

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

**Двухлетний импакт-фактор РИНЦ – 0,494
Пятилетний импакт-фактор РИНЦ – 0,260**

*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,
56 Chapaev V.I. str.
Editorial address: 410035, Saratov,
5 Mamontovoi str.**

*Подписано в печать 30.04.2026
Дата выхода номера 29.05.2026
Формат 60×90 1/8*

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

**Signed in print 30.04.2026
Release date 29.05.2026
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 100 экз. Заказ НО 2026/1*

© 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)
Н.Ю. Стукова (N.Yu. Stukova)
М.Н. Бизенкова (M.N. Bizenkova)
Н.Е. Старчикова (N.E. Starchikova)
Т.В. Шнуровозова (T.V. Shnurovovova)

НАУЧНОЕ ОБОЗРЕНИЕ • ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

SCIENTIFIC REVIEW • TECHNICAL SCIENCES

www.science-education.ru

2026 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

СТАТЬЯ

ПОВЫШЕНИЕ МАНЕВРЕННОСТИ ПАРОТУРБИННОЙ
УСТАНОВКИ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛООВОГО НАСОСА
И ОРГАНИЧЕСКОГО ЦИКЛА РЕНКИНА

Хвостиков А. С., Рой С. А. 5

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УСТОЙЧИВАЯ УПАКОВКА ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ.
НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ БИОРАЗЛАГАЕМЫХ
МАТЕРИАЛОВ, УМНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И РОЛЬ
ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Бурак Л. Ч. 11

СТАТЬИ

АРХИТЕКТУРА МОДУЛЯ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫМ МЕЖСЕТЕВЫМ ЭКРАНОМ
В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ ФЕДЕРАЛЬНОЙ
СЛУЖБЫ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ И ЭКСПОРТНОМУ КОНТРОЛЮ

Ширяев А. И., Нажимова Н. А. 19

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВСТРАИВАЕМОЙ СИСТЕМЫ
НА ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЕ

Болдырев А. В. 25

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ
ПОТЕРЬ НИЗКОНАПОРНОЙ МИКРОГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ
ДЛЯ МАЛЫХ ВОДОТОКОВ

Сатыбалдиев А. Б., Аттокуров А. К. 33

CONTENTS

Technical sciences

ARTICLE

INCREASING THE MANEUVERABILITY OF A STEAM TURBINE
UNIT USING A HEAT PUMP AND AN ORGANIC RANKINE CYCLE

Khvostikov A. S., Roy S. A. 5

REVIEW

SUSTAINABLE FOOD PACKAGING. NEW DEVELOPMENTS
IN THE FIELD OF BIODEGRADABLE MATERIALS, SMART
TECHNOLOGIES AND THE ROLE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Burak L. Ch. 11

ARTICLES

ARCHITECTURE OF A CENTRALIZED MANAGEMENT
MODULE FOR A MULTIFUNCTIONAL NETWORK
FIREWALL COMPLIANT WITH FEDERAL SERVICE
FOR TECHNICAL AND EXPORT CONTROL REQUIREMENTS

Shiryaev A. I., Nazhimova N. A. 19

MODELING OF AN EMBEDDED SYSTEM ON A PROGRAMMABLE
LOGIC INTEGRATED CIRCUIT

Boldyrev A. V. 25

MODELING AND OPTIMIZATION OF HYDRAULIC LOSSES
IN A LOW-HEAD MICRO-HYDROPOWER PLANT FOR SMALL
WATERCOURSES

Satybaldyev A. B., Attokurov A. K. 33

СТАТЬЯ

УДК 621.165



CC BY 4.0

**ПОВЫШЕНИЕ МАНЕВРЕННОСТИ ПАРОТУРБИНОЙ
УСТАНОВКИ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛООВОГО НАСОСА
И ОРГАНИЧЕСКОГО ЦИКЛА РЕНКИНА****Хвостиков А. С. ORCID ID 0000-0002-9097-4487,****Рой С. А.**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет», Комсомольск-на-Амуре,
Российская Федерация, e-mail: knastu@list.ru*

Целью исследования является повышение эффективности паросиловых турбинных установок с помощью применения тепловых насосов и органического цикла Ренкина. В ходе обзора литературных источников выявлено, что наибольшие потери, до половины энергии паротурбинных энергетических установок, составляют потери энергии на конденсацию. Существуют сложности в эффективности охлаждения конденсатора для поддержания вакуума в конденсаторе. В ходе расчета тепловых схем паротурбинных установок выявлено, что ограничением по применению тепловых насосов является график теплового потребления. Предложение для расширения технологических возможностей паротурбинных установок заключается в объединении теплового насоса и органического цикла Ренкина, разработаны схемы внедрения абсорбционного и компрессионного тепловых насосов в схему паротурбинных установок. Тепловой насос, используя низкопотенциальное тепло конденсатора, подогревает рабочее тело органического цикла Ренкина или сетевую воду в требуемых объемах. Тепловые насосы в системе теплоснабжения могут применяться не только в летний режим, но и в переходный (осенний/весенний), когда температура прямой сетевой воды не такая высокая, как в зимний отопительный период. В летние месяцы основное повышение эффективности достигается за счет увеличения вакуума конденсатора, в результате чего увеличивается теплоперепад и, следовательно, эффективность турбоагрегата. В результате численного исследования тепловых насосов в составе паротурбинных установок было выявлено, что применение абсорбционного теплового насоса повышает эффективность выработки тепловой и электрической энергии, эффективность применения компрессионных тепловых насосов зависит от режимных параметров. Использование теплового насоса для подогрева рабочего тела органического цикла Ренкина повышает общую энергетическую эффективность и маневренность турбоустановок.

Ключевые слова: паротурбинная установка, энергоэффективность, низкопотенциальное тепло, конденсатор, органический цикл Ренкина, тепловой насос

**INCREASING THE MANEUVERABILITY
OF A STEAM TURBINE UNIT USING A HEAT PUMP
AND AN ORGANIC RANKINE CYCLE****Khvostikov A. S. ORCID ID 0000-0002-9097-4487,****Roy S. A.**

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Komsomolsk-on-Amur State University”, Komsomolsk-on-Amur,
Russian Federation, e-mail: knastu@list.ru*

The aim of the study is to increase the efficiency of steam-powered turbine installations by using heat pumps and the organic Rankine cycle. A review of the literature revealed that the greatest losses, up to half of the energy of steam turbine power plants, are energy losses due to condensation. There are difficulties in the cooling efficiency of the condenser to maintain the vacuum in the condenser. During the calculation of the thermal schemes of steam turbine installations, it was revealed that the limitation on the use of heat pumps is the schedule of heat consumption. The proposal to expand the technological capabilities of steam turbine plants is to combine a heat pump and an organic Rankine cycle, and schemes have been developed for the introduction of absorption and compression heat pumps into the scheme of steam turbine plants. The heat pump, using the low-potential heat of the condenser, heats the working fluid of the organic Rankine cycle or mains water in the required volumes. Heat pumps in the heat supply system can be used not only in the summer mode, but also in the transitional (autumn / spring), when the temperature of the direct mains water is not as high as in the winter heating period. In the summer months, the main increase in efficiency is achieved by increasing the vacuum of the condenser, which increases the heat transfer and, consequently, the efficiency of the turbine unit. As a result of a numerical study of heat pumps in steam turbine installations, it was found that the use of an absorption heat pump increases the efficiency of heat and electric energy generation, while the efficiency of compression heat pumps depends on operating parameters. The use of a heat pump to heat the working fluid of the organic Rankine cycle increases the overall energy efficiency and maneuverability of turbine installations.

Keywords: steam turbine installation, energy efficiency, low-potential heat, condenser, organic Rankine cycle, heat pump

Введение

Повышение эффективности работы энергетического оборудования является важной задачей в формировании цен на отпуск энергии потребителям. Уровень себестоимости тепловой и электрической энергии влияет на тарифы для населения и на издержки промышленных предприятий, что, в свою очередь, определяет себестоимость выпускаемой ими продукции. Поэтому поиск и реализация способов повышения энергетической эффективности энергоустановок является важной задачей, влияющей на формирование тарифов на энергию для потребителей.

Наиболее массовым видом энергетического оборудования остаются в нашей стране паротурбинные установки. Активно применяются также газотурбинные установки. Коэффициент полезного действия паротурбинных установок конденсационного типа достигает 37%, теплофикационного типа – 55%, эффективность газотурбинных установок достигает 45%, эффективность комбинированного парогазового цикла может достигать 65%.

Для выявления путей повышения эффективности паротурбинных установок произведем анализ энергетических потерь паротурбинных установок. Наиболее популярные решения при повышении эффективности паротурбинных установок – повышение начальных параметров пара. Однако этот метод требует значительного изменения конструкции энергоблока и применения дорогостоящих материалов [1]. Наибольшие потери, до половины энергии паротурбинных энергетических установок, составляют потери энергии на конденсацию. Следующие по величине потери с уходящими газами, около 10%. Трудность использования этих потерь состоит в их низком потенциале. Температура технической воды после охлаждения конденсатора не превышает 40 °С. Температура уходящих газов достигает 150 °С, но они содержат водяные пары и оксиды серы, которые при охлаждении образуют серную кислоту, разрушающую оборудование.

Рассмотрим пути возврата низкопотенциальной теплоты и использование ее для производства полезной энергии. Утилизацию низкопотенциальной теплоты выполняют с помощью тепловых насосов [2] и органического цикла Ренкина [3]. Использование тепловых насосов позволяет найти пути использования низкопотенциального тепла при затрате меньшего количества высокопотенциальной энергии [4]. Ограничением по применению тепло-

вых насосов является график теплового потребления. При отсутствии теплового потребления эффективность использования паротурбинных установок снижается. С помощью органического цикла Ренкина возможно производство электрической энергии с использованием низкопотенциального источника тепла. Существуют проекты по использованию производственных и теплофикационных отборов для подогрева органического рабочего тела, что снизит отбор пара в конденсатор и повысит эффективность паротурбинной установки [5]. Рассмотрим эффективность работы этих способов утилизации теплоты.

Выброс тепловой энергии в атмосферу вызывает тепловое загрязнение [6]. При этом охлаждение конденсатора требует значительных объемов воды. Существуют сложности в эффективности охлаждения конденсатора для поддержания вакуума в конденсаторе. Ограничение использования технической воды для охлаждения конденсатора существует не только в городской среде, но и в отдаленных заповедных территориях [7].

Цель исследования – повышение эффективности паросиловых турбинных установок с помощью применения тепловых насосов и органического цикла Ренкина. Тепловые насосы позволяют использовать низкопотенциальное тепло конденсатора паротурбинной установки для подогрева сетевой воды и органического цикла Ренкина. Использование органического цикла Ренкина позволяет исключить работу паровой турбины в области влажного пара.

Материалы и методы исследования

Работа основана на анализе и теоретических исследованиях. Теоретические расчеты выполнены с помощью решения балансовых уравнений тепловых схем паросиловых турбинных установок с тепловыми насосами. Тепловые насосы утилизируют низкопотенциальное тепло конденсатора и нагревают сетевую воду и рабочее тело органического цикла Ренкина.

Результаты исследования и их обсуждение

Тепловые насосы подразделяются на компрессионные и абсорбционные. Принцип действия компрессионных тепловых насосов заключается в реализации обратного цикла Карно. В теплообменнике происходит подогрев рабочего тела с помощью низкопотенциального источника тепла. В качестве низкопотенциального тепла выбрано тепло конденсатора, удаляемого в атмосферу. В результате подогрева рабо-

чее тело – хладагент испаряется при низком давлении. После чего с помощью компрессора газообразное рабочее тело сжимается, в результате чего его температура увеличивается, и в теплообменнике отдают высокопотенциальное тепло. После расширения в дроссельном устройстве рабочее тело возвращается в цикл [8]. В абсорбционном тепловом насосе используется тепловая энергия вместо механической, используемой в компрессионном. Подвод теплоты осуществляется в два этапа: низкопотенциального в испаритель и греющего в генератор. Полезное тепло забирается последовательно сначала через абсорбер и после в конденсаторе [9].

Повышение эффективности компрессионного теплового насоса возможно с помощью применения промежуточного теплообменника, использующего производимое тепло для начального подогрева теплоносителя [10]. Применение компрессионного теплового насоса позволяет экономить энергию, затрачиваемую на производство тепловой энергии. Однако исследователи, выполняя расчеты, выполняют оценку эффективности работы насоса отдельно от энергетической установки. Электрическая энергия, используемая для привода компрессора, обладает большей эксергией, чем производимое ей тепло. При расчете эффективности энергоустановки увеличение показателей эффективности получается только при значительном увеличении теплового потребления и увеличении доли низкопотенциального теплового потребления, что требует изменения устройства конденсатора [7].

Работа абсорбционного теплового насоса основана на тепловом потреблении. В качестве источника теплового потребления могут использоваться теплофикационные отборы пара, и при изменении схемы работы вызывает уменьшение расхода пара на турбоустановку и общее повышение эффективности работы, даже при малом теплофикационном потреблении. Абсорбционные тепловые насосы более сложны и требуют агрегатов больших размеров.

Применение тепловых насосов наиболее целесообразно в летние месяцы. Из-за сложности охлаждения конденсатора требуется дополнительное охлаждение, определенную нагрузку может взять на себя тепловой насос. Однако в летние месяцы потребление тепловой энергии незначительно и требуются другие тепловые потребители [11]. Для организации дополнительного охлаждения применяют системы с дополнительным охлаждением [12].

Принцип работы энергетической установки на органическом цикле Ренкина аналогичен паротурбинному циклу, за исключением того, что в качестве рабочего тела используются жидкости с более низкими температурами кипения. Эффективный минимум использования органического цикла Ренкина начинается со 100 °С, и такие турбоустановки используют в основном на геотермальных электростанциях [13]. Эффективность турбоустановки зависит от величины теплоперепада. Для увеличения теплоперепада и, следовательно, повышения эффективности необходимо повышать начальные параметры или снижать конечные параметры. Значение конечных параметров ограничено температурой охлаждающей среды. Для снижения температуры применяют охлаждение холодным воздухом в зимнее время года. Повышение температуры возможно с помощью дополнительного подогрева [14].

Предложение для расширения технологических возможностей паротурбинных установок заключается в объединении теплового насоса и органического цикла Ренкина. Тепловой насос, используя низкопотенциальное тепло конденсатора, подогревает рабочее тело органического цикла Ренкина или сетевую воду в требуемых объемах, позволяя использовать низкопотенциальное тепло конденсатора и уменьшая тепловое загрязнение.

Суть предлагаемых усовершенствований поясняется на рис. 1. Пароводяной цикл повторяет стандартную теплофикационную паротурбинную установку, за исключением того, что теплофикация осуществляется не с помощью сетевых подогревателей, а с помощью абсорбционного теплового насоса. Часть тепла отбирается из конденсатора, а часть тепла из теплофикационных отборов. Тем самым уменьшается величина отборов пара на конденсацию при сохранении величины теплофикации. Также для устранения тепловых потерь и снижения отборов на конденсатор теплофикационные отборы подогревают органический цикл Ренкина.

Для определения технико-экономических показателей предлагаемого внедрения был выполнен предварительный расчет установки. Для этого приняты следующие характеристики: тепловая мощность теплового насоса – 25 МВт; температура охлаждающей воды – 30 °С; температура охлажденной воды 25 °С; давление греющего пара – 0,25 МПа; температура конденсации – 70 °С; температура слабого раствора на выходе из абсорбера – 60 °С; высшая температура кипения раствора в генераторе – 115 °С.

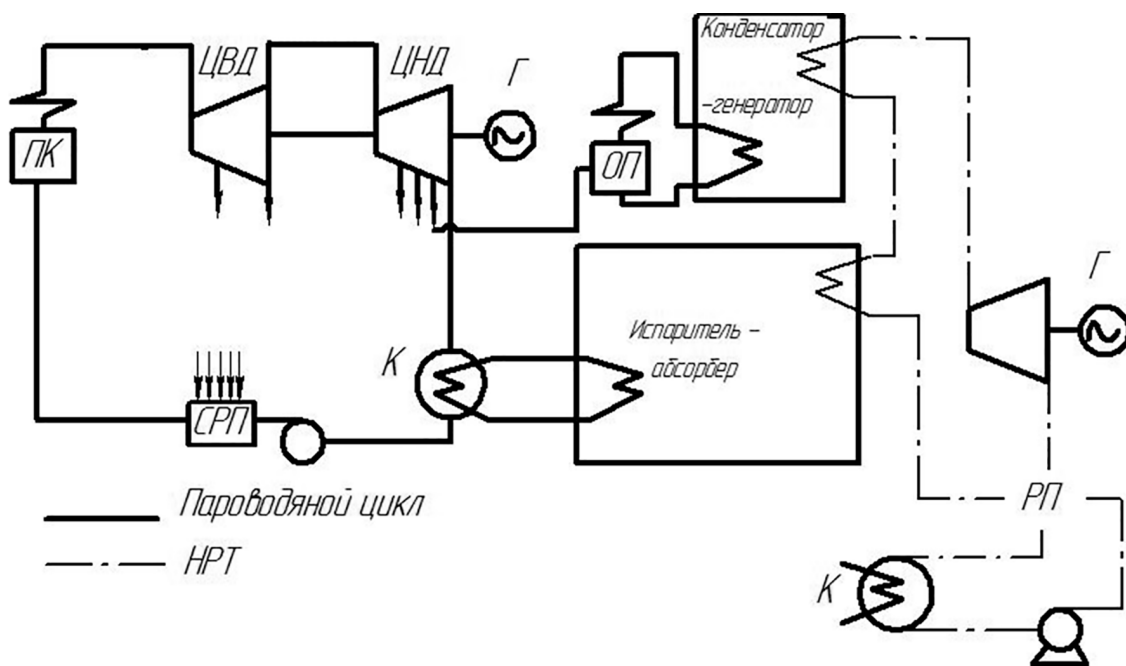


Рис. 1. Схема подогрева рабочего тела органического цикла Ренкина при помощи абсорбционного теплового насоса: ПК – паровой котел, СРП – система регенеративного подогрева, ЦВД и ЦНД – цилиндры высокого и низкого давления, К – конденсатор, РП – регенеративный подогреватель ОЦР, ОП – подогреватель теплового насоса органического цикла
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

В результате расчета абсорбционного бромисто-литиевого теплового насоса на подогрев сетевой воды и рабочего тела (аммиак) органического цикла Ренкина до температуры $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ были получены показатели и расходы рабочего тела абсорбционного теплового насоса. Тепловой коэффициент машины составил 1,77. Соотношение подведенной теплоты к общей тепловой нагрузке на машину составило 56 % что позволяет значительно экономить энергию топлива на теплофикацию.

Как известно, эффективность энергоустановки зависит от режимных параметров. Экономия тепловой энергии на теплофикацию вызывает увеличение отборов в конденсатор, и эффективность выработки электрической энергии снижается. Общие энергетические показатели, такие как коэффициент использования топлива, расход тепла, пара и топлива, при этом снижаются. Дальнейшее увеличение эффективности происходит при увеличении отборов на теплофикацию. Однако соотношение тепловой и электрической энергии задается оператором и, особенно в летние месяцы, не может обеспечить требуемых отборов. Повышение эффективности возможно использованием теплового насоса для подогрева рабочего тела органического цикла Ренкина.

Тепловые насосы в системе теплоснабжения ТЭЦ могут применяться не только в летний режим, но и в переходный (осенний/весенний), когда температура прямой сетевой воды не такая высокая, как в зимний отопительный период. В зимние месяцы и переходные осенние и весенние эффективность достигается увеличенным количеством тепловых насосов и снижением пара на тепловое потребление за счет используемой сбросной теплоты конденсатора в соотношении 56 % к 44 %. В летние месяцы основное повышение эффективности достигается за счет увеличения вакуума конденсатора, в результате чего увеличивается теплоперепад и, следовательно, эффективность турбоагрегата (рис. 2).

На летнем режиме замещение сетевого подогревателя тепловым насосом дает прирост КПД по производству электроэнергии 1,7 %, прирост электрической мощности 0,293 МВт, уменьшение удельного расхода условного топлива на $8,41\text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ и удельного расхода пара на $0,08\text{ кг}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$, циркуляционная вода охлаждается на $0,51\text{ }^{\circ}\text{C}$ (число мало из-за больших объемов воды – 18600 т/ч), а также улучшается вакуум в конденсаторе на 0,25 кПа.

