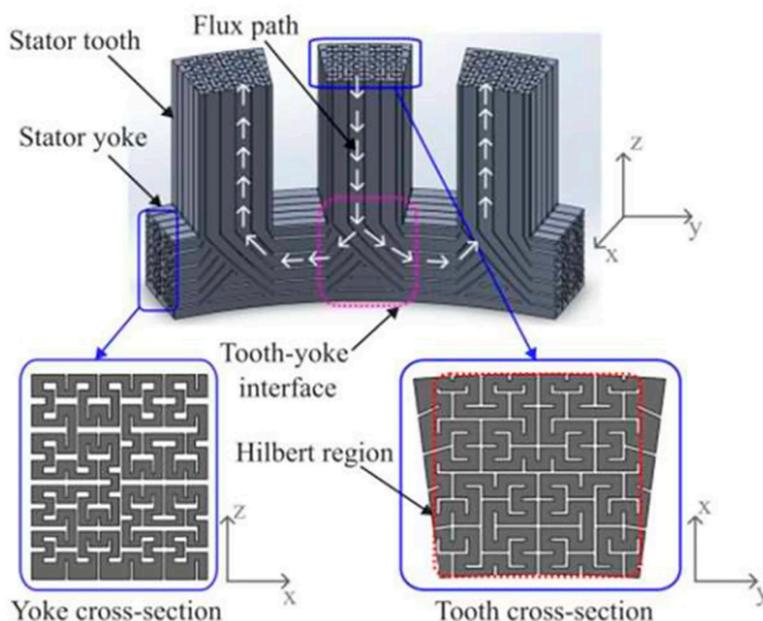


Рис. 3. Магнитопровод статора двигателя с аксиальным потоком [4]

В результате исследования был разработан статор с использованием структуры Гильберта, который был изготовлен аддитивным методом с применением металлического порошка с содержанием кремния 6,5%. Результаты экспериментов показывают, что магнитопровод, изготовленный по данной технологии, демонстрирует более низкие потери на вихревые токи по сравнению с традиционными методами производства [4].

В одном из анализируемых исследований имелась информация о разработке легкого ротора с системой воздушного охлаждения, выполненного с помощью аддитивных технологий совместно с валом (рис. 4). В результате проведенных экспериментов было подтверждено, что температура постоянных магнитов (ПМ) в данной конструкции ротора значительно ниже по сравнению

с традиционными решениями за счет более интенсивного охлаждения [5].

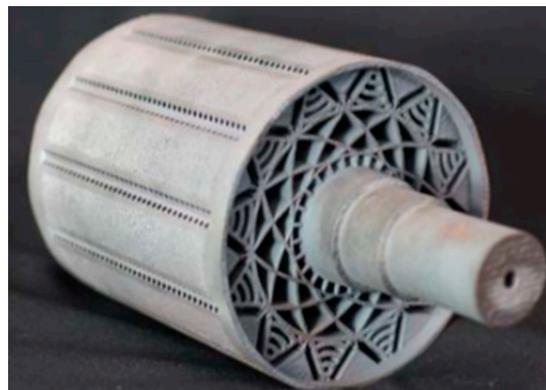


Рис. 4. Легкий ротор с системой охлаждения [5]

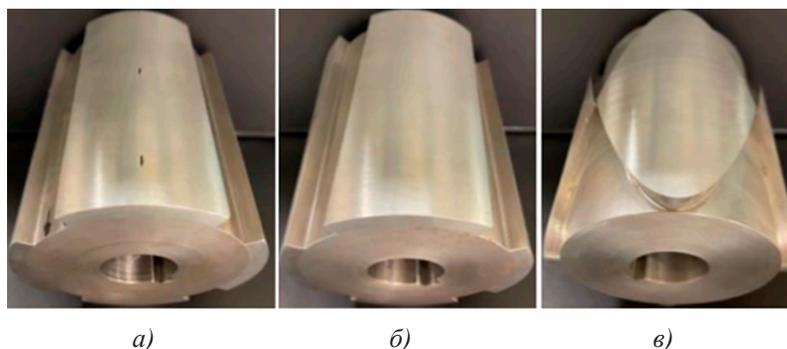


Рис. 5. Роторы с ПМ (а – прямоугольные, б – скошенные, в – в форме лепестков) [6]