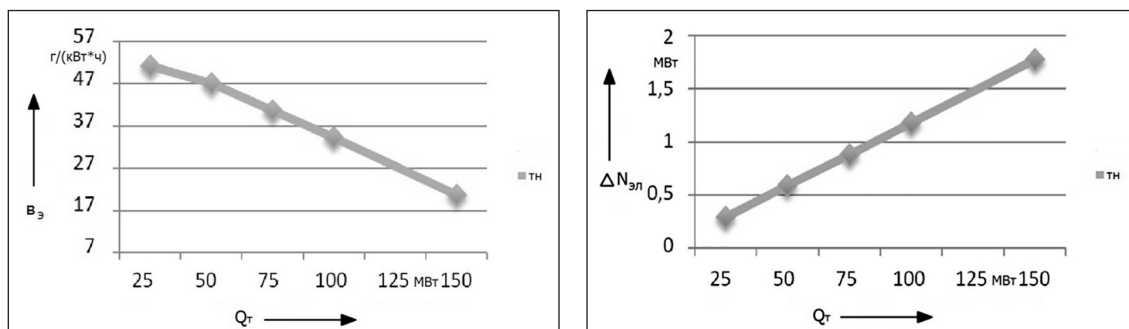


Рис. 2. Снижение удельного расхода условного топлива а) и прироста выработки электрической мощности б) в зависимости от тепловой нагрузки

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

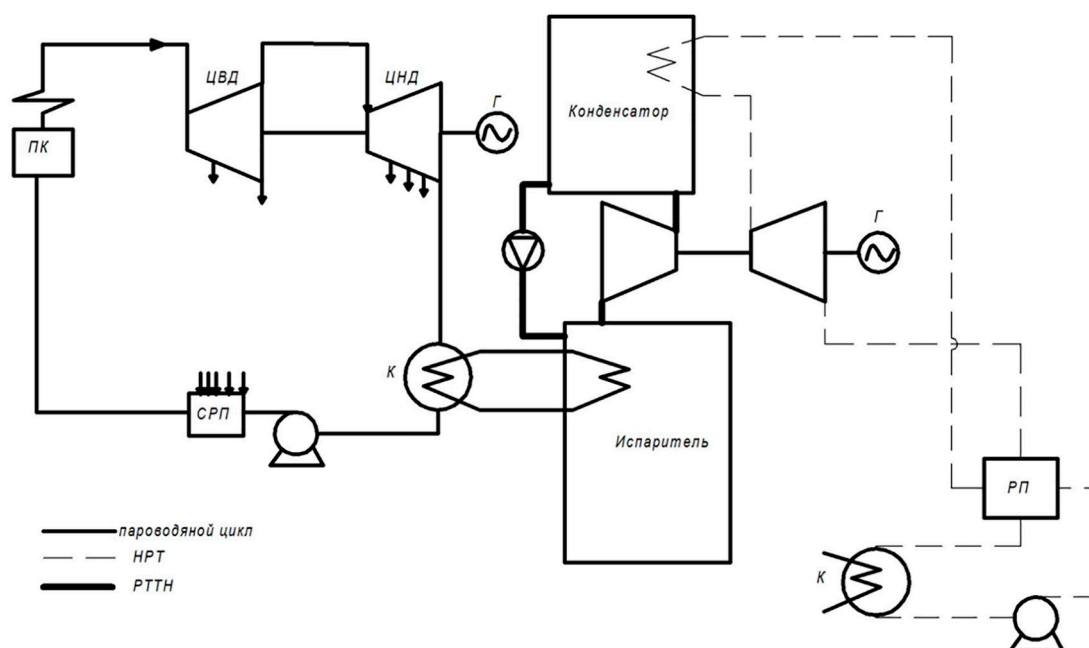


Рис. 3. Схема утилизации тепла в конденсаторе при помощи парокомпрессионного теплового насоса: ПК – паровой котел, СРП – система регенеративного подогрева, ЦВД и ЦНД – цилиндры высокого и низкого давления, К – конденсатор, РП – регенеративный подогреватель ОЦР

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Дальнейшее повышение эффективности в летние месяцы возможно за счет использования тепловых насосов для подогрева рабочего тела органического цикла Ренкина. Перевод выработки электрической энергии с парового цикла на органический исключает работу турбины на влажном паре и повышает ее эффективность.

Производство электроэнергии на утилизации тепловой энергии возможно и для парокомпрессионного теплового насоса. Тепловая схема предлагаемой работы представлена на рис. 3. Рабочий агент парокомпрессионного теплового насоса, получив теплоту от конденсатора, сжимается ком-

прессором и подается в конденсатор теплового насоса с высокими показателями температуры и давления. Отдавая теплоту, низкикипящее рабочее тело проходит органический цикл Ренкина, аналогичный предыдущей схеме. Энергия на компрессор может отбираться напрямую от турбины. Часть энергии, выработанной в турбине НРТ, уходит в компрессор теплового насоса.

Согласно расчетам работа турбины на органическом цикле Ренкина имеет более высокий коэффициент полезного действия, благодаря работе в области сухого пара. Сжатие пара требует меньшего количества энергии по сравнению с непосредственным

подогревом. Однако расчет общей тепловой схемы дает обобщенные показатели с меньшими значениями расхода пара и коэффициента использования топлива. Только в определенные режимы с большим потреблением тепловой энергии можно получить незначительное повышение эффективности. Поэтому применение парокompрессионного теплового насоса для выработки тепла и электрической энергии с помощью органического цикла Ренкина нецелесообразно. Снижение эффективности можно объяснить использованием электрической энергии, с более высокими показателями эксергии, для выработки тепловой энергии, с более низкими показателями эксергии [15].

Заключение

В результате численного исследования тепловых насосов в составе паротурбинных установок было выявлено, что применение абсорбционного теплового насоса повышает эффективность выработки тепловой и электрической энергии, эффективность применения компрессионных тепловых насосов зависит от режимных параметров. Использование теплового насоса для подогрева рабочего тела органического цикла Ренкина повышает общую энергетическую эффективность и маневренность турбоустановок.

Список литературы

1. Шаломов В. И. Оценка эффективности применения повышающих 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. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44051401> (дата обращения: 13.01.2025). DOI: 10.17084/20764359_2020_49_4.
2. Курнакова Н. Ю., Нуждин А. В., Волхонский А. А. О возможности повышения энергоэффективности тепловой схемы ТЭС с применением теплового насоса // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7 (138). С. 114–122. URL: https://journals.istu.edu/vestnik_irtgu/journals/2018/07/articles/09 (дата обращения: 13.01.2025). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-114-122.
3. Карабарин Д. И. Оценка влияния изменения режимных параметров органического цикла Ренкина при изменении внешних // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 17. № 8. С. 1019–1027. URL: <http://journal.sfu-kras.ru/number/154301> (дата обращения: 13.01.2025).
4. Романюк В. Н., Бобич А. А. Время применения абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов на ТЭЦ Беларуси // Энергия и менеджмент. 2017. № 2 (95). С. 2–5. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48214814> (дата обращения: 13.01.2025).
5. Карабарин Д. И., Михайленко С. А. Использование низкопотенциальных источников энергии на основе органического цикла Ренкина // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 11. № 7. С. 867–876. URL: <http://journal.sfu-kras.ru/number/109144> (дата обращения: 13.01.2025). DOI: 10.17516/1999-494X-0101. EDN: YPMTCP.
6. Аковецкий В. Г. Геоэкологические проблемы изменения климата: причины и следствие // Научный журнал Российского газового общества. 2022. № 2 (34). С. 14–31. URL: <https://gazo.ru/ru/media/publications/nauchnyy-zhurnal-rgo-2-2022/> (дата обращения: 13.01.2025). DOI: 10.55557/2412-6497-2022-2-14-30. EDN: JQMNQO.
7. 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. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53971266> (дата обращения: 13.01.2025). DOI: 10.17084/20764359-2023-67-28. EDN: IJCPFH.
8. Хвостиков А. С., Дыкер Д. К. Утилизация низкопотенциального тепла на тепловых электростанциях // Энергосбережение и водоподготовка. 2021. № 3 (131). С. 37–41. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46168940> (дата обращения: 13.01.2025).
9. Нечаев А. В., Гришкова А. В. Применение абсорбционных тепловых насосов на паротурбинных ТЭЦ // Молодежный научный вестник. 2018. № 6 (31). С. 119–127. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=uvpgrg> (дата обращения: 13.01.2025).
10. Абильдинова С. К., Мусабеков Р. А., Расмухаметова А. С., Чичерин С. В. Оценка энергетической эффективности цикла теплового насоса со ступенчатым сжатием // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2019. Т. 62. № 3. С. 293–302. URL: <https://energy.bntu.by/jour/article/view/1671> (дата обращения: 13.01.2025).
11. Маслов В. И., Куделько А. Р. Разработка направлений повышения эффективности инновационной деятельности по энергетическому обеспечению социальной сферы Хабаровского края // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2024. № 1 (73). С. 75–81. URL: <https://www.uzknastu.ru/archive/2024/73> (дата обращения: 13.01.2025).
12. Шадек Е. Г., Маршак Б. И., Крыкин И. Н., Блинов А. Н. Тригенерационный энергокомплекс на низкокипящих теплоносителях // Энергосбережение. 2015. № 5. С. 58–72. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23769760> (дата обращения: 13.01.2025).
13. Голубева Л. Ф., Григорьева О. К., Францева А. А. Применение фреоновых технологий на тепловых электрических станциях // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2016. № 4 (65). С. 164–174. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28152101> (дата обращения: 13.01.2025). DOI: 10.17212/1814-1196-2016-4-164-174.
14. Щинников П. А., Францева А. А., Садкин И. С. По-агрегатная оценка капиталовложений в энергоблоки электростанций с использованием параметрической степенной функции // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2020. № 2–3 (79). С. 123–138. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44228017> (дата обращения: 13.01.2025). DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-123-138.
15. Романюк В. Н., Бобич А. А., Рыжова Т. В., Бубыр Т. В., Янчук В. В., Яцухно Я. С. Оценка термодинамической эффективности Объединенной энергетической системы Беларуси. Ч. 2 // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2023. Т. 66. № 2. С. 141–157. URL: <https://energy.bntu.by/jour/article/view/2254> (дата обращения: 13.01.2025). DOI: 10.21122/1029-7448-2023-66-2-141-157.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 664.8



CC BY 4.0

**УСТОЙЧИВАЯ УПАКОВКА ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ.
НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ
БИОРАЗЛАГАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ, УМНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
И РОЛЬ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

Бурак Л. Ч. ORCID ID 0000-0002-6613-439X

*Общество с ограниченной ответственностью «Белросаква», Минск,
Республика Беларусь, e-mail: leonidburak@gmail.com*

Традиционные одноразовые пластиковые изделия создают экологические проблемы, включая накопление отходов и истощение ресурсов. Научное сообщество активно ищет альтернативы, которые обеспечивают баланс между функциональностью, стоимостью и экологической устойчивостью. Цель исследования заключается в анализе последних достижений в области устойчивой упаковки продуктов питания, с акцентом на биоразлагаемые, компостируемые и перерабатываемые материалы, а также интеграцию активных и интеллектуальных упаковочных систем. В работе использованы научные публикации на русском и английском языках, изданные в период с 2020 по 2025 г. Зарубежные исследования были подобраны через базы данных Scopus, PubMed и Web of Science, в то время как русскоязычные материалы были отобраны из РИНЦ на основе релевантных ключевых запросов. Выбранные источники были структурированы, подвергнуты критической оценке и обобщены. Анализ результатов научных исследований показал, что устойчивая упаковка продуктов питания приобретает все большее значение на фоне растущего внимания к экологическим проблемам, пищевым отходам и безопасности. Хотя традиционная пластиковая упаковка долгое время оставалась эффективной, она значительно способствует загрязнению окружающей среды и зависит от невозобновляемых ресурсов. Обзор освещает инновации в материалах, таких как биополимеры, пленки на основе целлюлозы, покрытия из водорослей и наноматериалы, предлагая экологически чистые альтернативы, которые сохраняют основные функции упаковки. Активные и интеллектуальные упаковочные технологии улучшают сохранность продуктов благодаря антимикробным и антиоксидантным агентам, а также позволяют осуществлять мониторинг свежести в реальном времени с помощью встроенных датчиков. Технологии искусственного интеллекта, включая машинное обучение, способствуют оптимизации выбора материалов, прогнозированию срока хранения и контролю качества через анализ данных. Синергия между экологически чистыми материалами и цифровыми технологиями трансформирует сферу упаковки пищевых продуктов, предлагая перспективный путь к снижению воздействия на окружающую среду, повышению безопасности пищевых продуктов и улучшению операционной эффективности на протяжении всей цепочки поставок.

Ключевые слова: упаковка, биоразлагаемые материалы, активные упаковочные системы, безопасность, пищевые отходы, биополимеры, наноматериалы, искусственный интеллект

**SUSTAINABLE FOOD PACKAGING.
NEW DEVELOPMENTS IN THE FIELD OF BIODEGRADABLE
MATERIALS, SMART TECHNOLOGIES
AND THE ROLE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE**

Burak L. Ch. ORCID ID 0000-0002-6613-439X

*Limited Liability Company “Belrosakva”, Minsk, Republic of Belarus,
e-mail: leonidburak@gmail.com*

Traditional single-use plastic products create environmental problems, including waste accumulation and resource depletion. The scientific community is actively seeking alternatives that balance functionality, cost, and sustainability. The purpose of this study is to review recent advances in sustainable food packaging, with a focus on biodegradable, compostable and recyclable materials, and the integration of active and intelligent packaging systems. The work uses scientific publications in Russian and English, published in the period from 2015 to 2025. Foreign studies were selected through the Scopus, PubMed and Web of Science databases, while Russian-language materials were selected from the RSCI based on relevant key queries. The selected sources were structured, critically appraised and synthesized. An analysis of research findings showed that sustainable food packaging is becoming increasingly important amid growing attention to environmental issues, food waste and safety. Although traditional plastic packaging has long remained effective, it contributes significantly to environmental pollution and relies on non-renewable resources. The review highlights innovations in materials such as biopolymers, cellulose-based films, algae coatings and nanomaterials, offering environmentally friendly alternatives that retain the core functions of packaging. Active and intelligent packaging technologies improve food preservation through antimicrobial and antioxidant agents and enable real-time freshness monitoring using built-in sensors. Artificial intelligence technologies, including machine learning, help optimize material selection, predict shelf life and quality control through data analysis. Ultimately, the synergy between sustainable materials and digital technologies is transforming the food packaging industry, offering a promising path to reducing environmental impact, improving food safety and improving operational efficiency throughout the supply chain.

Keywords: packaging, biodegradable materials, active packaging systems, safety, food waste, biopolymers, nanomaterials, artificial intelligence

Введение

Глобальный спрос на экологически безопасную упаковку для пищевых продуктов растет на фоне экологических рисков, связанных с одноразовыми пластиками, и повышения осведомленности потребителей о загрязнении окружающей среды [1, 2]. В ответ на это промышленность и научное сообщество развивают альтернативные решения, которые должны одновременно обеспечивать барьерную защиту, безопасность пищевых продуктов, технологичность производства и приемлемую стоимость, не увеличивая экологическую нагрузку [3]. Под устойчивой упаковкой обычно понимают материалы и технологические подходы, снижающие образование отходов, углеродный след и повышающие пригодность к переработке или биоразложению [4, 5]. Наиболее быстро развиваются направления биоразлагаемых и компостируемых полимеров (например, PLA и PHA), съедобных покрытий, целлюлозных и комбинированных барьерных материалов [6–8]. Существенный вклад в повышение функциональности упаковки вносит наномодификация (нанонаполнители, наночастицы металлов/оксидов, наноцеллюлоза), позволяющая улучшать механические характеристики, газо- и влагобарьер, УФ-защиту, а также антимикробные свойства [9–11]. Одновременно усиливается тренд на развитие аналитических и сенсорных решений для контроля качества и безопасности пищевых продуктов в реальном времени (в том числе спектроскопические и сенсорные платформы) [12–14]. Отдельный пласт инноваций – активная и интеллектуальная упаковка. Активные решения направлены на изменение среды внутри упаковки (например, поглощение кислорода/влаги, контролируемый выпуск антиоксидантов/антимикробных веществ) и тем самым продлевают срок годности [15, 16]. Интеллектуальная упаковка, напротив, в основном не меняет продукт, но информирует о его состоянии: используются индикаторы температуры-времени (TTI), pH/газочувствительные метки, колориметрические датчики, RFID/NFC и цифровые каналы считывания [17–19]. В длинных цепях поставок, где критичны колебания температуры и времени транспортировки, такие решения особенно значимы для сокращения пищевых потерь [20]. На этом фоне искусственный интеллект (ИИ) становится ключевым интегрирующим инструментом: он применяется для оптимизации конструкций упаковки, прогнозирования порчи/срока годности, обработки сигналов сенсоров, компьютерного зрения

на линиях контроля качества и логистической аналитики [21–23]. Несмотря на рост числа обзоров, сохраняются ограничения: часто рассматриваются отдельные группы материалов или технологий без системной увязки «материал → функция → риски → утилизация», а также недостаточно полно обсуждаются вопросы промышленной масштабируемости, нормативного регулирования и данных, необходимых для эффективного внедрения ИИ [3, 11, 24].

Цель исследования – анализ последних достижений в области устойчивой упаковки продуктов питания, с акцентом на биоразлагаемые, компостируемые и перерабатываемые материалы, а также интеграцию активных и интеллектуальных упаковочных систем.

Материалы и методы исследования

Обзор выполнен на основе публикаций 2020–2025 гг. на русском и английском языках. Поиск проводился по ключевым словам, объединяющим тематику устойчивой упаковки, биополимеров (PLA, PHA, крахмал, целлюлоза, хитозан), наноматериалов (AgNPs, ZnO, TiO₂, CuO, наноцеллюлоза), активной/интеллектуальной упаковки (oxygen scavenger, TTI, freshness indicator, pH sensor, RFID/NFC), а также ИИ/ML (shelf-life prediction, machine learning, computer vision, supply chain, migration prediction). В процессе отбора научных публикаций приоритет отдавали экспериментальным и обзорным научно значимым исследованиям последних лет, которые обладали явными практическими метриками (барьерные/механические свойства, антимикробный эффект, точность ML-моделей).

Результаты исследования и их обсуждение

1. Инновации в материалах устойчивой упаковки

Биополимеры (полисахариды, белки, полимеры микробного происхождения) формируют основу «зеленой» замены нефтехимическим пластикам. Преимущества биополимеров – возобновляемое сырье, потенциальная биоразлагаемость/компостируемость, возможность модификации состава и структуры под задачу [5, 6, 8]. PLA остается наиболее коммерчески доступным биополимером: он технологичен, пригоден для термоформования и промышленного компостирования, но исходно характеризуется хрупкостью и ограниченной термостойкостью, из-за чего требует пластификации, наполнителей или сополимеризации [7, 25]. PHA перспективны благодаря био-

разложению в различных средах, однако пока ограничены высокой стоимостью производства и вариабельностью свойств [8, 26]. Материалы на основе крахмала привлекают доступностью, но имеют слабые влагобарьерные характеристики и требуют композитирования/модификации для практической упаковки [6]. Белково-полисахаридные системы и съедобные покрытия часто дают хорошие кислородные барьеры, но критически зависят от влажности и нуждаются в структурном усилении [27]. Полисахариды морских водорослей (например, альгинат), хитозан и желатин широко рассматриваются как основа съедобных/биоразлагаемых пленок и покрытий, включая варианты с биоактивностью [28, 29]. Для морских биополимеров типичны проблемы воспроизводимости сырья, влагочувствительности и логистики поставок биомассы [28]. Тем не менее показаны прикладные эффекты, включая сохранение качества рыбы/морепродуктов при низких температурах при использовании активных пленок [29]. Существенная часть экологического эффекта упаковки определяется не только материалом, но и инфраструктурой обращения с отходами [30]. Развитие технологий переработки ПЕТ и использование переработанных волокон/картона позволяют снижать потребление первичного сырья и энергоемкость жизненного цикла [31, 32]. Одновременно растет интерес к возобновляемым биоматериалам из отходов агропроизводства (например, на основе багассы) как к масштабируемым низкоуглеродным решениям [33, 34]. Однако даже «зеленые» материалы могут терять экологическое преимущество при несоответствии реальным

сценариям утилизации (смешанные потоки, загрязнение, отсутствие компостных мощностей). Поэтому при проектировании важно учитывать «end-of-life» уже на этапе выбора структуры и добавок [35, 36].

Наноматериалы и наноармирование: функциональность и риски

Наноармирование (наноцеллюлоза, наноглины, оксиды металлов, наночастицы Ag, ZnO, TiO₂, CuO, MOF-наполнители) повышает барьерные и механические свойства, а также позволяет вводить антимикробные и сенсорные функции [9–11]. Например, нанокompозиты с AgNPs демонстрируют выраженную антимикробную активность и улучшение барьерных характеристик, но критически важны вопросы миграции и токсикологической оценки [10, 12, 37]. ZnO-наночастицы часто рассматриваются как многофункциональная добавка (антимикробность, УФ-защита), однако стабильность систем с эфирными маслами и промышленная воспроизводимость требуют дополнительной отработки [38–40]. TiO₂ может обеспечивать антимикробный эффект и УФ-защиту, но существуют риски фотокаталитической дегградации матрицы и необходимость строгого контроля миграции/дозировок [41–43]. Для CuO-платформ характерны сильные антимикробные свойства, но сохраняются вопросы долгосрочной безопасности и нормативного одобрения [44, 45]. В целом применение наноматериалов усиливает функциональность упаковки, но одновременно они повышают требования к стандартизации испытаний, оценке миграции и экологическим сценариям дегградации/утилизации [11, 46].

Таблица 1

Эффективность и ограничения использования наноматериалов в упаковке для пищевых продуктов

Нанокompозит	Эффективность	Примеры использования	Ограничения и риски	Источник
AgNPs	Антимикробность, УФ-защита, барьер	Пленки для свежих фруктов/ягод	Миграция Ag, требования регулятора	[37,10]
ZnO NPs	Антимикробность, антиоксидантность, УФ-защита	Активные пленки с EO	Летучесть EO, масштабирование, переработка	[38], [39,40]
TiO ₂ NPs	УФ-защита, антимикробность	Покрытия/композиты на биополимерах	Фотокаталитическая дегградация, миграция	[41–43]
CuO NPs	Сильная антимикробность	Пленки для овощей/мяса	Токсикология, стандарты безопасности	[44, 45]
Наноцеллюлоза	Усиление прочности, газобарьер	Барьерные покрытия для бумаги/пленок	Гидрофильность, стоимость обработки	[47, 48]
MOF-наполнители	Сенсорика/стабилизация красителей	Индикаторы свежести	Стоимость, миграция металлов	[49]

Примечание: составлена автором по результатам анализа опубликованных научных исследований.

Таблица 2

Материалы устойчивой упаковки: преимущества, ограничения и внедрение

Материалы	Преимущества	Ограничения	Целевое использование	Источник
PLA и модифицированные PLA-системы	Технологичность, компостируемость	Хрупкость, влагобарьер	Контейнеры, пленки сухих продуктов	[7, 25]
РНА	Биоразложение в разных средах	Стоимость, вариабельность	Премиальные упаковки, специальные решения	[8, 26]
Крахмал/полисахариды	Доступность, биоразложение	Влагочувствительность	Покрытия, комбинированные пленки	[6, 27]
Морские биополимеры	Биоактивность, съедобность	Сырье/влага/стандартизация	Рыба/морепродукты, покрытия	[28, 29]
Целлюлоза/наноцеллюлоза	Прочность, кислородный барьер	Требуется влагозащита	Бумажная упаковка, покрытия	[47, 48]
Нанокompозиты (Ag/ZnO/TiO ₂ /CuO и др.)	Барьер + антимикробность/сенсорика	Риски миграции, регулирование	Активная/интеллектуальная упаковка	[11, 46]

Примечание: составлена автором по результатам анализа опубликованных научных исследований.

В табл. 1 представлен краткий анализ преимуществ и ограничений использования наноматериалов в упаковке.

Для практического внедрения важны не только лабораторные характеристики, но и масштабируемость, совместимость с оборудованием, стоимость и возможность эффективной утилизации. PLA хорошо масштабируется, но нуждается в модификации для «влажных» применений; РНА перспективны, но дороже; целлюлозные барьерные решения сильны в кислородном барьере (в сухих условиях), но требуют влагозащитных слоев; водорослевые пленки многообещающи, но чувствительны к влажности и ограничены по промышленной переработке [6, 28, 47]. Нанокompозиты дают высокую функциональность, но усложняют нормативное одобрение и end-of-life сценарии [11, 46]. В табл. 2 обобщены преимущества и ограничения материалов устойчивой упаковки для пищевых продуктов.

2. Активная и интеллектуальная упаковка

Активная упаковка обеспечивает продление срока годности за счет управления газовой и влаговой средой, а также за счет встроенных антимикробных/антиоксидантных компонентов [15, 16]. Наиболее распространенные направления: поглотители кислорода (встроенные системы вместо пакетиков); влагопоглотители и регуляторы влажности; контролируемый выпуск активных веществ (например, эфирных масел, фенольных соединений); комбинирование с MAP (modified atmosphere packaging) [16, 50]. Ключевые практические проблемы: зависимость эффективности от температуры/влажности, стабильность активных

компонентов, доказательство безопасности при миграции, а также удобство для промышленной линии (рулонные процессы, ламинация, печать). Интеллектуальная упаковка ориентирована на мониторинг качества в реальном времени. Системы включают: ТТИ (time-temperature indicators), фиксирующие тепловую историю продукта [18]; рН/газочувствительные колориметрические пленки и метки для мяса/рыбы (летучие амины, CO₂ и др.) [19, 49]; смартфон-ориентированное считывание и интеграция с цифровыми каналами (QR/NFC), повышающие практическую пригодность [22]. Главные барьеры – долговременная стабильность (дрейф, выцветание), повторяемость сигнала в разных условиях освещения и поведения пользователя, а также стоимость массового внедрения [18, 22]. В табл. 3 представлен краткий анализ эффективности активной и интеллектуальной упаковки.

3. Роль искусственного интеллекта в упаковке

ИИ используется для ускорения разработки упаковки: от анализа свойств материалов и конструкций до поддержки инженерных решений по прочности/барьеру и оптимизации дизайна [21, 23]. Дополнительно активно обсуждаются генеративные подходы и моделирование сложных связей «состав – структура – свойство», однако практическая ценность определяется качеством датасетов и сопоставимостью экспериментальных протоколов [23]. Наиболее прикладное направление – прогнозирование свежести/срока годности по данным сенсоров (электронный нос, колориметрические массивы, спектральные методы).

Таблица 3

Краткий анализ эффективности активной и интеллектуальной упаковки

Подсистема	Принцип	Эффективность	Ограничения внедрения	Источники
Поглотители O ₂ /регуляторы влаги	Химическое/ сорбционное связывание	Окислительная стабильность, обеспечение микробиологической стабильности	Зависимость от RH/T, упаковочный дизайн	[16]
MAP + активные элементы	Газовый состав + активные слои	Цвет/микробиология мясных продуктов	Требует контроля холодной цепи	[50]
TTI	Необратимая кинетика реакции	Контроль тепловых процессов	Калибровка, стабильность	[18]
pH/газо-индикаторы	Ответ на летучие амины/кислоты	Возможность проведения оперативного визуального контроля свежести	Стабильность красителей, регуляторика	[19]
Смартфон + ML для считывания	Нормализация цвета/освещения	Повышение точности интерпретации	Разные камеры/ условия	[22]

Примечание: составлена автором по результатам анализа опубликованных научных исследований.

Таблица 4

ИИ в прогнозировании качества: типовые схемы

Данные	Модели	Прогнозируемые данные	Существующие риски	Источник
Электронный нос (VOC)	SVM/RF/регрессия	Порча мяса/рыбы	Доменные сдвиги, калибровка	[23]
Колориметрические метки	ML/анализ изображений	Свежесть по цвету	Освещение/камера/пользователь	[22]
Спектральные методы	CNN/регрессия	Дефекты/состав/качество	Высокая стоимость и интеграция в линию	[14]

Примечание: составлена автором по результатам анализа опубликованных научных исследований.

Показано, что модели (SVM, Random Forest, глубокие сети) способны давать высокую точность классификации порчи и/или регрессионного прогноза для ряда продуктов [22, 23]. Однако переносимость моделей между производствами ограничена изменчивостью сырья, режимов хранения и «дрейфом» сенсоров, что требует калибровки и процедур валидации. В табл. 4 представлены типовые схемы ИИ в прогнозировании качества.

ИИ активно применяется в компьютерном зрении и предиктивном обслуживании оборудования, что снижает дефекты, повышает скорость контроля и уменьшает отходы. Эти решения особенно актуальны при переходе на биополимерные пленки, где стабильность процесса может быть ниже, чем у традиционных пластиков. Параллельно развивается направление прогнозирования миграции веществ из упаковки в пищу на основе ML, что потенциально ускоряет оценку соответствия нормативам при наличии качественных данных [35].

4. Экологические и социально-экономические аспекты

Экономическая эффективность устойчивой упаковки определяется не только ценой материала, но и влиянием на потери пищи, логистику, управление отходами и риски несоответствия требованиям [26, 36]. Анализ жизненного цикла (LCA) показывает, что экологический эффект может существенно меняться в зависимости от сценария конца жизненного цикла (переработка, компостирование, сжигание, захоронение) и инфраструктуры региона [24, 34]. Важная проблема: биоразлагаемость не равна реальной утилизации, если отсутствуют условия промышленного компостирования или корректная сортировка [34, 35]. Для нанокompозитов и интеллектуальных решений дополнительно возрастает значимость оценки экотоксичности и сценариев высвобождения наночастиц/компонентов в окружающую среду [46]. Социальная составляющая включает доверие потребите-

лей к «умным» меткам и цифровому мониторингу, понимание маркировки сроков годности и готовность оплачивать более дорогую, но функциональную упаковку [36].

Проблемы и перспективы

Разработка экологически устойчивой упаковки для пищевых продуктов демонстрирует заметный прогресс, однако ее переход от экспериментальных решений к массовому применению по-прежнему ограничен совокупностью методических, технологических, экономических и регуляторных факторов. Ниже кратко обобщены ключевые проблемы и направления дальнейших исследований, которые определяют траекторию развития упаковки следующего поколения:

– К числу наиболее существенных препятствий относится отсутствие стандартизированных протоколов испытаний. Разные работы используют несопоставимые методики оценки механической прочности, газо- и влагобарьерных свойств, антимикробной эффективности и сенсорного влияния на продукт, что затрудняет сравнение результатов, воспроизводимость и регуляторное одобрение. Следовательно, первоочередной задачей становится разработка единых метрик и воспроизводимых процедур валидации, включая межлабораторные сравнения и согласованные критерии приемлемости.

– Параллельно возрастает интерес к биополимерам, модифицированным наночастицами, поскольку такие добавки способны улучшать функциональные характеристики упаковки. Встраивание ZnO, Cu, восстановленного оксида графена и TiO₂ может повышать прочность, термо- и водостойкость, УФ-защиту и антимикробную активность, а также улучшать барьерные свойства, что напрямую связано с продлением срока годности продукта. Однако эти преимущества сопровождаются научной неопределенностью: наночастицы могут по-разному влиять на биоразложение. Например, антимикробный эффект ZnO способен замедлять микробную деградацию, тогда как хитозан и TiO₂ могут как ускорять, так и замедлять разложение в зависимости от совместимости с полимерной матрицей и структуры композита. Поэтому перспективные исследования должны не только демонстрировать улучшение свойств, но и объяснять механизмы деградации и их зависимость от состава и условий эксплуатации.

– Отдельного внимания требует безопасность. Некоторые наноматериалы (в частности, медь при высоких дозировках)

потенциально проявляют цитотоксичность, что делает необходимыми систематические токсикологические исследования, оценку миграции компонентов в пищевой продукт и обоснование допустимых уровней введения. При этом важна не только безопасность для потребителя, но и экологическая «судьба» таких материалов: существует риск, что в ходе деградации полимерные матрицы будут фрагментироваться до микро- и нанопластика, а присутствие неорганических наночастиц может изменять кинетику фрагментации и профиль токсичности продуктов распада. Следовательно, требуется развитие подходов к оценке экологических рисков, включая сценарии накопления в среде и трофической передачи.

– Наряду с научными вопросами значимыми барьерами остаются стоимость и масштабируемость. Высокая себестоимость, ограниченные цепочки поставок и фрагментация рынка тормозят коммерциализацию даже при доказанных преимуществах материалов. В этой связи перспективны исследования, ориентированные на снижение затрат (оптимизация рецептур и технологий), обеспечение стабильного сырьевого снабжения и анализ успешных примеров масштабирования от лаборатории к промышленному производству.

– Существенное влияние оказывают регуляторные ограничения: получение разрешений особенно сложно для новых композитов, биоразлагаемых добавок, а также активных и сенсорных систем. Ускорению внедрения могли бы способствовать прозрачные требования к маркировке, согласование международных подходов и наличие стандартизированных пакетов доказательств безопасности.

– Наконец, важным условием практического эффекта является принятие потребителями. Даже экологически предпочтительные решения могут не работать без доверия к материалам, понимания правил утилизации и готовности платить. Поэтому востребованы междисциплинарные исследования, связывающие свойства упаковки, коммуникацию и реальные поведенческие сценарии.

Перспективным направлением выступает интеграция сенсоров, анализа данных и искусственного интеллекта. ИИ может использоваться для прогнозирования деградации материалов и срока годности, оптимизации дизайна упаковки и мониторинга качества в цепочке поставок в реальном времени. Однако для этого необходимы репрезентативные наборы данных, стандартизированная калибровка и сопоставимость измерений, а также защищенные механизмы обмена данными и проверяемые моде-

ли. В более широком контексте будущие решения должны сочетать высокие эксплуатационные свойства с биоразлагаемостью и принципами циркулярной экономики, включая проектирование под переработку, замкнутые циклы и апсайклинг. Реализация этих задач возможна только при устойчивом межсекторном взаимодействии науки, промышленности и регулирующих органов.

Заключение

Современная пищевая упаковка все чаще развивается как интегрированная система, где материал обеспечивает базовую защиту, активные элементы продлевают срок годности, интеллектуальные индикаторы информируют о состоянии продукта, а ИИ связывает данные сенсоров, логистики и производства в единый контур принятия решений. Наиболее перспективным направлением выглядит конвергенция: биополимерные/целлюлозные основы с инженерной влагозащитой; выборочное наноармирование (при строгой оценке миграции и end-of-life); массово масштабируемые индикаторы (ТТІ, рН/газовые метки) с цифровым считыванием; ML-модели с валидацией в реальных цепях поставок и процедурами калибровки. Главные препятствия для широкого промышленного внедрения – высокая стоимость, масштабируемость, регуляторика, стандартизация испытаний, а также соответствие реальным сценариям утилизации. Практический прогресс требует согласования материаловедения, пищевой инженерии, цифровых технологий и политики обращения с отходами.

Список литературы

1. Najahi H., Banni M., Nakad M. et al. Plastic Pollution in Food Packaging Systems: Impact on Human Health, Socio-economic Considerations and Regulatory Framework // *Journal of Hazardous Materials Advances*. 2025. Vol. 18. P. 100667. DOI: 10.1016/j.hazadv.2025.100667.
2. Бурак Л. Ч., Ермошина Т. В., Саманкова Н. В. Достижение устойчивого развития за счет использования новых технологий переработки пищевых продуктов // *Фундаментальные исследования*. 2024. № 10. С. 171–179. DOI: 10.17513/fr.43705.
3. Arshad M. T., Hassan S., Shehzadi R. et al. Emerging Trends in Sustainable Packaging of Food Products: An Updated Review // *Journal of Natural Fibers*. 2025. Vol. 22 (1). P. 2505608. DOI: 10.1080/17518253.2025.2535392.
4. Hussain S., Akhter R., Maktedar S. S. Advancements in Sustainable Food Packaging: From Eco-Friendly Materials to Innovative Technologies // *Sustainable Food Technology*. 2024. Vol. 2. P. 1297–1364. DOI: 10.1039/D4FB00084F.
5. Jahangiri F., Mohanty A. K., Misra M. Sustainable Biodegradable Coatings for Food Packaging: Challenges and Opportunities // *Green Chemistry*. 2024. Vol. 26. P. 4934–4974. DOI: 10.1039/D3GC02647G.
6. Fatima S., Khan M. R., Ahmad I., Sadiq M. B. Recent Advances in Modified Starch Based Biodegradable Food

Packaging: A Review // *Heliyon*. 2024. Vol. 10. P. e27453. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e27453.

7. Swetha T. A., Bora A., Mohanrasu K. et al. A Comprehensive Review on Polylactic Acid (PLA)–Synthesis, Processing and Application in Food Packaging // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023. Vol. 234. P. 123715. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.123715.

8. Kusuma H. S., Sabita A., Putri N. A. et al. Waste to Wealth: Polyhydroxyalkanoates (PHA) Production From Food Waste for a Sustainable Packaging Paradigm // *Food Chemistry: Molecular Sciences*. 2024. Vol. 9. P. 100225. DOI: 10.1016/j.fochms.2024.100225.

9. Ghosh S., Mandal R. K., Mukherjee A., Roy S. Nanotechnology in the Manufacturing of Sustainable Food Packaging: A Review // *Discover Nano*. 2025. Vol. 20. P. 36. DOI: 10.1186/s11671-025-04213-x.

10. Mortazavi Moghadam F. S., Rasouli S., Mortazavi Moghadam F. A. In Vivo Study and Cytotoxicity of Migrated Silver Nanoparticles (AgNPs) From Cellulose/LDPE/AgNP Nanocomposite in Highly Perishable Food (Fish Fillet) Packaging // *ACS Food Science & Technology*. 2025. Vol. 5. P. 1024–1041. DOI: 10.1021/acsfoodscitech.4c00850.

11. Banerjee R., Bandyopadhyay J., Ray S. S. Functional Polymers and Their Nanocomposites for Sustainable Packaging Applications // *Macromolecular Materials and Engineering*. 2025. Vol. 310. P. e00130. DOI: 10.1002/mame.202500130.

12. Jacob J., Linson N., Mavelil-Sam R. et al. Poly(lactic acid)/Nanocellulose Biocomposites for Sustainable Food Packaging // *Cellulose*. 2024. Vol. 31. P. 5997–6042. DOI: 10.1007/s10570-024-05975-w.

13. Guo Z., Wu X., Jayan H. et al. Recent Developments and Applications of Surface Enhanced Raman Scattering Spectroscopy in Safety Detection of Fruits and Vegetables // *Food Chemistry*. 2024. Vol. 434. P. 137469. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.137469.

14. Yang C., Guo Z., Fernandes Barbin D. et al. Hyperspectral Imaging and Deep Learning for Quality and Safety Inspection of Fruits and Vegetables: A Review // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2025. Vol. 73 (17). P. 10019–10035. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c11492>.

15. Бурак Л. Ч., Сапач А. Н. Инновационная упаковка для пищевых продуктов // *Научное обозрение. Технические науки*. 2023. № 2. С. 50–57. DOI: 10.17513/srts.1434.

16. Gupta P. Role of Oxygen Absorbers in Food as Packaging Material, Their Characterization and Applications // *Journal of Food Science and Technology*. 2024. Vol. 61. P. 242–252. DOI: 10.1007/s13197-023-05681-8.

17. Upadhyay A., Agbesi P., Arafat K. M. Y. et al. Bio-Based Smart Packaging: Fundamentals and Functions in Sustainable Food Systems // *Trends in Food Science & Technology*. 2024. Vol. 145. P. 104369. DOI: 10.1016/j.tifs.2024.104369.

18. Бурак Л. Ч., Сапач А. Н., Писарик М. И. Интеллектуальная упаковка для овощей и фруктов, классификация и перспективы использования: обзор предметного поля // *Health, Food & Biotechnology*. 2023. Т. 5. № 1. С. 51–80. DOI: 10.36107/hfb.2023.il.s165.

19. Marappan G., Tahir H. E., Karim N. et al. Natural Pigment-Based pH/Gas-Sensitive Intelligent Packaging Film for Freshness Monitoring of Meat and Seafood: Influencing Factors, Technological Advances, and Future Perspectives // *Food Reviews International*. 2025. Vol. 42. P. 58–95. DOI: 10.1080/87559129.2025.2473026.

20. Shiraiishi C. S., Roriz C. L., Carocho M. et al. Blockchain Revolution in Food Supply Chains: A Positive Impact on Global Food Loss and Waste // *Food Chemistry*. 2024. Vol. 467. P. 142331. DOI: 10.1016/j.foodchem.2024.142331.

21. Abekoon T., Buthpitiya B., Sajindra H. et al. A Comprehensive Review to Evaluate the Synergy of Intelligent Food Packaging With Modern Food Technology and Artificial Intelligence Field // *Discover Sustainability*. 2024. Vol. 5. P. 160. DOI: 10.1007/s43621-024-00371-7.