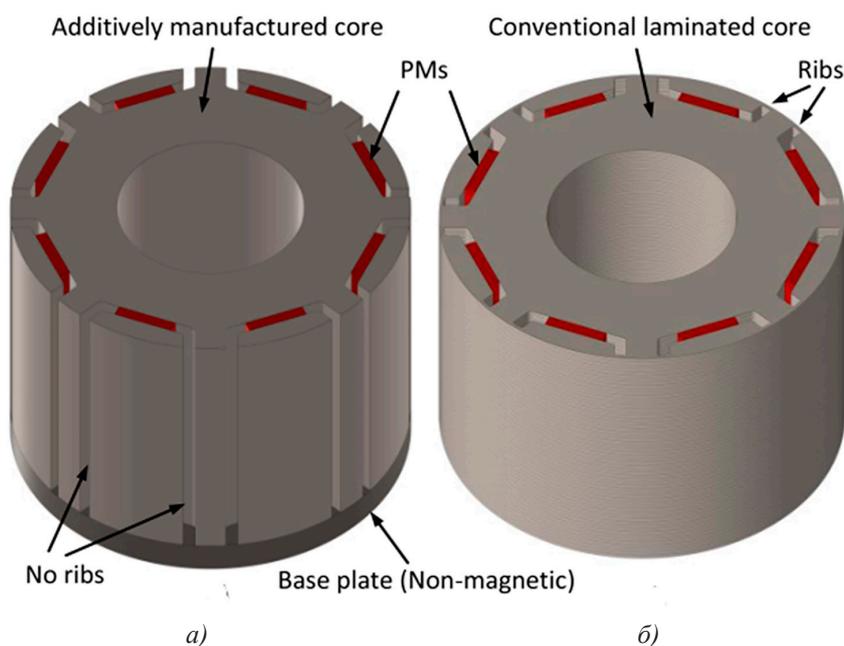


Рис. 6. Роторы с внутренним расположением ПМ (а – на основе АТ, б – базовый) [7]

В следующей статье представлены роторы с постоянными магнитами, изготовленные методом холодного напыления. Рассматриваются три типа магнитов: прямоугольной формы, скошенные и в форме лепестков (рис. 5).

Эксперименты показали, что электродвигатель с ПМ в форме лепестков демонстрирует меньшие пульсации момента по сравнению с другими образцами. Однако стоит отметить, что новая конструкция ротора с лепестковыми магнитами приводит к снижению крутящего момента более чем на 10%. Данная работа подчеркивает потенциал использования различных форм магнитов для оптимизации электродвигателей [6].

В одном из исследований авторами была представлена новая конструкция ротора без ребер с внутренним расположением постоянных магнитов, выполненная с использованием аддитивных технологий (рис. 6), и проведено сравнение с ротором базовой конструкции.

Наличие полюсных ребер необходимо для механической прочности ротора, однако они являются причиной возникновения потоков рассеяния, что негативно сказывается на эффективности работы электродвигателя. В предложенной конструкции ротор с ПМ изготавливается без ребер и печатается на немагнитной плате, которая обеспечивает механическую прочность ротора.

Параметры СДПМ

Параметр	Базовый ротор	Ротор на основе АТ
Момент, Н·м	6,1	6,6
Выходная мощность, Вт	479,1	518,4
Потери на вихревые токи в роторе, Вт	1,2	2,2
Потери в стали статора, Вт	24,9	25,1
КПД, %	83,3	84,2
Номинальная частота вращения, об/мин	750	
Потери в меди, Вт	70	

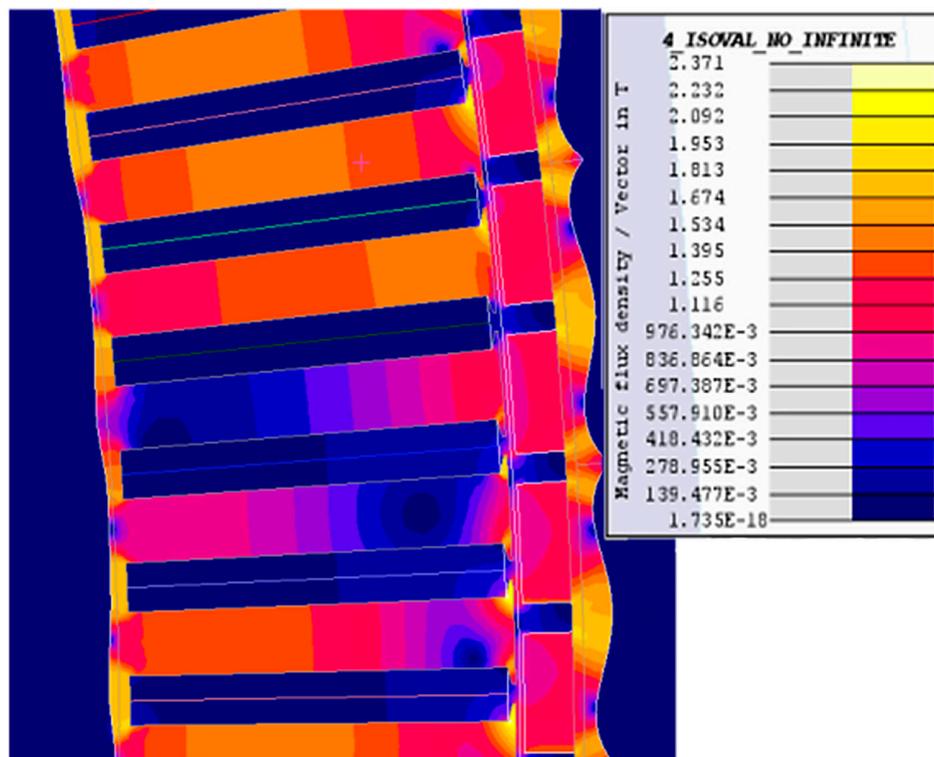


Рис. 7. Распределение индукции в генераторе с оптимизированным магнитопроводом статора и ротора [8]