22. Doğan V., Evliya M., Kahyaoglu L. N., Kılıç V. On-Site Colorimetric Food Spoilage Monitoring With Smartphone Embedded Machine Learning // *Talanta*. 2024. Vol. 266. P. 125021. DOI: 10.1016/j.talanta.2023.125021.
23. Cui F., Zheng S., Wang D. et al. Recent Advances in Shelf Life Prediction Models for Monitoring Food Quality // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2023. Vol. 22 (2). P. 1257–1284. DOI: 10.1111/1541-4337.13110.
24. Bilal M., Arslan M., Khan S. et al. Sustainable Food Packaging: Life Cycle Assessment, Recycling Innovations, and Pestalotopsis microspora in Biodegradable Solutions // *Trends in Food Science & Technology*. 2025. Vol. 166. P. 105400. DOI: 10.1016/j.tifs.2025.105400.
25. Reshma C., Remya S., Bindu J. A Review of Exploring the Synthesis, Properties and Diverse Applications of Poly Lactic Acid With a Focus on Food Packaging Application // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. Vol. 283. P. 137905. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.137905.
26. Gundlapalli M., Ganesan S. Polyhydroxyalkanoates (PHAs): Key Challenges in Production and Sustainable Strategies for Cost Reduction Within a Circular Economy Framework // *Results in Engineering*. 2025. Vol. 26. P. 105345. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.105345.
27. Sharma S., Nakano K., Kumar S., Katiyar V. Edible Packaging to Prolong Postharvest Shelf-Life of Fruits and Vegetables: A Review // *Food Chemistry Advances*. 2024. Vol. 4. P. 100711. DOI: 10.1016/j.focha.2024.100711.
28. Kajla P., Chaudhary V., Dewan A. et al. Seaweed-Based Biopolymers for Food Packaging: A Sustainable Approach for a Cleaner Tomorrow // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. Vol. 274. P. 133166. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.133166.
29. Augusto A., Marques S., Félix R. et al. A Novel Seaweed-Based Biodegradable and Active Food Film to Reduce Freezer Burn in Frozen Salmon // *Food Hydrocolloids*. 2024. Vol. 156. P. 110332. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2024.110332.
30. Wu Y., Zhang J., Hu X. et al. Preparation of Edible Antibacterial Films Based on Corn Starch/Carbon Nanodots for Bioactive Food Packaging // *Food Chemistry*. 2024. Vol. 444. P. 138467. DOI: 10.1016/j.foodchem.2024.138467.
31. Joseph T. M., Azat S., Ahmadi Z. et al. Polyethylene Terephthalate (PET) Recycling: A Review // *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2024. Vol. 9. P. 100673. DOI: 10.1016/j.cscee.2024.100673.
32. Hamzah M. H., Yuhana N. Y. Recycling Polyethylene Terephthalate as Food Contact Material: A Review of Technologies, Regulations, and Challenges // *Polymer-Plastics Technology and Materials*. 2025. Vol. 64 (14). P. 2129–2142. DOI: 10.1080/25740881.2025.2501161.
33. Бурак Л. Ч. Обзор разработок биоразлагаемых упаковочных материалов для пищевой промышленности // *Ползуновский вестник*. 2023. № 1. С. 91–105. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.012.
34. Islam M., Xayachak T., Haque N. et al. Impact of Bioplastics on Environment From Its Production to End-of-Life // *Process Safety and Environmental Protection*. 2024. Vol. 188. P. 151–166. DOI: 10.1016/j.psep.2024.05.113.
35. Wang S. S., Lin P., Wang C. C., Lin Y. C., Tung C. W. Machine Learning for Predicting Chemical Migration from Food Packaging Materials to Foods // *Food and Chemical Toxicology*. 2023. Vol. 178. P. 113942. DOI: 10.1016/j.fct.2023.113942.
36. Bonioli M., Bazzani C. Consumer Behaviour Toward “Smart” Food Labels: A Systematic Literature Review Using the Technology Acceptance Model // *Trends in Food Science & Technology*. 2025. Vol. 165. P. 105256. DOI: 10.1016/j.tifs.2025.105256.
37. Li S., Fang C., Wei N. et al. Antimicrobial, Antioxidative, and UV-Blocking Pectin/Gelatin Food Packaging Films Incorporated with Tannic Acid and Silver Nanoparticles for Strawberry Preservation // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. Vol. 308. P. 142445. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.142445.
38. Sobhy M., Elsamahy T., Abdelkarim E. A., Khojah E., Cui H., Lin L. Cardamom Essential Oil-Loaded Zinc Oxide Nanoparticles: A Sustainable Antimicrobial Strategy Against Multidrug-Resistant Foodborne Pathogens // *Microbial Pathogenesis*. 2025. Vol. 205. P. 107661. DOI: 10.1016/j.micpath.2025.107661.
39. Kowalonek J., Stachowiak-Trojanowska N., Ciecierska Z., Richert A. Zinc Oxide Nanoparticles and Sage (*Salvia officinalis*) Essential Oil as Active Components of Alginate Films for Food Packaging // *Polymer Degradation and Stability*. 2025. Vol. 237. P. 111328. DOI: 10.1016/j.polyimdegradstab.2025.111328.
40. Sun X., Wang H., Liang H., Meng N., Zhou N. Fabrication of Antimicrobial Chitosan/ZnO Nanoparticles/Lecithin-Montmorillonite Films for Food Packaging Application // *Food Hydrocolloids*. 2025. Vol. 159. P. 110686. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2024.110686.
41. Li D. Development and Evaluation of Titanium Dioxide / Chitosan Nanocomposite Coatings for Enhanced Food Preservation and Nutrient Retention // *Alexandria Engineering Journal*. 2025. Vol. 121. P. 484–491. DOI: 10.1016/j.aej.2025.02.091.
42. Mohanty S., Paul S. Eugenol-Loaded Functionalized TiO₂-Reinforced Chitosan-Guar Gum-Based Films with Photocatalytic Sterilization for Active Food Packaging Application // *Food Packaging and Shelf Life*. 2025. Vol. 49. P. 101477. DOI: 10.1016/j.fpsl.2025.101477.
43. Farokhnasab O., Moghadam A., Eslamifar Z., Moghadam A. H. Fabrication and Characterization of Chitosan-Based Bionanocomposite Coating Reinforced with TiO₂ Nanoparticles and Carbon Quantum Dots for Enhanced Antimicrobial Efficacy // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. Vol. 296. P. 139648. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.139648.
44. Christopher D., Anbalagan A., Govindarajan V. U., Muthuraman M. S. Biofabrication of Copper Oxide Nanoparticles Incorporated Chitosan/Gelatin Films for Food Packaging Applications // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024. Vol. 15. P. 27257–27274. DOI: 10.1007/s13399-024-05442-3.
45. Yan T., Ren Y., Zhang R. et al. Biodegradable Chitosan-Based Films Decorated with Biosynthetic Copper Oxide Nanoparticle for Post-Harvest Tomato Preservation // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. Vol. 295. P. 139595. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.139595.
46. Kumah E. A., Fopa R. D., Harati S., Boadu P., Zohoori F. V., Pak T. Human and Environmental Impacts of Nanoparticles: A Scoping Review of the Current Literature // *BMC Public Health*. 2023. Vol. 23 (1). P. 1059. DOI: 10.1186/s12889-023-15958-4.
47. de Lima G. G., Zakaluk I. C. B., Artner M. A. et al. Enhancing Barrier and Antioxidant Properties of Nanocellulose Films for Coatings and Active Packaging: A Review // *ACS Applied Nano Materials*. 2025. Vol. 8. P. 4397–4421. DOI: 10.1021/acsanm.4c04805.
48. Zhang R., Chai J., Guo W., Lu P., Wu R. Improved Paper Barrier Properties Based on Coating by Citric Acid Cross-linking of Hemicellulose // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. Vol. 304. P. 140892. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.140892.
49. Zhang Z., Zhou R., Ke L. et al. Development of Multifunctional Metal-Organic Frameworks (MOFs)-Based Nanofiller Materials in Food Packaging: A Comprehensive Review // *Trends in Food Science & Technology*. 2024. Vol. 154. P. 104771. DOI: 10.1016/j.tifs.2024.104771.
50. Rothy J., Saikia A., Koti K. et al. Enhancing Shelf Life of Bison Meat Using CO₂/N₂ Modified Atmosphere Master Bag Packaging System With Oxygen Scavengers // *Meat Science*. 2025. Vol. 224. P. 109780. DOI: 10.1016/j.meatsci.2025.109780.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

СТАТЬИ

УДК 004.5



CC BY 4.0

АРХИТЕКТУРА МОДУЛЯ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫМ МЕЖСЕТЕВЫМ ЭКРАНОМ В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ ФЕДЕРАЛЬНОЙ СЛУЖБЫ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ И ЭКСПОРТНОМУ КОНТРОЛЮ

Ширяев А. И., Нажимова Н. А.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный технический университет
имени Р. Е. Алексеева», Дзержинский филиал, Дзержинск,
Российская Федерация, e-mail: aledjohierra@gmail.com*

Ключевой задачей в обеспечении безопасности современных корпоративных и государственных сетей является эффективное управление распределенными сетевыми экранами, усложненное необходимостью соблюдения жестких нормативных требований. Статья посвящена решению проблемы централизованного, согласованного и безопасного администрирования множества многофункциональных межсетевых экранов в гетерогенной среде. Цель исследования – разработка и обоснование архитектуры модуля централизованного управления, соответствующей стандартам Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК) России. В работе использованы современные методы интеграции: прямое проксирование HTTP-запросов и REST API в сочетании с протоколом WebSocket для мониторинга и оповещений в реальном времени, что обеспечивает оперативное реагирование на угрозы. Безопасность передачи данных обеспечивается взаимной аутентификацией на основе TLS и JWT-токенов, применяемых для авторизации запросов и контроля доступа. Сквозное шифрование реализуется протоколом TLS 1.3. В результате предложены и сравнительно проанализированы два подхода к управлению. Прямое проксирование показало свою эффективность для сценариев, требующих минимальной задержки, таких как оперативное администрирование. Командный метод, основанный на постановке задач в очередь, продемонстрировал преимущества для унификации управления разнородными устройствами, централизованного аудита и агрегации данных. Разработанная архитектура подтверждает свою практическую значимость, повышая общую безопасность инфраструктуры за счет криптографической защиты каналов и снижая операционные риски благодаря автоматизации применения политик. Перспективы развития системы видятся в интеграции модулей аналитики больших данных для прогнозирования угроз и создания более интуитивного веб-интерфейса.

Ключевые слова: многофункциональный межсетевой экран, централизованное управление, безопасность, ФСТЭК, REST API, WebSocket, JWT, TLS

ARCHITECTURE OF A CENTRALIZED MANAGEMENT MODULE FOR A MULTIFUNCTIONAL NETWORK FIREWALL COMPLIANT WITH FEDERAL SERVICE FOR TECHNICAL AND EXPORT CONTROL REQUIREMENTS

Shiryayev A. I., Nazhimova N. A.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev”,
Dzerzhinsk branch, Dzerzhinsk, Russian Federation,
e-mail: aledjohierra@gmail.com*

A critical challenge in securing modern corporate and state networks is the efficient management of distributed firewalls, complicated by the need to comply with stringent regulatory requirements. This article addresses the problem of centralized, consistent, and secure administration of multiple multifunctional firewalls in a heterogeneous environment. The research aims to design and justify an architecture for a centralized management module that complies with the standards of the Russian Federal Service for Technical and Export Control (FSTEC). The study employs modern integration methods: direct HTTP request proxying and REST API combined with the WebSocket protocol for real-time monitoring and alerts, ensuring prompt response to threats. Data transmission security is ensured by a two-tier protection system: JWT token-based authentication and end-to-end encryption using TLS. As a result, two management approaches are proposed and comparatively analyzed. Direct proxying proved effective for scenarios requiring minimal latency, such as operational administration. The command-based method, which relies on task queuing, demonstrated advantages for unifying control over heterogeneous devices, centralized auditing, and data aggregation. The developed architecture confirms its practical value by enhancing overall infrastructure security through cryptographic channel protection and reducing operational risks through policy automation. Future development of the system is envisioned in the integration of big data analytics modules for threat prediction and the creation of a more intuitive web interface.

Keywords: multifunctional firewall, centralized management, FSTEC, cybersecurity, REST API, WebSocket, JWT, TLS

Введение

Многофункциональный межсетевой экран (ММЭ) уровня сети – это программно-аппаратный комплекс, предназначенный для защиты информационных систем путем фильтрации сетевого трафика, обнаружения и блокирования угроз, а также обеспечения контроля доступа [1]. Согласно требованиям ФСТЭК, такие экраны должны соответствовать строгим требованиям, включая сертификацию по классам защиты (4–6), и объединять функции классического межсетевого экрана с дополнительными модулями безопасности, такими как:

- Глубокая проверка пакетов (DPI) – технология глубокого анализа сетевых пакетов, позволяющая идентифицировать, классифицировать и управлять трафиком на основе его содержимого в реальном времени [2].

- Системы обнаружения/предотвращения вторжений (IDS/IPS) – системы, анализирующие трафик для выявления атак, используя сигнатуры или аномалии. IDS только предупреждает об угрозах, а IPS также блокирует их [3].

- Антивирусная защита.

- Веб-фильтрация и контроль приложений.

В состав ММЭ должны входить компоненты, обеспечивающие возможность централизованного управления несколькими экземплярами ММЭ, эксплуатируемых в одной информационной (автоматизированной) системе, в соответствии с ролями пользователей ММЭ. Основным компонентом является система управления [4].

Система управления многофункциональным межсетевым экраном – это комплексное программное решение, предназначенное для централизованного контроля и администрирования функций межсетевого экрана. Оно обеспечивает согласованное взаимодействие между пользовательскими интерфейсами и модулями безопасности, отвечающими за фильтрацию трафика, мониторинг угроз и применение политик доступа. Система выступает в роли посредника, обрабатывая пользовательские команды и настройки и пересылая их модулям безопасности, а также собирает и анализирует данные о работе экрана для последующей отчетности.

Согласно требованиям ФСТЭК: «В случае удаленного доступа к ММЭ от имени пользователей ММЭ защита информации должна обеспечиваться путем защиты каналов связи от несанкционированного физического доступа (подключения) к ним и (или) применения в соответствии с законодатель-

ством РФ средств криптографической защиты информации или иными методами».

Цель исследования – разработка модуля централизованного управления, соответствующего требованиям ФСТЭК, для системы управления многофункциональным межсетевым экраном.

Материалы и методы исследования

В ходе экспериментального исследования решались следующие задачи:

1. Сравнение задержки и пропускной способности при управлении одним и группой ($N = 1, 5, 10$) подчиненных ММЭ.

2. Тестирование устойчивости WebSocket-соединений при разрывах канала и восстановлении связи.

3. Оценка масштабируемости (увеличение числа управляемых узлов до 20) и отказоустойчивости (имитация отказа управляющего ММЭ).

Эксперименты проводились на виртуальной инфраструктуре на базе VMware vSphere 7.0:

- управляющий ММЭ: 4 vCPU, 8 ГБ RAM, Astra Linux Special Edition версии 1.7;

- подчиненные ММЭ (до 20 экз.): 2 vCPU, 4 ГБ RAM, Astra Linux Special Edition версии 1.7;

- клиентское рабочее место: генерация нагрузки через утилиты wrk2 и k6;

- все узлы объединены в изолированную VPN-сеть (WireGuard) с ограничением полосы 1 Гбит/с, RTT 10 мс [5].

Для сбора метрик производительности использовались wrk2 (задержки, RPS) и k6 (сценарное тестирование). Профилирование потребления ресурсов CPU и памяти выполнялось штатными средствами ОС (perf, py-spy), а верификация защищенных соединений (TLS, WebSocket) проводилась путем анализа трафика в Wireshark.

Нормативно-правовые требования к реализации централизованного управления ММЭ определены в Требованиях Федеральной службы по техническому и экспортному контролю по безопасности информации к многофункциональным экранам уровня сети [1].

Разработана модель угроз и матрица верификации, фрагмент которой представлен в таблице.

- Активы: конфигурации ММЭ, журналы аудита, ключевая информация, трафик управления.

- Нарушитель: внешний (попытка перехвата/модификации трафика) и внутренний низкопривилегированный администратор.

- Векторы атак: перехват HTTP-сессий, подделка JWT, разрыв WS-соединений, DoS управляющего модуля.

Матрица верификации требований ФСТЭК

Требование ФСТЭК	Архитектурное решение	Метод проверки	Артефакт
Защита каналов связи	TLS 1.3, взаимная аутентификация	Анализ handshake в Wireshark	Отчет о тестировании TLS
Разграничение доступа	JWT + Ролевая модель	Тестирование API с разными ролями	Журнал аудита
Регистрация событий	Логирование в формате ГОСТ Р 59548 [6]	Инспекция БД аудита	Снимок экрана журнала
Централизованное управление	Прокси / Командный API	Сравнительное нагрузочное тестирование	Графики latency/rps

Методика измерений и критерии успешности (SLO):

- латентность (P99): не более 100 мс для 95 % запросов при 1000 RPS;
- пропускная способность: не менее 5000 запросов/с;
- устойчивость WebSocket: автоматическое перепоключение не более 3 с при обрыве связи;
- масштабируемость: рост потребления CPU не более $O(\log N)$ при $N \leq 20$;
- повторяемость: каждый тест выполнялся 5 раз, доверительный интервал 95 %.

Для разработки централизованного управления были использованы следующие технологии:

- Протокол HTTP и его защищенная версия HTTPS – сетевые протоколы прикладного уровня, с помощью которых осуществляется обмен данных в формате Запрос – Ответ. HTTPS поддерживает шифрование протоколов TLS в целях повышения безопасности [7].

- Протокол WebSocket (WS) и его защищенная версия WebSocket Secure (WSS) работают поверх TCP. Установление защищенного соединения и обмен сертификатами выполняются на этапе инициализации HTTPS-соединения с использованием TLS [8], что обеспечивает шифрование на транспортном уровне модели OSI [9].

- JSON Web Token – стандарт создания токена доступа, хранящего данные в формате JSON. JWT используется для аутентификации мастер-пользователя на управляемом ММЭ [10].

Для организации централизованного прямого управления применяются проксирование HTTP-запросов и установление цепочки WebSocket-соединений по схеме «Клиент → Управляющий ММЭ → Управляемый ММЭ». Для командного управления организуется REST API [11] и цепочка WS-соединений «Управляемый ММЭ → Управляющий ММЭ → Клиент». Взаимодействие между управляющим и подчиненным организуется по схеме «клиент-сервер», где кли-

ентом выступает головная система управления, а сервером – подчиненная СУ [12].

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе реализации проекта была разработана и протестирована архитектура модуля централизованного управления многофункциональными межсетевыми экранами, соответствующая требованиям ФСТЭК.

В качестве сервера, обрабатывающего пользовательские запросы, выступает другой многофункциональный экран, оснащенный собственной системой управления. Аутентификация и авторизация запросов выполняются при помощи JWT, при этом конфиденциальность и целостность передачи обеспечивается протоколом TLS 1.3. Токен хранит те же данные, что и JWT при стандартном подключении к системе управления. Хранение ключей и информации о подчиненных ММЭ осуществляется в защищенном виде в базе данных с применением необратимого хеширования с «солью» для паролей и шифрованием для симметричных ключей [13].

Реализация командного управления на СУ решает задачи получения статистики и состояния работы подчиненных ММЭ и управления их политиками. Получение состояния модулей безопасности и собранной статистики в реальном времени осуществляется с помощью WebSocket-соединения.

Новый вариант с прямым подключением к подчиненному ММЭ представляет собой проксирование запросов на управляющей системе управления [14]. Этот режим подключения предоставляет полноценный доступ к конфигурированию подчиненного ММЭ, как если бы пользователь управлял в интерфейсе основной СУ.

1. Прямое проксирование запросов (прозрачное управление)

После авторизации в системе управления многофункционального межсетевого экрана пользователь может подключиться к подчиненному ММЭ, используя данные лицензии последнего.



Рис. 1. Прозрачное управление подчиненным ММЭ

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

На основе идентификатора пользователя и лицензии подчиненного ММЭ формируется токен доступа, хранящийся на управляющем сервере. При каждом новом запросе пользователя управляющий инициализирует проверку, находится ли администратор в режиме управления подчиненным ММЭ. Если да, то проксирует его запрос на подчиненный сервер. Получив ответ от управляемого сервера, управляющий сервер передает его пользователю без дополнительной обработки. Вариант организации центра-

лизованного управления ММЭ через прямое проксирование запросов представлен на рис. 1.

При прямом проксировании управляющий ММЭ выступает прозрачным HTTP-прокси, перенаправляя запросы GUI/REST API к подчиненному узлу без обработки. Это обеспечивает минимальную задержку ($\text{latency P99} \leq 50 \text{ мс}$ при 1000 RPS), но требует строгой синхронизации API между узлами. Подход не позволяет централизованно валидировать команды и усложняет аудит.

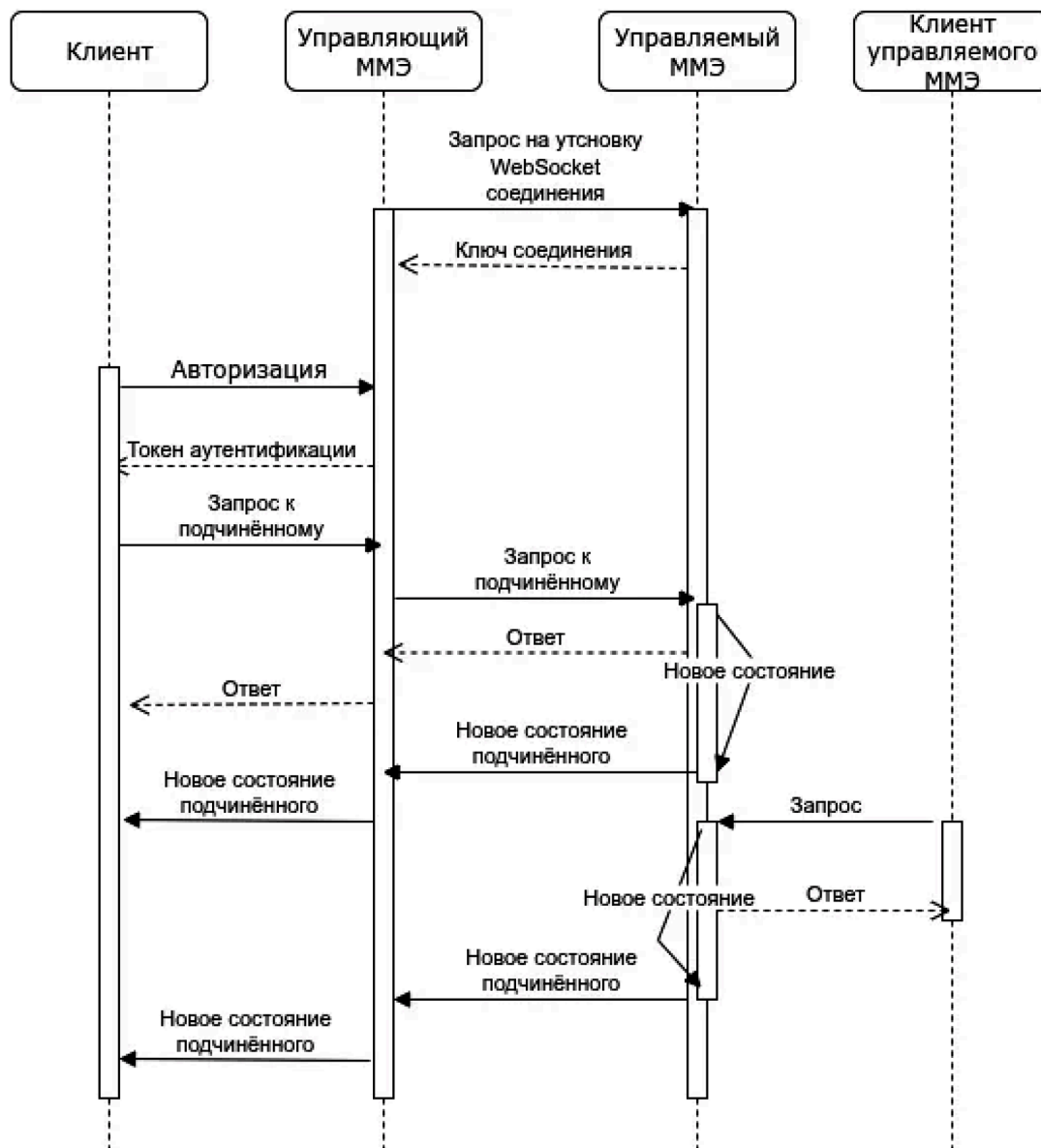


Рис. 2. Управление подчиненным ММЭ при помощи команд
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

2. Командный подход (абстрактное управление через эндпоинты)

Управляемый ММЭ при регистрации управляемого многофункционального межсетевого экрана устанавливает с ним WebSocket-соединение, по которому передается статистика и состояние подчиненного в реальном времени. Для передачи политик безопасности и команд на изменение состояния модулей безопасности используется REST API управляющего ММЭ, который отправляет HTTP-запросы подчиненному. Диаграмма последовательности архитектуры абстрактного управления подчиненными ММЭ изображена на рис. 2.

При командном подходе управляющий ММЭ предоставляет унифицированные REST-эндпоинты, инкапсулирующие логику взаимодействия с подчиненными узлами. Пользователь отправляет команды в стандартизированном формате, а управляющий узел преобразует их в API-вызовы конкретных ММЭ. Это обеспечивает единый интерфейс для GUI [15] и позволяет реализовать централизованную валидацию, кеширование, агрегацию данных и аудит. Однако цена унификации – дополнительная задержка: latency P99 возрастает до 120 мс (против 50 мс при проксировании) при 1000 RPS за счет обработки команд на управляющем узле.

Заключение

В ходе проведенного исследования была разработана архитектура модуля централизованного управления многофункциональным межсетевым экраном, соответствующая требованиям ФСТЭК. Предложенное решение основано на двух ключевых подходах: прямом проксировании запросов и командном управлении через REST API. Оба метода обеспечивают безопасное и эффективное администрирование распределенных ММЭ, но различаются по степени абстракции и гибкости.

Прямое проксирование позволяет минимизировать задержки за счет сквозной передачи запросов между управляющим и подчиненными ММЭ, что особенно важно для оперативного управления в реальном времени. Однако этот подход требует строгой синхронизации API и усложняет централизованный аудит изменений. В свою очередь, командный подход обеспечивает унифицированный интерфейс для управления разнородными ММЭ, позволяя агрегировать данные, валидировать команды и вести единый журнал событий. Это повышает удобство администрирования, но может вносить дополнительную задержку из-за необходимости преобразования запросов.

Важным аспектом реализации является обеспечение безопасности. Взаимодействие между узлами защищается с помощью JWT-аутентификации, HTTPS-шифрования и WebSocket-соединений с TLS, что соответствует требованиям регуляторов. Кроме того, хранение ключей и конфигураций в зашифрованном виде снижает риск утечки критичных данных.

Разработанная система упрощает администрирование крупных сетевых инфраструктур за счет:

- централизованного управления политиками безопасности,
- мониторинга состояния подчиненных ММЭ в реальном времени,
- автоматизации рутинных задач через REST API.

В перспективе исследование методов централизованного управления будет продолжено с акцентом на следующее:

1. Повышение функциональности – интеграцию новых модулей анализа угроз и машинного обучения для прогнозирования атак.
2. Улучшение пользовательского интерфейса – разработку интуитивно понятных

дашбордов с расширенной визуализацией данных.

3. Усиление безопасности – внедрение постквантовой криптографии и более строгих механизмов аутентификации.

Список литературы

1. Ермаков Г. С., Пантелеев Н. Н. Организация защиты информации с помощью NTA, NGFW и WAF в контексте защиты веб-приложений // *Наукосфера*. 2024. № 4–2. С. 22–26. EDN: CXNUMT. DOI: 10.5281/zenodo.11101435.
2. Воронин В. В. Анализ технологии Deep Packet Inspection // *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2018. № 3 (26). С. 40–43. EDN: YLWHGX.
3. Губарев В. Д. Системы обнаружения и предотвращения вторжений // *Научный аспект*. 2024. Т. 20. № 5. С. 2700–2704. EDN: BMCMFG.
4. Федеральная служба по техническому и экспортному контролю. Требования по безопасности информации к многофункциональным экранам уровня сети от 07.03.2023 № 44. 07.03.2023.
5. Фадеев Н. В., Лукьяненко А. В. Платформа ipsec VPN: создание сети типа Site-To-Site VPN на примере ос Cisco // *Молодежь. Наука. Инновации*. 2023. Т. 1. С. 206–210. EDN: LADZZX.
6. ГОСТ Р 59548-2022. Защита информации. Регистрация событий безопасности. Введ. 2022-09-01. М.: Стандартинформ, 2022. 28 с.
7. RFC 8446. The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3 / E. Rescorla. August 2018. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8446> (дата обращения: 19.08.2025).
8. Федоренков Р. В., Ничушкина Т. Н. Интерактивный веб-сервис WebSocket // *Инженерный вестник*. 2015. № 1. С. 3. EDN: TQMOAX.
9. Yuryev M. V. OSI model // *Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации*. 2023. № 22. Р. 67–68. EDN: PHPKVF.
10. Jones M., Bradley J., Sakimura N. JSON Web Token (JWT) [RFC 7519] May 2015. Standards Track. ISSN 2070–1721. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7519> (дата обращения: 19.08.2025).
11. Аникин Д. А. Анализ методов авторизации и аутентификации REST API // *Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности*. 2023. Т. 8. № 5–2 (31). С. 120–124. EDN: DZKSMQ.
12. Лиманова Н. И., Селезнев И. А. Анализ эффективности клиент-серверной архитектуры // *Бюллетень науки и практики*. 2022. Т. 8. № 7. С. 392–396. DOI: 10.33619/2414-2948/80/37. EDN: AONLOB.
13. Головинский С. А., Маслова М. А., Лагуткина Т. В. Использование хеш-таблиц в механизме защиты от DOS-атак на примере языка Python // *Научный результат. Информационные технологии*. 2025. Т. 10. № 2. С. 49–56. DOI: 10.18413/2518-1092-2025-10-2-0-5. EDN: ROGRBA.
14. Лазарев С. А., Демидов А. В. Применение технологии обратного проксирования в рамках системы управления информационным обменом сети корпоративных порталов // *Информационные системы и технологии*. 2011. № 6 (68). С. 131–136. EDN: OIJPVV.
15. Бобровская Р. М., Заяц А. М., Кечеруков А. Р., Вагизов М. Р. Разработка web-сервиса по мониторингу окружающей среды // *Инновационное приборостроение*. 2025. Т. 4. № 2. С. 77–83. DOI: 10.31799/2949-0693-2025-2-77-83. EDN: IGQNRK.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.



МОДЕЛИРОВАНИЕ ВСТРАИВАЕМОЙ СИСТЕМЫ НА ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЕ

Болдырев А. В.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Российская Федерация,
e-mail: avb49@aanet.ru*

В статье рассматривается процесс моделирования встраиваемой системы на программируемой логической интегральной схеме учебного стенда с использованием программного обеспечения Intel/Altera. Цель исследования – создание модели встраиваемой системы в учебных условиях на основе комплексного цикла проектирования системы на программируемой микросхеме. В рамках исследования описан полный цикл проектирования – от настройки аппаратной части до реализации программного обеспечения. В качестве процессорного ядра применяется экономичный вариант Nios II, размещенный на программируемой микросхеме Altera серии Cyclone. Конфигурирование вычислительной системы выполняется в среде SOPC Builder с формированием переключательной структуры Avalon. Аппаратная часть разрабатывается на языке описания аппаратуры Verilog в среде Quartus II, где также задаются параметры микросхемы, генерируется конфигурационный файл и настраиваются выводы микросхемы. В состав системы входят периферийные устройства: клавиатура и жидкокристаллический дисплей, обеспечивающие ввод данных и отображение результатов. Программная часть создается на языке C/C++ с помощью инструментов Nios II среды разработки Eclipse и компилируется в исполняемый файл. Верификация проекта проводится на примере приложения «Калькулятор»: конфигурационный файл загружается в память стенда с помощью специальной утилиты, после чего тестируется взаимодействие компонентов. Методика может быть применена в учебных лабораториях вузов для освоения принципов проектирования встраиваемых систем на программируемой логической интегральной схеме.

Ключевые слова: моделирование, учебный стенд, Intel/Altera, Verilog, Quartus II, SOPC Builder

MODELING OF AN EMBEDDED SYSTEM ON A PROGRAMMABLE LOGIC INTEGRATED CIRCUIT

Boldyrev A. V.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Don State Technical University” Rostov-on-Don, Russian Federation,
e-mail: avb49@aanet.ru*

The article examines the process of modeling an embedded system on a programmable logic integrated circuit of a training stand using Intel/Altera software. The aim of the research is to create a model of an embedded system in educational conditions based on a comprehensive system design cycle on a programmable chip. The research describes the full design cycle – from configuring the hardware to implementing the software. An economical version of the Nios II processor core, deployed on an Altera Cyclone series programmable chip, is used as the processing unit. The computing system is configured in the SOPC Builder environment, which generates the Avalon switching structure. The hardware component is developed using the Verilog hardware description language in the Quartus II environment, where the chip parameters are set, the configuration file is generated, and the chip pins are configured. The system includes peripheral devices – a keyboard and a liquid-crystal display – that enable data input and output. The software component is created in C/C++ using the Nios II tools in the Eclipse development environment and compiled into an executable file. Project verification is carried out using a “Calculator” application as an example: the configuration file is loaded into the stand’s memory via a dedicated utility, after which the interaction of components is tested. The proposed methodology can be applied in university teaching labs to master the principles of designing embedded systems on programmable logic integrated circuit.

Keywords: modeling, training stand, Intel/Altera, Verilog, Quartus II, SOPC Builder

Введение

Моделирование и исследование встраиваемых систем имеют критическое значение в современной технике и науке по ряду причин, связанных с их ролью в технологиях, экономике, образовании и безопасности [1–3].

Встраиваемые системы часто работают в условиях ограниченных ресурсов – вычислительной мощности, памяти, энерго-

потребления. Моделирование позволяет заранее оценить, как система будет вести себя при различных нагрузках, и оптимизировать ее архитектуру.

Многие встраиваемые системы используются в критически важных приложениях – медицинских устройствах, аэрокосмических системах, автомобильной электронике, системах безопасности. Ошибка в таких системах может иметь серьезные

последствия, включая угрозу жизни людей. Моделирование и верификация на ранних этапах разработки помогают выявить потенциальные проблемы до физической реализации, что значительно повышает надежность и безопасность систем.

Моделирование позволяет проводить виртуальное прототипирование и тестирование до создания физического прототипа. Это сокращает время и стоимость разработки, так как многие ошибки и недочеты можно исправить на этапе моделирования.

Встраиваемые системы – это сочетание аппаратных и программных компонентов (HW/SW-проектирование). Моделирование позволяет интегрировать и анализировать взаимодействие между аппаратной и программной частями, что особенно важно при работе со сложными системами с многопроцессорной архитектурой или распределенными вычислениями [4–6].

Моделирование позволяет быстро адаптировать системы к новым технологиям, например, интегрировать машинное обучение или искусственный интеллект в встраиваемые системы. Это особенно актуально в эпоху Интернета вещей (IoT), где встраиваемые системы играют ключевую роль в обмене данными между устройствами.

В образовательных учреждениях моделирование встраиваемых систем используется для обучения студентов принципам проектирования, программирования и отладки. Виртуальные модели и симуляторы позволяют студентам экспериментировать, не рискуя повредить дорогостоящее оборудование.

Современные технологии проектирования встраиваемых систем активно используют программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) – они дают широкие возможности для реализации сложных вычислительных структур с гибкой настройкой под конкретные задачи [7; 8]. Особую роль ПЛИС играют в образовательном процессе: они позволяют студентам на практике изучить принципы построения цифровых систем, отработать навыки работы с языками описания аппаратуры и освоить методики интеграции аппаратных и программных компонентов.

Таким образом, моделирование встраиваемых систем на ПЛИС – это не просто этап разработки, а стратегический инструмент, который позволяет создавать более надежные, эффективные и инновационные решения в условиях постоянно растущих требований к технологиям.

Цель исследования – создание модели встраиваемой системы в учебных условиях на основе комплексного цикла проектирования системы на ПЛИС.

Материалы и методы исследования

Типичная встраиваемая система на ПЛИС состоит из одного или нескольких процессоров, соединенных с памятью и другими устройствами с помощью шинной структуры [9, с. 389]. Главной особенностью создания учебных встраиваемых систем является сочетание модулей, образованных с помощью языка описания аппаратуры, например Verilog, и процессора с программируемым ядром, оптимизированного для работы на ПЛИС учебного стенда.

Для создания прототипа встраиваемой системы использовался учебный стенд SDK-6.1/E, хорошо известный в российских вузах [10; 11]. Стенд оснащен основной и вспомогательной ПЛИС фирмы Intel/Altera, а также подсистемой памяти, необходимой для построения полнофункционального софт-процессора [12] на основе ядра Nios II. Применительно к возможностям основной ПЛИС стенда (Altera Cyclone EP1C6)¹ целесообразно использовать «экономичный» вариант ядра Nios II/e, который является основой 32-битного RISC-процессора и использует не более 700 логических элементов ПЛИС, а также всего два блока памяти по 4К.

На рис. 1 приведен пример учебной встраиваемой системы, состоящей из клавиатуры, жидкокристаллического дисплея (ЖКД), их драйверов и вычислительного устройства с программным ядром Nios II/e.

Данные и выполняемые операции вводятся с клавиатуры. Драйвер клавиатуры подготавливает параллельные данные для чтения процессором. Процессор читает эту информацию через свой интерфейс, выполняет определенные операции и передает результат на интерфейс ЖКД для отображения. В состоянии готовности драйвер ЖКД принимает данные из своего параллельного порта и отображает их на дисплее ЖКД.

Клавиатура и дисплей являются физическими устройствами, которые присоединяются к выводам ПЛИС.

Для моделирования встраиваемой системы используются такие программные средства, как среда проектирования Quartus II компании Intel/Altera с инструментом для конфигурирования системы на ПЛИС SOPC Builder и шинной структурой Avalon², а также язык описания аппаратуры Verilog [13].

¹ Cyclone FPGA Family [Электронный ресурс]. URL: <https://www.chipfind.ru/datasheet/pdf/altera/ep1c6.pdf> (дата обращения: 22.01.2026).

² Quartus II Web Edition (Win) [Электронный ресурс]. URL: <https://soltau.ru/index.php/plis/item/360-install-quartus/> (дата обращения: 22.01.2026).

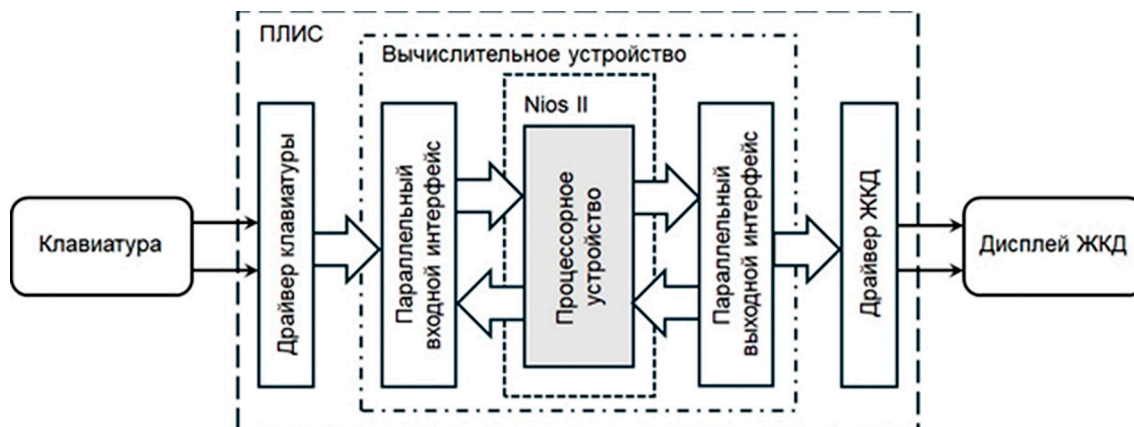


Рис. 1. Пример встраиваемой системы
 Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Методическими и справочными материалами исследования являются руководство пользователя станда SDK-6.1/E и официальная документация по Quartus II и Nios II.

Перечисленные материалы образуют замкнутый цикл разработки модели: от аппаратного проектирования (Verilog, SOPC Builder) до программного кода (C/C++) и физической реализации на стенде, что позволяет отработать навыки работы с инструментами (Quartus II, Nios II), понять интеграцию НW/SW во встраиваемых системах, получить опыт верификации и отладки на реальном оборудовании.

В ходе учебного моделирования применен комплексный методический подход, объединяющий инструментальные, проектные и экспериментальные методы для проектирования и верификации встраиваемой системы на ПЛИС [14].

Для построения целостной структуры системы, включающей процессор, память, периферию и интерфейсы, использовался метод системного проектирования.

Для описания логики работы периферийных устройств (драйверов клавиатуры и ЖКД) использовался метод аппаратного проектирования на основе HDL с применением готовых модулей, интегрируемых во встраиваемую систему.

Метод программного проектирования позволил реализовать алгоритмическую часть системы на уровне программного обеспечения на C/C++ для процессора Nios II с использованием для компиляции инструментов Nios II среды разработки Eclipse и последующей отладки программной логики.

С целью минимизации ошибок перед финальной загрузкой в стенд осуществлялась пошаговая отладка на каждом этапе раз-

работки модели, состоявшая из проверки HDL-кода на синтаксис и семантику, тестирования драйверов периферии в изолированном режиме, пошагового выполнения программного обеспечения в среде Eclipse и мониторинга сигналов на выводах ПЛИС.

Для подтверждения работоспособности модели встраиваемой системы была проведена экспериментальная проверка путем загрузки разработанных модулей в память и ПЛИС станда SDK-6.1/E. Тестирование функционала осуществлялось с помощью приложения «Калькулятор» [9, с. 436].

Результаты исследования и их обсуждение

Учебная модель, включающая драйверы клавиатуры и ЖКД [15], определяется как проект пакета Quartus II компании Intel/Altera, а вычислительное устройство становится файлом проекта в программе SOPC Builder, являющейся составной частью пакета.