Для 3D-печати ротора используется порошок Fe-Si с содержанием кремния 6,7%, что способствует повышению относительной проницаемости и удельного электрического сопротивления [7]. В таблице представлены параметры двигателя с базовой конструкцией ротора и двигателя, выполненного с применением 3D-технологий.

Следует отметить, что синхронный двигатель с предложенной конструкцией ротора демонстрирует примерно на 18% более высокие пульсации момента по сравнению с базовой моделью. Следовательно, у такого электродвигателя будут более высокие уровни шума и вибрации.

Учеными из Национальной лаборатории возобновляемых источников энергии (США) представлен новый подход к оптимизации синхронного генератора мощностью 15 МВт для ВЭУ, направленный на снижение массы при сохранении производительности [8]. Этот подход основан на применении аддитивного производства и использует кривые Безье (Bezier curves), которые широко применяются в автоматизированном геометрическом проектировании. Главной задачей оптимизации было создание максимального крутящего момента при минимальной массе электротехнической стали.

На рисунке 7 представлена оптимальная конструкция генератора, полученная в результате проведенной оптимизации с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР). Изменение формы границ магнитопроводов статора и ротора позволило снизить массу стали на 20 тонн.

Оптимизация конструкции, связанная со сложной геометрией, стала возможна благодаря применению технологии 3D-печати при производстве электрических машин. Эта технология позволяет создавать детали с высокой точностью и сложными формами, что невозможно при использовании традиционных методов производства.

### Заключение

С развитием аддитивных технологий открываются новые возможности для про-

ектирования электрических машин и оптимизации их конструкций. Эти методы производства позволяют создавать детали и узлы сложной геометрии, которые трудно или невозможно изготовить традиционными методами. Дальнейшее совершенствование аддитивных технологий даст возможность создавать еще более эффективные электрические машины, отвечающие современным требованиям электромашиностроения.

### Список литературы

1. Selema A., Van Den Abbeele J., Ibrahim M.N., Sergeant P. Novel 3D Printed Coils for High Power Density Electrical Machine and Traction Applications // IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). 2023. P. 1-5. DOI: 10.1109/IEMDC55163.2023.10239022.
2. Selema A., Van Den Abbeele J., Ibrahim M.N., Sergeant P. Innovative 3D Printed Coil and Cooling Designs for Weight-Sensitive Energy-Saving Electrical Machine // IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2023. P. 1-12. DOI: 10.1109/TTE.2023.3322522.
3. Selema A., Beretta M., Van Coppenolle M., Tiismus H., Kallaste A., Ibrahim M.N., Rombouts M., Vleugels J., Kestens L.A.I., Sergeant P. Evaluation of 3D-printed magnetic materials for additively-manufactured electrical machines // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2023. Vol. 569. P. 170426. DOI: 10.1016/j.jmmm.2023.170426.
4. Nishanth F., Goodall A.D., Todd I., Severson E.L. Characterization of an Axial Flux Machine With an Additively Manufactured Stator // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2023. Vol. 38. No. 4. P. 2717-2729. DOI: 10.1109/TEC.2023.3285539.
5. Bieber M., Haase M., Tasche F., Zibart A., Ponick B. Additively manufactured air-cooled lightweight rotor for an automotive electric motor // IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). 2023. P. I-VII. DOI: 10.1109/IEMDC55163.2023.10238918.
6. Singh S., Payarou T., Bobby M., Lamarre J.M., Bernier F., Ibrahim M., Pillay P. Cold-spray additive manufacturing of a petal-shaped surface permanent magnet traction motor // IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2023. Vol. 9. No. 3. P. 3636-3648. DOI: 10.1109/TTE.2022.3233779.
7. Ajamloo A.M., Ibrahim M.N., Sergeant P. Design Considerations of a New IPM Rotor With Efficient Utilization of PMs Enabled by Additive Manufacturing // IEEE Access. 2024. Vol. 12. P. 61036-61048. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3394739.
8. Sethuraman L., Vijayakumar G. A new shape optimization approach for lightweighting electric machines inspired by additive manufacturing. Joint MMM-Intermag Conference (INTERMAG). 2022. P. 1-7. DOI: 10.1109/INTERMAG39746.2022.9827714.