Создание и конфигурирование проекта встраиваемой системы выполняется через меню New в ряде страниц Quartus II, в которых задаются название и место расположения проекта, выбирается семейство ПЛИС (Cyclone) и конкретная микросхема (EP1C6T144C8), используемая в стенде SDK-6.1/E. Так как для станда требуется конфигурационный файл с расширением *.rbf, необходимо отметить опцию включения его создания при компиляции проекта. Для этого в меню Quartus II следует открыть командой Assignments/Device окно настроек, в котором нажать кнопку Device and Pin Options, а затем выбрать в открывшемся окне вкладку Programming Files и проверить, отмечен ли галочкой пункт Raw Binary File (.rbf). Во избежа-

ние выхода из строя внешних устройств или БИС на плате стенда в связи с тем, что по умолчанию неиспользованные выводы ПЛИС соединяются с общей шиной, в этом же окне необходимо выбрать вкладку Unused Pins и установить As input tristated. Для создания файла, содержащего описание структурной схемы выбирается File/New/Design Files, а в таблице – Block Diagram/Schematic File. В результате открывается окно графического редактора с загруженным в него bdf-файлом, который необходимо сохранить, задав имя и установив флажок Add file to current project.

Конфигурирование вычислительного устройства осуществляется в программе SOPC Builder, в которой устройство определяется как файл системы на программируемом кристалле (СнПК). Программа, вызываемая из меню Tools, автоматизирует задачу объединения элементов аппаратуры в большую систему, в том числе за счет создания переключательной структуры Avalon.

При создании файла СнПК задается имя системы, выбирается язык HDL (Verilog), определяются семейство ПЛИС (Cyclone) и частота тактового генератора (40 МГц для стенда SDK-6.1/Е), после чего выбираются и добавляются в систему необходимые модули из библиотечного списка. Процедура проводится в окне бланка программы SOPC Builder и сопровождается серией окон, позволяющих выбрать желаемые опции.

Первым в окно компонентов бланка устанавливается процессор Nios II с отказом от опции отладчика No Debugger для упрощения проекта. Размещение процессора автоматически вызывает размещение главной шины структуры Avalon для памяти команд ROM и главной шины для памяти данных RAM.

Добавление на следующих двух шагах обоих типов памяти On-Chip Memory, размещаемой внутри ПЛИС, сопровождается окном спецификации, в котором выбираются тип памяти (ROM и RAM), ее размер (32 bits) и объем (4К). После появления новых модулей в бланке СнПК необходимо дифференцировать имена типов памяти, подсоединение шин структуры Avalon и установить адреса компонентов так, как это показано на рис. 2.

При добавлении параллельных интерфейсов ввода-вывода PIO в окне спецификации на каждый из них в зависимости от назначения указывается тип (входной или выходной) и разрядность (1-битный или 8-битный). Интерфейс PIO, используемый для входа KeyReleased от клавиатуры, является 1-битным входным портом, опра-

шиваемым процессором. Поэтому в одном из конфигурационных окон он определяется как входной порт прерывания IRQ. Аппаратура всех интерфейсов уже является частью переключательной структуры Avalon.

Дополнительные настройки процессора на последнем шаге конфигурирования СнПК сохраняются без изменений. Таким образом, в систему на программируемом кристалле добавляются процессорное ядро Nios II/е, два модуля памяти On-Chip Memory, два модуля PIO для клавиатуры и три модуля PIO для дисплея. В результате полное содержимое вычислительного устройства приобретает вид, показанный на рис. 2.

По окончании конфигурирования для создания кода описания аппаратуры осуществляется генерирование системы (кнопка Generate на рис. 2). При отсутствии ошибок работа с программой SOPC Builder завершается, в противном случае вносятся исправления и генерация системы повторяется. С успешным завершением создания вычислительного устройства формируется символ для данной СнПК – NIOS (рис. 3).

Полученные файлы вручную добавляются в проект встраиваемой системы, как и другие файлы, описывающие логику работы системы. Размещение их в окне графического редактора наряду с драйверами клавиатуры и ЖКД, другими компонентами, а также выполнение соединений ничем не отличается от известных методик. Для выполнения назначений входных и выходных сигналов проекта выводам корпуса реальной ПЛИС Cyclone используется карта ее выводов, задействованных в работе стенда SDK-6.1/Е, а сама процедура назначений осуществляется с помощью графического редактора Pin Planner.

Полная структурная схема встраиваемой системы, соответствующая учебному примеру (рис. 1), приведена на рис. 3.

Построение программной части является последним этапом проектирования встраиваемой системы. Эта фаза компилирует программу на языке C/C++, помещаемую в память ROM проекта СнПК. Для создания программы используются инструменты Nios II Software Build Tools for Eclipse из меню Tools. В мастере создания приложения для конфигурирования пакета поддержки платы указывается файл описания СнПК, выбирается процессор, для которого создается приложение, а также название проекта. В результате формируется исполнимый elf-файл, из которого перед загрузкой в ПЛИС выделяется машинный код.

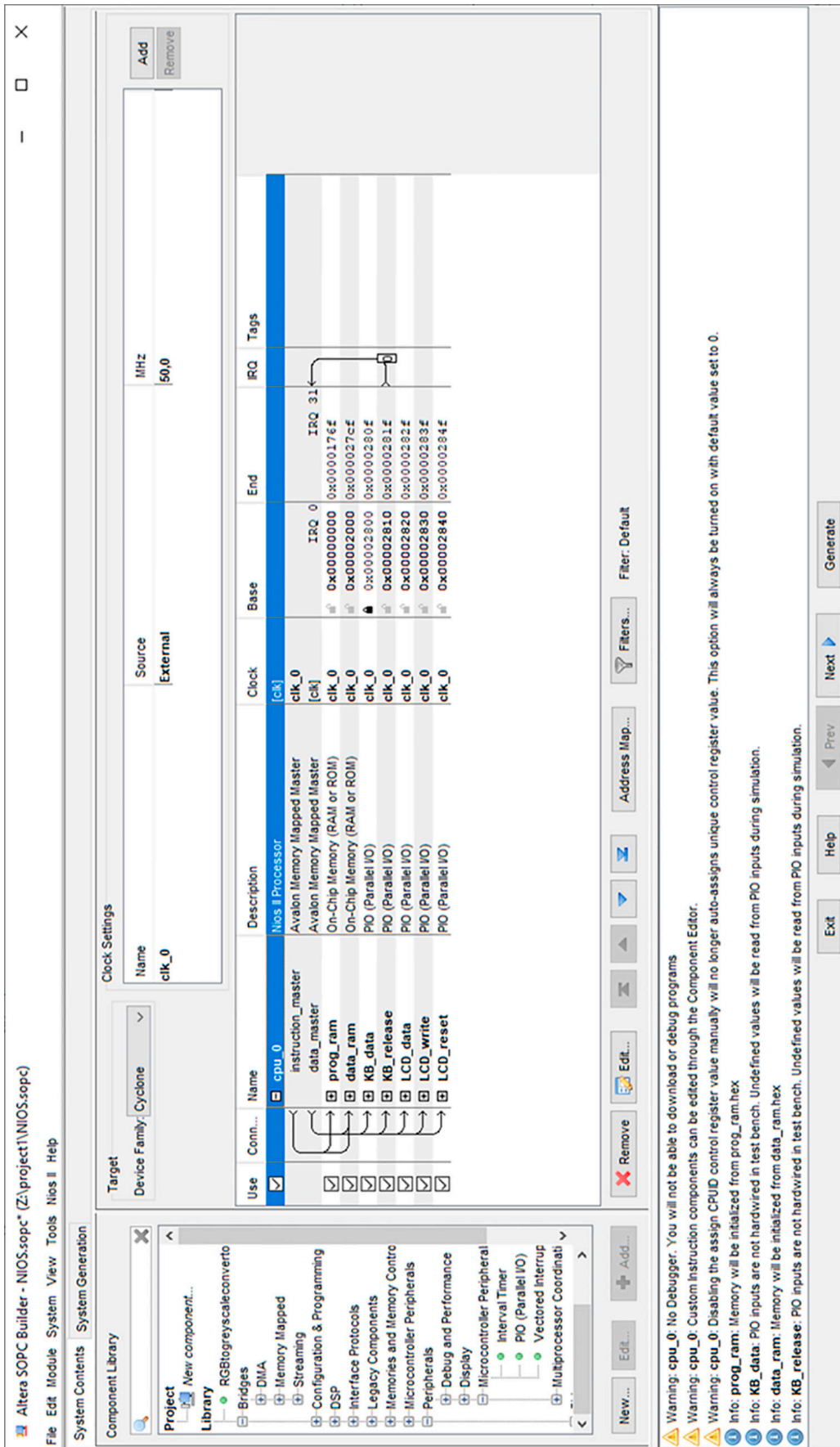


Рис. 2. Конфигурирование вычислительного устройства
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

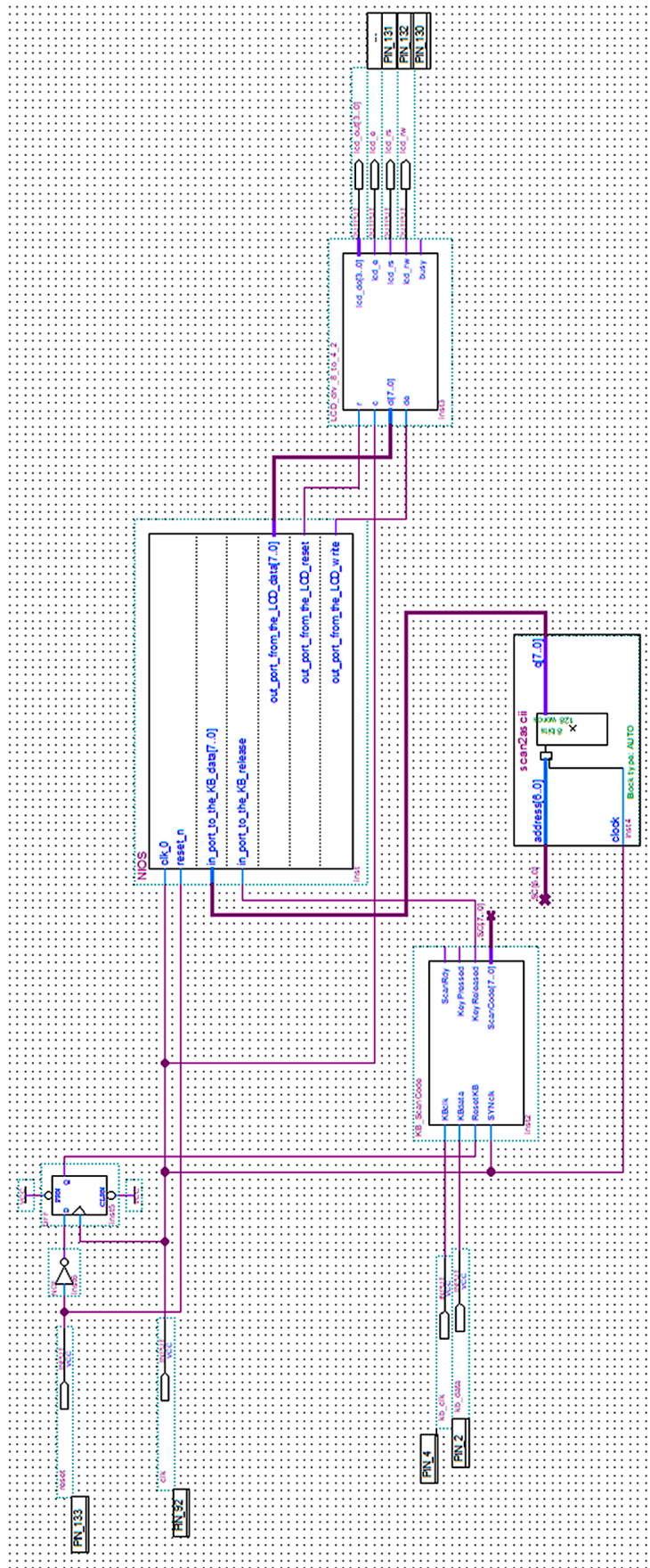


Рис. 3. Схема учебной модели встраиваемой системы
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Для верификации проекта, после завершения его создания и компиляции выполняется синтез gbf-файла, содержащий в том числе машинный код для процессора Nios II. С помощью утилиты sdk61fw.exe [11] файл проекта загружается в любую страницу Flash-памяти стенда, не используемую для хранения конфигурационных файлов, данных или программ (согласно инструкции стенда SDK-6.1/E). По окончании загрузки к стенду подключается клавиатура по модифицированному интерфейсу PS/2.

В качестве примера функционирования учебной модели встраиваемой системы на стенде SDK-6.1/E была реализована работа приложения «Калькулятор». Результаты верификации подтверждают корректную работу модели в условиях ограниченного в ресурсах учебного стенда.

Заключение

В ходе исследования решены поставленные задачи: разработана, реализована и верифицирована модель встраиваемой системы на ПЛИС в условиях учебного стенда.

Отработан полный цикл проектирования от спецификации архитектуры до загрузки конфигурационного файла в реальное оборудование. Продемонстрирована интеграция аппаратной (Verilog) и программной (C/C++) частей системы. Создана работоспособная система на базе конфигурируемого процессора Nios II/e. Подтверждена эффективность методических решений.

Исследование подтвердило практическую реализуемость встраиваемых систем на ПЛИС в учебных условиях, образовательную ценность методики для формирования инженерных компетенций, потенциал масштабирования решения для промышленных прототипов.

Полученные результаты могут служить основой для дальнейших научных работ в области ПЛИС и встраиваемых систем, модернизации учебных курсов по цифровой логике и микропроцессорной технике, разработки специализированных аппаратно-программных комплексов.

Несмотря на ограничения исследования (привязанность к экосистеме Intel/Altera, упрощенность периферии и отсутствие операционной системы), материалы статьи могут быть полезны для освоения цикла разработки от схемы до исполняемого кода, а также понимания роли ПЛИС как оптимальной платформы для прототипирования процессорных систем.

Результаты работы представляют интерес для студентов, изучающих проектирование на ПЛИС, преподавателей, разрабатывающих учебно-методические комплексы, и инженеров, начинающих работу с ПЛИС и Nios II.

Список литературы

1. Lee E. A., Seshia S. A. Introduction to Embedded Systems: A Cyber-Physical Systems Approach. 2nd ed. MIT Press, 2017. 568 с. ISBN 978-0-262-53381-2.
2. Пенской А. В. Архитектурное документирование встроенных систем с многоуровневой конфигурацией // Известия вузов. Приборостроение. 2015. № 7. С. 527–532. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23815546> (дата обращения: 22.01.2026). DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-7-527-532.
3. Аржаев В. И., Скворцов А. В. Особенности применения объектно-ориентированного проектирования встроенных систем жесткого реального времени // Программные продукты и системы. 2016. № 1. С. 56–59. URL: <https://swsys.ru/index.php?page=article&id=4110> (дата обращения: 22.01.2026). DOI: 10.15827/0236-235X.113.056-059.
4. Платунов А. Е. Теоретические и методологические основы высокоуровневого проектирования встраиваемых вычислительных систем. СПб.: Университет ИТМО, 2010. 477 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004917432> (дата обращения: 22.01.2026).
5. Alten J. P., Fürst S. Model-based Design of Embedded Systems with Matlab/Simulink // ATZ Elektron Worldw. 2016. Vol. 11. P. 60–63. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s38314-016-0019-5> (дата обращения: 09.02.2026). DOI: 10.1007/s38314-016-0019-5.
6. Оскин Д. А., Громашева О. С., Дьяченко М. Е. Модельно-ориентированный подход для автоматизации генерации программного С-кода для встраиваемых систем с использованием модели Matlab/Simulink // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 10. С. 92–97. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37201> (дата обращения: 09.02.2026). DOI: 10.17513/spno.37201.
7. Строгонов А. В., Городков П. С. Особенности проектирования устройств цифровой обработки сигналов в базе ПЛИС серии 5578 // Известия вузов. Электроника. 2017. Т. 22. № 3. С. 256–265. URL: http://ivuz-e.ru/issues/3-2017/osobennosti_proektirovaniya_ustroystv_tsifrovoy_obrabotki_signalov_v_bazise_plis_serii_5578/ (дата обращения: 09.02.2026). DOI: 10.24151/1561-5405-2017-22-3-256-265.
8. Лютерович О. В. Особенности проектирования компонентов на ПЛИС и их применение во встраиваемых системах // Reviews of Modern Science. 2023. № 4. URL: <https://ojs.scipub.de/index.php/RMS/article/view/2323> (дата обращения: 22.01.2026).
9. Наваби З. Проектирование встраиваемых систем на ПЛИС / пер. с англ. Соловьева В. В. М.: ДМК Пресс, 2016. 464 с. ISBN 978-5-97060-174-7.
10. Степаненко Д. Р., Болдырев А. В. Обзор учебных стендов для обучения программированию ПЛИС // Инновации и инжиниринг в формировании инвестиционной привлекательности региона: сборник научных трудов II открытого международного научно-практического форума. Ростов-на-Дону: Издательство ДГТУ-ПРИНТ, 2017. С. 446–451. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32329091> (дата обращения: 07.02.2026).
11. Ключев А. О., Платунов А. Е., Дергачев А. М. Опыт использования лабораторных стендов SDK в учебном процессе // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 1. С. 184–187.

URL: <https://ntv.ifmo.ru/file/article/18451.pdf> (дата обращения: 22.01.2026). DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-184-187.

12. Тарасов И. Е., Потехин Д. С., Платонова О. В. Перспективы применения софт-процессоров в системах на кристалле на базе программируемых логических интегральных схем // Russian Technological Journal. 2022. Т. 10 № 3. С. 24–33. URL: <https://www.rtfj-mirea.ru/jour/article/view/519> (дата обращения: 17.01.2026). DOI: 10.32362/2500-316X-2022-10-3-24-33.

13. Емец С. Verilog – инструмент разработки цифровых электронных схем // Компоненты и технологии. 2001. № 4 (13). С. 76–79. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=mtxawx> (дата обращения: 07.02.2026).

14. Ляпунцова Е. В., Ахмад А. Особенности процесса автоматизированного проектирования встраиваемых систем и возможность их реализации в программном обеспечении проектирования микропроцессорных систем // Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. № 1. С. 368–369. URL: <https://scinetwork.ru/articles/7736> (дата обращения: 07.02.2026). DOI: 10.24412/2071-6168-2024-1-368-369.

15. Болдырев А. В. Интерфейс дисплея для учебного стенда на основе программируемой логической интегральной схемы // Научное обозрение. Технические науки. 2025. № 5. С. 12–18. URL: <https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=1521> (дата обращения: 09.02.2026). DOI: 10.17513/srts.1521.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.



МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ НИЗКОНАПОРНОЙ МИКРОГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ДЛЯ МАЛЫХ ВОДОТОКОВ

**Сатыбалдиев А. Б. ORCID ID 0009-0006-2226-069X,
Аттокуров А. К. ORCID ID 0009-0009-0012-2271**

*Ошский технологический университет имени М. М. Адышева, Ош, Кыргызская Республика,
e-mail: a.baatyrbekovich@gmail.com*

В статье исследуется низконапорная микроГЭС с нижнебойным водяным колесом, предназначенная для работы на малых водотоках при ограниченном брутто-напоре. Актуальность работы определяется тем, что в системах такого типа энергетическая эффективность зависит не только от параметров самого гидродвигателя, но и от гидравлического совершенства водоподводящего тракта. При малых напорах даже сравнительно небольшие потери в подводящих элементах могут заметно снизить полезный напор, ухудшить условия работы колеса и сузить область устойчивого функционирования установки. Целью исследования является разработка и применение расчетной модели, позволяющей количественно оценить влияние потерь по длине, местных сопротивлений и засорения водозаборной решетки на чистый напор и расчетную электрическую мощность микроГЭС. Методически работа основана на балансовом определении чистого напора, использовании расчетных уравнений для оценки гидравлических потерь в подводящем тракте и сравнительном параметрическом анализе двух конфигураций – базовой и оптимизированной. Оптимизация выполнена методом дискретного перебора 81 сочетания параметров, включающих диаметр подводящего трубопровода, живое сечение решетки и характеристики поворотных участков. Расчеты показали, что оптимизированный вариант обеспечивает расширение рабочего диапазона по расходу с 0,056 до 0,178 м³/с, увеличение максимальной расчетной мощности с 0,192 до 0,608 кВт и снижение чувствительности установки к засорению решетки. Сделан вывод о том, что рационализация водозаборного узла и водоподводящего тракта является важным условием повышения эффективности низконапорной микроГЭС.

Ключевые слова: низконапорная микрогидроэлектростанция, гидравлические потери, чистый напор, засорение, водозаборная решетка, оптимизация водоподводящего тракта, электрическая мощность

MODELING AND OPTIMIZATION OF HYDRAULIC LOSSES IN A LOW-HEAD MICRO-HYDROPOWER PLANT FOR SMALL WATERCOURSES

**Satybaldyev A. B. ORCID ID 0009-0006-2226-069X,
Attokurov A. K. ORCID ID 0009-0009-0012-2271**

*Osh Technological University named after M. M. Adyshev, Osh, Kyrgyz Republic,
e-mail: a.baatyrbekovich@gmail.com*

This paper investigates a low-head micro-hydropower plant with an undershot water wheel designed for operation on small watercourses under limited gross head conditions. The relevance of the study is determined by the fact that, in systems of this type, energy efficiency depends not only on the characteristics of the hydraulic prime mover itself, but also on the hydraulic quality of the water conveyance system. Under low-head conditions, even relatively small losses in the conveying elements may significantly reduce the useful head, worsen the operating conditions of the wheel, and narrow the range of stable operation of the plant. The aim of the study is to develop and apply a computational model that makes it possible to quantitatively assess the influence of friction losses, local hydraulic resistances, and clogging of the intake trash rack on the net head and the calculated electric power output of the micro-hydropower plant. Methodologically, the work is based on the head-balance approach, the use of calculation equations for evaluating hydraulic losses in the water conveyance tract, and a comparative parametric analysis of two configurations, namely the base and the optimized variants. The optimization was carried out by means of a discrete search over 81 parameter combinations, including the diameter of the penstock, the effective open area of the trash rack, and the characteristics of bend sections. The calculations showed that the optimized variant provides an expansion of the operating discharge range from 0.056 to 0.178 m³/s, an increase in the maximum calculated power from 0.192 to 0.608 kW, and a lower sensitivity of the plant to trash rack clogging. It is concluded that the rational improvement of the intake unit and the water conveyance tract is an important condition for increasing the efficiency of a low-head micro-hydropower plant.

Keywords: low-head micro-hydropower plant, hydraulic losses, net head, intake trash rack, clogging, water conveyance tract optimization, electric power

Введение

Низконапорные микроГЭС, функционирующие на каналах, арыках и малых водотоках, относятся к числу наиболее чувстви-

тельных гидроэнергетических систем. Причина этого очевидна: при малой величине располагаемого напора даже сравнительно умеренные гидравлические потери способ-

ны не просто ухудшить энергетический результат, но и существенно ограничить саму область устойчивой работы установки. Поэтому применительно к подобным схемам задача повышения эффективности сводится не столько к изолированному выбору гидродвигателя, сколько к рациональному проектированию всего водоподводящего тракта – от входного устройства и защитной решетки до пенстока, поворотов и выходного участка.

Современные исследования, посвященные потерям напора на водозаборных решетках, показывают, что геометрия прутков, расстояние между ними, угол установки и режим обтекания оказывают прямое влияние на коэффициент сопротивления и, следовательно, на суммарную потерю напора [1, 2]. Не менее показательны и то, что результаты численного моделирования и CFD-анализа низконапорных гидросистем подтверждают высокую зависимость энергетической эффективности от компоновки входного участка, числа поворотов, диаметра пенстока и в целом от конфигурации подводящего тракта [3–5].

Для диапазона ультранизких и низких напоров существенное значение имеют также характеристики самого гидродвигателя. Современные обзорные исследования, посвященные нетрадиционным низконапорным турбинам и водяным колесам, показывают, что установки данного класса обладают вполне реальным потенциалом эффективного применения в условиях малых напоров и ограниченных расходов воды [6, 7]. Однако сама возможность их использования еще не означает автоматического достижения высокого энергетического эффекта. Расчетно-экспериментальные работы убеждают в ином: итоговая результативность таких машин в значительной степени определяется не только типом гидродвигателя как таковым, но и качеством подвода потока, особенностями рабочего режима, а также уровнем входных гидравлических потерь, формирующихся еще до взаимодействия воды с рабочим органом [8, 9]. Аналогичный вывод прослеживается и в исследованиях, посвященных низкооборотным микрогидроэнергетическим генераторным системам и переменноразмерным режимам: повышение общей эффективности установки не может рассматриваться в отрыве от гидравлической части схемы [10, 11].

Дополнительную значимость данной проблематике придает общий тренд развития микрогидроэнергетики как одного из направлений децентрализованного энергоснабжения. Современные обзорные публикации подчеркивают, что в качестве приоритетных направлений совершенство-

вания таких систем выступают повышение эффективности гидравлического тракта, адаптация установок к локальным условиям и снижение их чувствительности к эксплуатационным ограничениям – прежде всего к засорению, колебаниям расхода и дефициту напора [12]. Для Кыргызской Республики этот вопрос имеет и выраженное прикладное значение: в региональных исследованиях отмечаются как значительный ресурсный потенциал малых водотоков, так и необходимость более глубокой технической адаптации малых гидроустановок к реальным условиям эксплуатации [13, 14].

В рамках настоящего исследования генераторный узел сознательно не выделяется в самостоятельный объект оптимизационного анализа. Подобное ограничение не является упрощением ради удобства, а вытекает из логики самой задачи: в центре рассмотрения находится гидравлическая часть низконапорной микроГЭС, оснащенной нижнебойным водяным колесом. Именно здесь, при малых значениях располагаемого напора, формируются те потери, которые в конечном счете определяют не только уровень полезного напора, но и общую энергетическую состоятельность установки.

Для систем такого типа решающую роль играют сопротивления, возникающие в водозаборном узле, в подводящем тракте и на защитной решетке. При недостаточной рациональной конфигурации этих элементов даже сравнительно небольшие дополнительные потери оказываются способными существенно исказить расчетный энергетический баланс. Вследствие этого детальное исследование электромеханической части без предварительного выяснения гидравлических ограничений было бы методологически преждевременным.

По этой причине электрогенератор и механическая передача в данной работе учитываются в укрупненном виде – через совокупный коэффициент полезного действия η_{tot} . Такое представление, с одной стороны, позволяет сохранить необходимую расчетную целостность модели, а с другой – исключает неоправданное смещение исследовательского акцента с основного предмета анализа. Тем самым внимание сосредотачивается именно на том, что для рассматриваемой низконапорной микроГЭС является определяющим: на влиянии гидравлических потерь на величину доступного напора и, как следствие, на расчетную эффективность работы всей установки.

Цель исследования – построение и применение расчетной модели, позволяющей количественно оценить влияние потерь по длине, местных сопротивлений и засо-

рения водозаборной решетки на величину чистого напора и расчетной электрической мощности низконапорной микроГЭС, а также установить, каким образом изменение параметров водоподводящего тракта отражается на зависимостях $H_{\text{net}}(Q)$, $P_e(Q)$ и $P_e(k_{\text{clog}})$.

Материалы и методы исследования

1. Объект исследования и принятые допущения

В качестве объекта исследования рассматривалась низконапорная микроГЭС с нижнебойным водяным колесом, ориентированная на эксплуатацию в условиях малых водотоков при брутто-напоре порядка 1,5 м и расходах, типичных для локальных русловых и деривационных схем. В исследуемой установке поток последовательно проходит через водозаборный узел, защитную решетку и подводящий тракт, после чего подается к нижней части рабочего колеса, где взаимодействует с лопатками в нижнем секторе, а затем отводится в сбросной участок. При такой компоновке энергетический результат определяется не только собственными характеристиками гидродвигателя, но и качеством организации подвода воды к его рабочей зоне.

Настоящая работа сосредоточена прежде всего на гидравлической составляющей системы, то есть на водоподводящем тракте и формируемых в нем потерях напора. Подобное ограничение предмета исследования представляется оправданным, поскольку для нижнебойных колес, функционирующих при малых напорах, даже сравнительно небольшие потери на входе, в поворотах, на решетке и в подводящем участке способны заметно уменьшить полезный напор, доступный в зоне контакта потока с колесом. Следовательно, в подобных схемах вопрос работоспособности определяется не отвлеченным гидравлическим потенциалом водотока как таковым, а той частью напора, которая реально сохраняется после прохождения воды через весь тракт.

Геометрия самого водяного колеса, конфигурация лопаток, глубина погружения нижнего сектора и кинематика взаимодействия потока с ободом в рамках данной статьи не варьировались и принимались как фиксированные характеристики объекта. Такое решение было принято сознательно, поскольку задачей исследования являлась не комплексная оптимизация всей установки, а изолированная оценка влияния гидравлических потерь водопровода на расчетную электрическую мощность. Электрогенератор и механическая передача также не детализировались и учитывались укруп-

ненно через совокупный коэффициент полезного действия η_{tot} . При отсутствии самостоятельной электромеханической модели и надежных валидационных данных отдельные выводы о преимуществах конкретной конструкции генераторного узла были бы методологически уязвимыми. Поэтому все выводы, сформулированные в настоящем исследовании, относятся прежде всего к нижнебойной микроГЭС как к гидравлической системе, в которой именно параметры водопровода определяют величину расчетной выходной мощности.

2. Расчетные уравнения

Чистый напор определялся из общего баланса напора, принятого в расчетах трубопроводных систем [3–5]. Аналогичный подход используется и в классической гидромеханике [12]:

$$H_{\text{net}} = H_g - h_f - h_{\text{loc}} - h_{\text{scr}}, \quad (1)$$

где H_g – брутто-напор, м; h_f – потери по длине, м; h_{loc} – местные потери, м; h_{scr} – потери на водозаборной решетке, м.

Для нижнебойного водяного колеса величина H_{net} интерпретировалась как та доля гидравлического ресурса, которая фактически сохраняется к моменту подвода потока в рабочую зону колеса. Соответственно, уменьшение H_{net} означает не просто абстрактное снижение расчетного напора, а ухудшение условий взаимодействия воды с нижним сектором рабочего органа.

Потери по длине рассчитывались по формуле Дарси – Вейсбаха, примененной к расчетному участку подводящего водовода, аппроксимируемого круглым трубопроводом [4, 5]:

$$h_f = f \cdot \left(\frac{L}{D} \right) \cdot \left(\frac{V^2}{2g} \right), \quad V = \frac{4Q}{\pi D^2}, \quad (2)$$

где f – коэффициент гидравлического трения; L – длина подводящего трубопровода, м; D – его внутренний диаметр, м; V – средняя скорость потока, м/с; Q – расход воды, м³/с; g – ускорение свободного падения, м/с².

Местные потери определялись через сумму коэффициентов сопротивления отдельных элементов тракта [3, 5]:

$$h_{\text{loc}} = (\zeta_{\text{in}} + N_{\text{elbow}} \cdot \zeta_{\text{elbow}} + \sum \zeta_{\text{valve}} + \zeta_{\text{out}}) \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (3)$$

где ζ_{in} – коэффициент входного сопротивления; ζ_{elbow} – коэффициент одного поворота; N_{elbow} – число поворотов; $\sum \zeta_{\text{valve}}$ – суммарное сопротивление регулирующих элементов; ζ_{out} – коэффициент выходного участка.

Потери на водозаборной решетке определялись по скорости потока в ее живом сечении [1, 2]:

$$h_{scr} = \zeta_{scr} \cdot \frac{(Q / A_{scr})^2}{2g}, \quad (4)$$

где A_{scr} – живое сечение решетки, м²; ζ_{scr} – коэффициент сопротивления решетки.

Зависимость коэффициента сопротивления решетки от степени ее засорения задавалась в виде аппроксимации первого порядка:

$$\zeta_{scr}(k_{clog}) = \zeta_{scr,0} \cdot (1 + \alpha k_{clog}),$$

$$0 \leq k_{clog} \leq 0,60, \quad (5)$$

где $\zeta_{scr,0}$ – коэффициент сопротивления чистой решетки; k_{clog} – безразмерный параметр засорения; α – сценарный коэффициент роста сопротивления.

Необходимо подчеркнуть, что выражение (5) не трактуется как универсальный эмпирический закон. Оно вводится как удобная параметрическая зависимость, позволяющая выполнить анализ чувствительности нижебойной микроГЭС к ухудшению состояния водозабора. Сам факт увеличения потерь при накоплении мусора и зарастании решетки согласуется с современными исследованиями [1, 2], однако численное значение α в данной работе не калибровалось по экспериментальным данным и поэтому рассматривается как сценарное.

Расчетная электрическая мощность определялась по общеизвестному энергетическому соотношению, широко применяемому в работах по малой гидроэнергетике и водяным колесам [7–9]. Аналогичный подход используется и в исследованиях, посвященных микрогидроэнергетическим генераторным системам и переменноразмерным режимам [10, 11]:

$$P_e = \rho g Q H_{net} \eta_{tot}, \quad (6)$$

где ρ – плотность воды, кг/м³; η_{tot} – совокупный коэффициент полезного действия, учитывающий гидродвигатель, механическую передачу и генератор.

Для исследуемой схемы с нижебойным водяным колесом выражение (6) следует понимать как интегральную расчетную оценку электрической мощности, а не как детальную модель гидродинамического взаимодействия потока с лопатками. Иными словами, в статье не ставилась задача описать все особенности работы колеса на уровне локального поля скоростей; показатель P_e использовался как итоговый энергетиче-

ский критерий, позволяющий сопоставить влияние различных конфигураций водоподвода на общий результат.

3. Происхождение коэффициентов и параметров модели

Для устранения неоднозначности при интерпретации расчетов все параметры модели были распределены на три категории:

- 1) величины, заимствованные из литературы;
- 2) площадочные допущения, характеризующие моделируемый створ;
- 3) сценарные параметры, введенные для сравнительного расчета.

Распределение параметров модели по их происхождению и статусу представлено в табл. 1.

Подобное разделение особенно важно именно для статьи о нижебойной микроГЭС, поскольку позволяет не смешивать реальные гидрофизические константы, инженерные допущения, относящиеся к конкретному створу, и те численные параметры, которые используются исключительно в целях сравнительной оценки базовой и оптимизированной конфигураций.

4. Сравнимые варианты и процедура оптимизации

В работе сопоставлялись два варианта водоподводящего тракта – базовый и оптимизированный. При этом тип гидродвигателя и геометрия нижебойного водяного колеса в обоих случаях считались неизменными. Тем самым эффект оптимизации изолировался именно на уровне гидравлического подводящего тракта и не смешивался с потенциальным влиянием изменений собственных параметров колеса.

В качестве вектора проектных переменных принимался набор

$$x = \{D, A_{scr}, N_{elbow}, \zeta_{elbow}\}.$$

Для указанного набора решалась дискретная задача максимизации расчетной электрической мощности в опорной точке $Q^* = 0,10$ м³/с и $k_{clog}^* = 0,15$:

$$J(x) = P_e(x, Q^*, k_{clog}^*) \rightarrow \max. \quad (7)$$

Выбор этой опорной точки не был произвольным. Значение $Q^* = 0,10$ м³/с рассматривалось как представительный рабочий расход для малых водотоков, на которых может применяться нижебойная микроГЭС данного класса, тогда как $k_{clog}^* = 0,15$ соответствовало умеренному уровню эксплуатационного загрязнения решетки, характерному для нормального, но не идеально чистого режима работы.

Таблица 1

Исходные параметры модели и комментарии к их происхождению

Обозначение	Величина	Значение	Статус и происхождение
ρ	Плотность воды, кг/м ³	1000	Литературное значение для воды при нормальных условиях [4, 12]
μ	Динамическая вязкость, Па·с	$1,0 \cdot 10^{-3}$	Литературное значение для воды при температуре порядка 20 °С [4, 12]
g	Ускорение свободного падения, м/с ²	9,81	Физическая константа
H_g	Брутто-напор, м	1,5	Площадочное допущение для низконапорного створа
L	Длина подводящего трубопровода, м	20	Сценарная геометрия сравниваемых вариантов
f	Коэффициент трения	0,02	Сценарное значение для сравнительного расчета [4, 5]
η_{tot}	Совокупный КПД	0,60	Сценарно-литературное значение; его обоснование приведено в разделе 2.5 [7–9]. Дополнительные сведения, относящиеся к генераторным системам и переменноротным режимам, приведены в работах [10, 11]
ζ_{in}	Коэффициент входного сопротивления	0,5	Сценарное значение для входного участка
ζ_{out}	Коэффициент выходного сопротивления	1,0	Сценарное значение для выходного участка
$\sum \zeta_{valve}$	Сопротивление арматуры	0	В расчетной схеме регулирующая арматура не учитывалась
$\zeta_{scr,0}$	Коэффициент сопротивления чистой решетки	2,0	Сценарное значение, согласованное по порядку величины с работами [1, 2]
α	Коэффициент роста сопротивления при засорении	3,0	Сценарный коэффициент первой аппроксимации
Q	Диапазон расхода, м ³ /с	0,01–0,20	Диапазон параметрического сканирования
k_{clog}	Параметр засорения	0–0,60	Диапазон параметрического сканирования

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Таблица 2

Полный набор параметров базового и оптимизированного вариантов

Параметр	Базовый вариант	Оптимизированный вариант
Диаметр подводящего трубопровода (D), м	0,19	0,29
Живое сечение решетки A_{scr} , м ²	0,10	0,17
Число поворотов N_{elbow}	4	2
Коэффициент одного поворота ζ_{elbow}	0,90	0,35
Относительный радиус поворота (R/D)	≈ 1	≈ 3
Брутто-напор H_g , м	1,5	1,5
Совокупный КПД η_{tot}	0,60	0,60

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Иначе говоря, критерий (7) ориентировался не на предельное, а на типичное эксплуатационное состояние системы.

Поиск оптимального варианта осуществлялся методом полного перебора 81 сочетания параметров: $D = \{0,19; 0,24; 0,29\}$ м; $A_{scr} = \{0,10; 0,14; 0,17\}$ м²; $N_{elbow} = \{4; 3; 2\}$; $\zeta_{elbow} = \{0,90; 0,60; 0,35\}$.

Из множества полученных комбинаций отбирался вариант, который одновременно удовлетворял двум условиям:

1) обеспечивал максимальное значение P_c в опорной точке;

2) сохранял положительный чистый напор $H_{net} > 0$ во всем практически значимом диапазоне расходов.

Такой способ выбора имеет особое значение для нижебойной схемы, поскольку для нее критично не только достижение пикового значения мощности, но и устойчивое сохранение напора, достаточного для эффективного подвода потока к нижнему сектору колеса при изменяющихся режимах работы.

Итоговые параметры исходной и оптимизированной конфигураций представлены в табл. 2.

5. Проверка корректности модели и сопоставление с литературными данными

Для проверки внутренней согласованности модели использовалось уравнение баланса напора:

$$H_g = H_{net} + h_f + h_{loc} + h_{scr}. \quad (8)$$

Дополнительно анализировались предельные случаи. В частности, при $L \rightarrow 0$, $N_{elbow} \rightarrow 0$ и $\zeta_{scr} \rightarrow 0$ модель должна приводить к очевидному физическому результату $H_{net} \rightarrow H_g$, и это условие выполняется. Подобная проверка, разумеется, не заменяет физической валидации, однако позволяет убедиться во внутренней непротиворечивости принятой расчетной схемы.

Поскольку собственные эксперименты в рамках настоящей работы не проводились, абсолютные значения мощности дополнительно сопоставлялись с диапазонами, приводимыми в современной литературе по водяным колесам [7–9]. Кроме того, при интерпретации полученных оценок учитывались данные исследований, посвященных микрогидрогенераторным системам и переменноротным режимам [10, 11]. Для нижебойных и близких по принципу низконапорных колесных установок показано, что энергетический результат в значительной степени зависит от организации подвода воды, скорости потока, рабочих режимов и согласования гидравлической

и механической частей системы. Следовательно, принятое в модели значение $\eta_{tot} = 0,60$ можно считать правдоподобным по порядку величины, хотя оно и не является индивидуально верифицированным именно для рассматриваемой установки.

Итак, в рамках требований к теоретическому исследованию в настоящей работе реализовано минимально достаточное сопоставление с литературными данными, однако полноценная экспериментальная валидация модели не заявляется. Все количественные результаты следует рассматривать как расчетные оценки, справедливые в пределах принятых допущений и выбранного сценария оптимизации.

Результаты исследования и их обсуждение

На основе расчетной схемы, представленной в разделе «Материалы и методы исследования», были построены зависимости H_{net} , $P_c(Q)$ и $P_c(k_{clog})$ для двух сопоставляемых конфигураций низконапорной микроГЭС с нижебойным водяным колесом – базовой и оптимизированной. При этом в обоих случаях сохранялись одинаковыми брутто-напор и совокупный коэффициент полезного действия, тогда как различия между вариантами определялись исключительно параметрами водоподводящего тракта: диаметром подводящего трубопровода, величиной живого сечения решетки, а также количеством и гидравлическими характеристиками поворотных участков. Такая постановка задачи принципиально важна, поскольку позволяет оценить влияние именно гидравлической рационализации тракта, не смешивая его с изменением параметров самого водяного колеса или генераторного узла.

Сводные количественные результаты приведены в табл. 3. Уже на этом уровне видно, что оптимизация водопровода оказывает выраженное влияние на все ключевые показатели системы. Прежде всего, предельный расход, при котором еще выполняется условие $H_{net} > 0$, возрастает с 0,056 до 0,178 м³/с, то есть рабочий диапазон расширяется примерно в 3,18 раза. Одновременно с этим расход, соответствующий максимуму электрической мощности, смещается с 0,033 до 0,103 м³/с, а максимальная расчетная мощность увеличивается с 0,192 до 0,608 кВт. Следовательно, эффект оптимизации проявляется не в одном частном параметре, а в комплексном улучшении режима работы: возрастает и энергетический максимум, и диапазон расходов, в пределах которого установка сохраняет расчетную работоспособность.

Таблица 3

Сводные расчетные показатели по двум вариантам

Показатель	Базовый	Оптимизированный	Отношение / комментарий
Предельный расход при $H_{\text{net}} > 0$, м ³ /с	0,056	0,178	Расширение рабочего диапазона примерно в 3,18 раза
Расход максимальной мощности, м ³ /с	0,033	0,103	Оптимальный режим смещается в область больших расходов
Максимальная мощность, кВт	0,192	0,608	Рост примерно в 3,17 раза в рамках принятого сценария
P_c при $Q = 0,10$ м ³ /с и $k_{\text{clog}} = 0$	0,000	0,616	Базовый вариант практически неработоспособен
P_c при $Q = 0,10$ м ³ /с и $k_{\text{clog}} = 0,60$	0,000	0,579	Оптимизированный вариант сохраняет положительную мощность

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

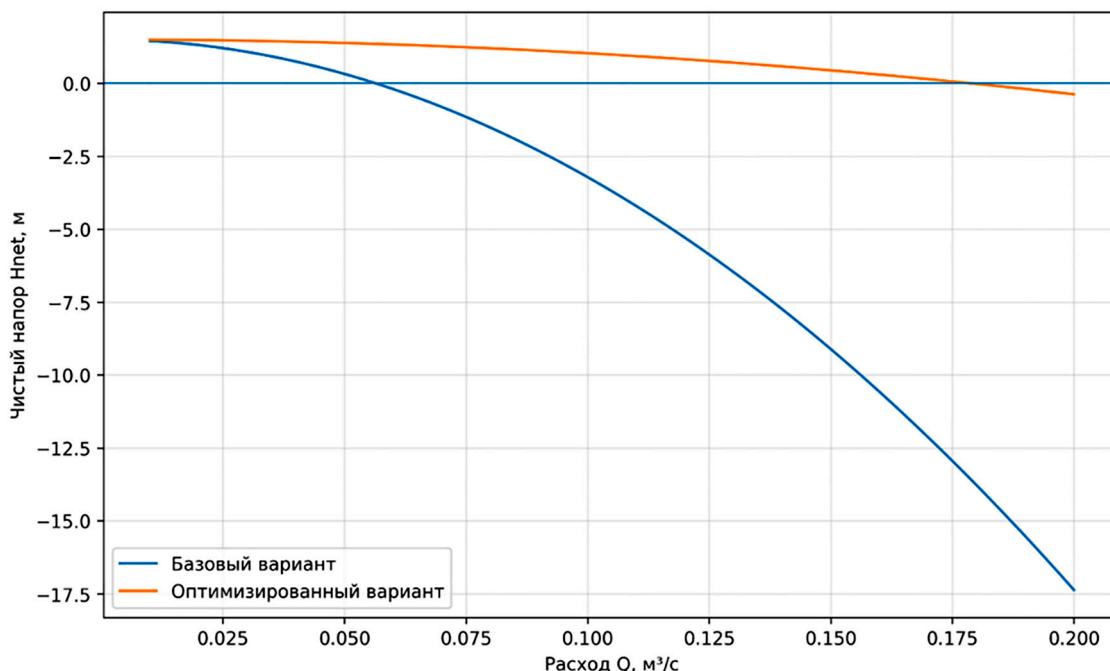


Рис. 1. Зависимость чистого напора H_{net} от расхода Q для базового и оптимизированного вариантов низконапорной микрогидроэлектростанции при фиксированном параметре засорения решетки $k_{\text{clog}} = 0,15$
 Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Анализ зависимостей, представленных на рис. 1, показывает, что при фиксированном уровне засорения решетки $k_{\text{clog}} = 0,15$ в обоих вариантах наблюдается закономерное уменьшение чистого напора по мере увеличения расхода. Этот результат непосредственно вытекает из структуры используемой модели: с ростом Q возрастают скорости потока в подводящем тракте, а вместе с ними увеличиваются потери по длине, местные потери и потери на решетке. Однако при внешнем сходстве общей тенденции

различие между двумя вариантами оказывается принципиальным.

В базовой конфигурации кривая $H_{\text{net}}(Q)$ сравнительно быстро приближается к нулю и пересекает его уже вблизи $Q \approx 0,056$ м³/с. Это означает, что даже умеренное увеличение расхода в такой схеме фактически приводит к исчерпанию полезного напора: гидравлический ресурс, потенциально доступный для преобразования, поглощается потерями в тракте еще до того, как поток достигает рабочей зоны нижнебойного колеса. В опти-

мизированном варианте картина иная. Убытие H_{net} сохраняется, но происходит заметно медленнее, а нулевая граница сдвигается в область $Q \approx 0,178 \text{ м}^3/\text{с}$. С инженерной точки зрения это свидетельствует о формировании существенно большего запаса по чистому напору. Иначе говоря, оптимизация подводящего тракта создает более благоприятные условия для передачи энергии потока рабочему колесу и тем самым расширяет интервал расходов, в котором установка способна функционировать без перехода в расчетно неработоспособное состояние.

Не менее показательны зависимости мощности, приведенные на рис. 2. Их форма носит ярко выраженный экстремальный характер, что отражает внутреннюю конкуренцию двух процессов. На начальном участке рост расхода способствует увеличению мощности, поскольку в выражении $P_e = \rho g Q H_{\text{net}} \eta_{\text{tot}}$ возрастает множитель Q . Однако дальнейшее увеличение расхода усиливает гидравлические потери и тем самым уменьшает H_{net} , в результате чего после достижения некоторого максимума мощность начинает снижаться. Именно это сочетание факторов и определяет экстремум на кривой $P_e(Q)$.

Для базового варианта максимум достигается уже при $Q \approx 0,033 \text{ м}^3/\text{с}$ и составляет около $0,192 \text{ кВт}$. После этого мощность быстро уменьшается и при расходах выше

$0,056 \text{ м}^3/\text{с}$ обращается в нуль, поскольку система входит в область $H_{\text{net}} \leq 0$. В оптимизированной конфигурации положение максимума смещается в сторону более высоких расходов, к $Q \approx 0,103 \text{ м}^3/\text{с}$, а его величина возрастает до $0,608 \text{ кВт}$. Тем самым расчет показывает, что рационализация водоподводящего тракта позволяет увеличить пиковую мощность примерно в 3,17 раза. Но не только это. Не менее важен сам сдвиг энергетически выгодного режима в область больших расходов, поскольку для малых водотоков с переменной водностью именно такая особенность может иметь практическое значение: система становится менее чувствительной к узкому диапазону расходов и приобретает большую эксплуатационную гибкость.

Особого внимания заслуживает влияние засорения решетки, представленное на рис. 3 для фиксированного расхода $Q = 0,10 \text{ м}^3/\text{с}$. В данной рабочей точке базовый вариант оказывается фактически нежизнеспособным: расчетная мощность остается нулевой во всем исследованном диапазоне изменения k_{clog} , включая даже условно чистое состояние решетки. Это означает, что исходная конфигурация не располагает достаточным запасом по напору уже в самом начале анализа и при выбранном расходе не способна обеспечить полезный энергетический результат.

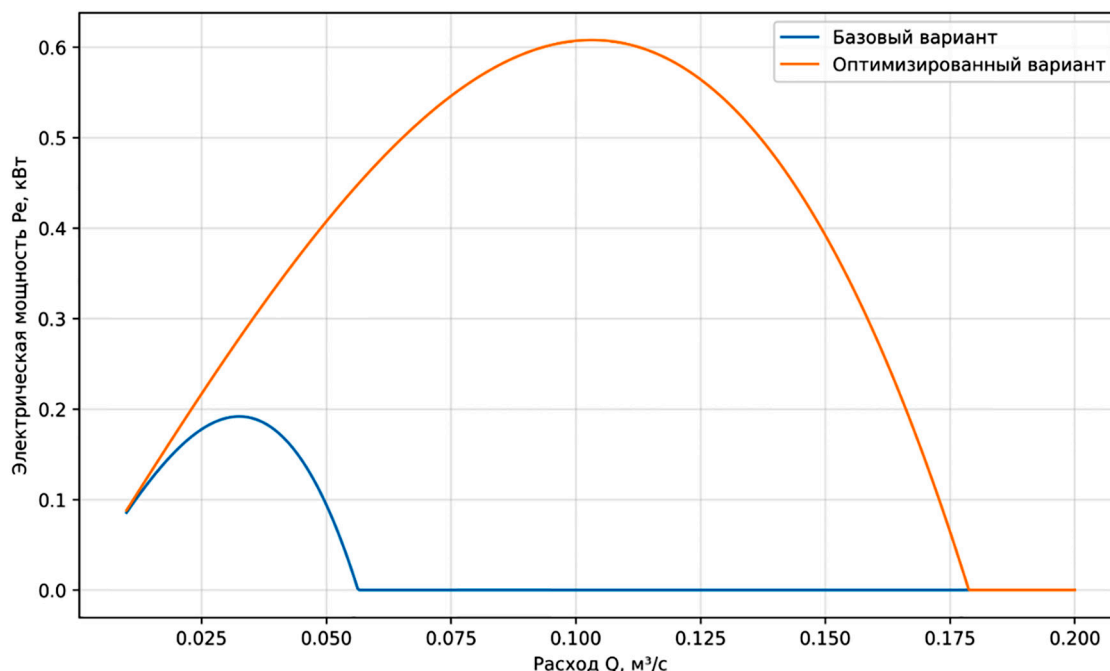


Рис. 2. Зависимость электрической мощности P_e от расхода Q для базового и оптимизированного вариантов низконапорной микрогидроэлектростанции при фиксированном параметре засорения решетки $k_{\text{clog}} = 0,15$

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

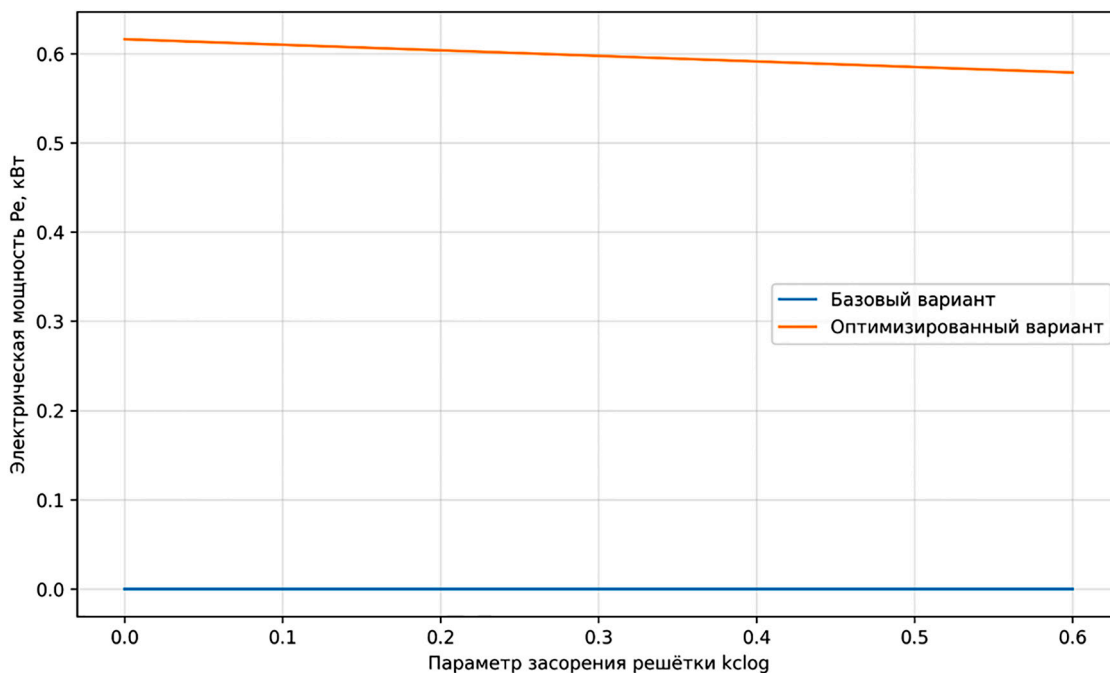


Рис. 3. Зависимость электрической мощности P_e от параметра засорения решетки k_{clog} для базового и оптимизированного вариантов низконапорной микрогидроэлектростанции при фиксированном расходе $Q = 0,10 \text{ м}^3/\text{с}$
 Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

В оптимизированной схеме ситуация принципиально иная. Даже при росте параметра засорения от 0 до 0,60 мощность уменьшается лишь с 0,616 до 0,579 кВт, сохраняя при этом положительное значение на всем рассматриваемом интервале. Разумеется, количественный характер этой зависимости определяется принятой в работе линейной аппроксимацией роста сопротивления решетки. Тем не менее качественный вывод выглядит достаточно устойчивым: увеличение живого сечения решетки и снижение скоростей потока в подводящем тракте заметно уменьшают чувствительность установки к ухудшению состояния водозабора. Для низконапорной микроГЭС с нижнебойным колесом этот результат имеет особую значимость, поскольку именно водозаборный узел в подобных системах нередко становится тем элементом, который ограничивает эксплуатационную устойчивость всей схемы.

В совокупности полученные результаты позволяют сформулировать несколько принципиальных положений. Во-первых, снижение суммарных гидравлических потерь непосредственно увеличивает диапазон расходов, в пределах которого сохраняется положительный чистый напор. Во-вторых, оптимизация параметров водопровода приводит к росту расчетной максимальной мощности и одновременно смещает энер-

гетически предпочтительный режим в область более высоких расходов. В-третьих, оптимизированная конфигурация демонстрирует более высокую устойчивость к засорению водозаборной решетки, что особенно важно в реальных условиях эксплуатации на малых водотоках, где состав воды, количество наносов и уровень загрязнения могут заметно меняться во времени.

Вместе с тем интерпретация этих результатов требует методологической аккуратности. Все приведенные зависимости и численные оценки получены в рамках теоретической модели. Как отмечалось в разделе «Материалы и методы исследования», зависимость $\zeta_{scr}(k_{clog})$ рассматривается в работе как аппроксимация первого порядка, а значение $\eta_{tot} = 0,60$ принимается как правдоподобное по порядку величины, но не индивидуально верифицированное для конкретной установки. Следовательно, речь идет не о натурно подтвержденных характеристиках реальной микроГЭС, а о расчетно обоснованной сравнительной оценке эффекта гидравлической оптимизации. Тем не менее даже в пределах такого подхода результаты достаточно убедительно показывают, что для низконапорной схемы с нижнебойным водяным колесом рациональная организация водоподводящего тракта выступает одним из определяющих факторов как энергетической эффек-

тивности, так и общей эксплуатационной устойчивости системы.

Заключение

В настоящей работе была разработана и применена расчетная модель низконапорной микроГЭС с нижнебойным водяным колесом, предназначенная для количественной оценки того, как потери по длине, местные гидравлические сопротивления и засорение водозаборной решетки влияют на величину чистого напора и, как следствие, на расчетную электрическую мощность установки. Проведенный анализ показал, что для систем данного типа энергетическая эффективность определяется не только собственными характеристиками гидродвигателя, но и в весьма существенной степени качеством гидравлической организации водоподводящего тракта, через который к колесу подводится рабочий поток.

Сопоставление базовой и оптимизированной конфигураций позволило установить, что уменьшение суммарных потерь в тракте сопровождается не локальным, а системным положительным эффектом. Оно выражается одновременно в расширении рабочего диапазона по расходу, в росте расчетной максимальной мощности и в снижении чувствительности установки к ухудшению состояния водозаборной решетки. Иначе говоря, рационализация водозаборного узла, параметров подводящего трубопровода и конфигурации поворотных участков выступает не второстепенной инженерной мерой, а одним из определяющих условий повышения энергетической результативности низконапорной микроГЭС с нижнебойным колесом.

Вместе с тем полученные результаты не следует абсолютизировать. Они имеют расчетный характер и сохраняют силу лишь в пределах тех допущений, которые были приняты при построении модели и при задании сценарных параметров. По этой причине окончательное подтверждение выявленных закономерностей должно быть связано с последующей экспериментальной проверкой, натурными измерениями на действующей установке либо с сопоставлением расчетных зависимостей с реальными эксплуатационными данными. Именно такой этап позволит перейти от теоретически обоснованной модели к ее полноценной инженерной верификации.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Список литературы

1. Latif M. A., Sarwar M. K., Farooq R., Shaukat N., Ali S., Hashmi A., Tariq M. A. U. R. Estimating Energy Efficient Design Parameters for Trash Racks at Low Head Hydropower Stations // *Water*. 2022. Vol. 14. Is. 17. Art. 2609. DOI: 10.3390/w14172609.
2. Walczak N., Walczak Z., Tymiński T. Laboratory Research on Hydraulic Losses on SHP Inlet Channel Trash Racks // *Energies*. 2022. Vol. 15. Is. 20. Art. 7602. DOI: 10.3390/en15207602.
3. Alapfy B., Gamarra N. F., Rütther N. Towards Hydraulic Design Optimization of Shaft Hydropower Plants: A 3D-CFD Application Based on Physical Models // *Water*. 2024. Vol. 16. Is. 19. Art. 2790. DOI: 10.3390/w16192790.
4. Chaulagain R. K., Poudel L., Maharjan S. A review on non-conventional hydropower turbines and their selection for ultra-low-head applications // *Heliyon*. 2023. Vol. 9. Is. 7. e17753. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e17753.
5. Yoosef Doost A., Lubitz W. D. Archimedes Screw Design: An Analytical Model for Rapid Estimation of Archimedes Screw Geometry // *Energies*. 2021. Vol. 14. Is. 22. Art. 7812. DOI: 10.3390/en14227812.
6. Simmons S., Dellinger G., Lubitz W. D. Effects of Parameter Scaling on Archimedes Screw Generator Performance // *Energies*. 2023. Vol. 16. Is. 21. Art. 7331. DOI: 10.3390/en16217331.
7. González-González F., Barbón A., Bayón L., Georgious R. An Experimental Investigation of Various Control Systems for an Archimedes Screw Turbine in a Micro-Hydropower Plant // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. Is. 2. Art. 512. DOI: 10.3390/app14020512.
8. Mehr G., Durali M., Khakrand M. H., Hoghooghi H. A novel design and performance optimization methodology for hydraulic Cross-Flow turbines using successive numerical simulations // *Renewable Energy*. 2021. Vol. 169. P. 1402–1421. DOI: 10.1016/j.renene.2021.01.090.
9. Lukeš R., Honus S., Blejchař T., Balco M. Reaction Cross-Flow Turbine for Small Hydropower Plants: Flow Profile Design and CFD Analysis // *Renewable Energy*. 2025. Vol. 252. Art. 123560. DOI: 10.1016/j.renene.2025.123560.
10. Akhyar A., Sofyan S. E., Suriadi, Khairil. A review of vortex water turbine design for sustainable energy generation (principles, optimization, and validation) // *Energy Conversion and Management: X*. 2025. Vol. 26. Art. 100895. DOI: 10.1016/j.ecmx.2025.100895.
11. Tesfay A. H., Weldemariam S. A., Gebrelibanos K. G. Design and Development of Crossflow Turbine for Off-Grid // *Energies*. 2025. Vol. 18. Is. 19. Art. 5108. DOI: 10.3390/en18195108.
12. Ботоканова Б. А., Усон кызы Эрмек, Исмаилов Э. И. Приоритеты развития малой гидроэнергетики в Кыргызстане // *Вестник КРСУ*. 2023. Т. 23. № 8. С. 4–8. DOI: 10.36979/1694-500X-2023-23-8-4-8.
13. Баянов А. П., Алымбеков Т. А. Существующее положение и перспективы развития малой гидроэнергетики в Кыргызстане // *Вестник КРСУ*. 2024. Т. 24. № 4. С. 68–72. DOI: 10.36979/1694-500X-2024-24-4-68-72.
14. Аскарбеков Б., Симаков Ю. П., Гудкова О. Г. Опыт зарубежных стран в стимулировании микрогенерации на основе возобновляемых источников энергии // *Вестник КРСУ*. 2024. Т. 24. № 4. С. 61–67. DOI: 10.36979/1694-500X-2024-24-4-61-67.
15. Лавров Н. П. Гидротехнические сооружения для малых ГЭС: учебное пособие / Кыргызско-Российский Славянский университет. Бишкек, 2001. 150 с.