

ECONOSCITECH INTEGRATION

ISSUE
7

INTERNATIONAL SCIENTIFIC
ELECTRONIC JOURNAL



**TASHKENT STATE
UNIVERSITY OF ECONOMICS**



**American University
of Technology**

Powered by Arizona State University®

ISSN: 3060-5075



Acceptance of articles

PUBLISHED EVERY MONTHLY



ARTICLE CONTRIBUTORS

**PROFESSORS-TEACHERS, SPECIALISTS
AND SCIENTIFIC RESEARCHERS.**



Google
scholar

OpenAIRE

ISSN

INTERNATIONAL
STANDARD
SERIAL
NUMBER
DENMARK

CONTACT:



+998 94 3540880



<https://econoscitech-integration-journal.uz>



2026

**EDITOR-IN-CHIEF:**

Zufarova Nozima Gulamiddinovna
DSc., Dean of Tourism Faculty, TSUE

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

Makhmudov Nosir Makhmudovich
DSc., Prof., Academician

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

Suyunov Dilmurod Xolmurodovich
Doctor of Economics (DSc), Professor,

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

Allayarov Shamsiddin Amanullayevich
doctor of economics (DSC), professor

RESPONSIBLE SECRETARY:

Otaboyev Axmed Maxsudbek o'g'li
TSUE independent researcher

THE SCIENTIFIC-POPULAR
ELECTRONIC JOURNAL
"ECONOSCITECH-INTEGRATION"
HAS BEEN REGISTERED UNDER
THE NUMBER C-5669651 BY THE
AGENCY FOR INFORMATION AND
MASS COMMUNICATIONS (AOKA)
OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN,
EFFECTIVE FROM OCTOBER 9, 2024.

In accordance with Resolution No. 384/6 dated April 10, 2026, issued by the Presidium of the Supreme Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan, this journal is included in the list of recommended international scientific publications for publishing the primary research findings of doctoral dissertations in the field of Economic Sciences.

Partners: Tashkent State University of Economics / American University of Technology in Tashkent (AUT)

Electronic publication. Issue 7. 374 pages.
Approved for publication in July 2026.

Editorial Board Members:

Sharipov Kongratbay Avezimbetovich,
Doctor of Technical Sciences (DSc), Professor



Teshabayev To'liqin Zakirovich,
Doctor of Economic Sciences (DSc), Professor



Said Irandoust,
Doctor of Chemical Engineering Sciences,
Professor



Abdurakhmanova Gulnora Kalandarovna,
Doctor of Economic Sciences (DSc), Professor



Khudoykulov Sadirdin Karimovich,
Doctor of Economics, (DSc), Professor



Tokunaga Masahiro,
professor, PhD of Economics of the Faculty of
Business and Commerce



Debasis Das,
professor Department of Computer Science



Nitin Goje,
professor and Program Lead - Computer Science



Nargizakhon Shamshieva
Doctor of Economic Sciences, Professor



Rakhmonov Norim Razzakovich,
Doctor of Economic Sciences (DSc), Professor

Bayxonov Bahodirjon Tursunbayevich
Doctor of Science (DSc), Professor



Shomurodov Ravshan Tursunkulovich,
PhD, Associate Professor



Boymuratov Abduraxmat Djumayevich
Doctor of Philosophy (PhD) in Economics



Sharopova Nafosat Radjabovna
DSc, Associate Professor



Sultanova Kamila Mukhtorali Kizi
Master of Science

CONTENTS

RECONCEPTUALIZING HIGHER EDUCATION MARKETING IN THE ALGORITHMIC ERA: INSTITUTIONAL GENERATIVE AI AND MULTIDIMENSIONAL UNIVERSITY BRAND EQUITY	10
Nozima Zufarova	
DEVELOPMENT OF WAREHOUSE AND INVENTORY MANAGEMENT IN MANUFACTURING ENTERPRISES	16
Maxmidov Shirinboy Botirovich	
IMPROVING THE MECHANISM FOR ENHANCING THE POTENTIAL OF OIL AND GAS INDUSTRY ENTERPRISES IN UZBEKISTAN	25
Bekmuhamedova Malika Iskandarbekovna	
IMPROVING THE METHODOLOGY OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE-BASED MARKETING DECISION-MAKING IN CONSTRUCTION MATERIALS MANUFACTURING ENTERPRISES	30
Uzakova Umida Ruzievna	
ORGANIZATIONAL AND ECONOMIC ASPECTS OF IMPROVING THE QUALITY OF DIGITAL SERVICES IN THE HIGHER EDUCATION SYSTEM	37
Berdiev Sunnatullo Alikulovich	
GLOBAL JUSTICE CODE AND GLOBAL JUSTICE INDEX: A CONCEPTUAL FRAMEWORK FOR GLOBAL GOVERNANCE AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT	43
Alimov Nasimjon Hoshimovich	
IMPROVING THE MECHANISMS FOR MANAGING THE PROCESS OF DIVERSIFYING HOTEL SERVICES BASED ON INTERNATIONAL STANDARDS (USING THE FERGANA VALLEY AS AN EXAMPLE)	50
Sevarakhon Dehqonova Fatxitdin qizi	
DOES INVESTMENT SOURCE DIVERSIFICATION IMPROVE FARM PERFORMANCE? EVIDENCE FROM HORTICULTURAL PRODUCERS IN UZBEKISTAN	56
Jalilov Shohruh Zafar o'g'li	
SPECIFIC ASPECTS OF PREPARING AN AUDIT OPINION AND REPORT BASED ON ESG AUDIT RESULTS.....	65
Sayfullayev Mekhroj Sayfullayevich	
THE ROLE AND IMPORTANCE OF THE MULTIFACTOR DEVELOPMENT MODEL IN THE ECONOMIC DEVELOPMENT OF THE INDUSTRIAL SECTOR.....	70
Ne'matov Shokhruxbek Ma'murjon o'g'li	
IMPROVEMENT OF ACCOUNTING AND AUDITING OF ENVIRONMENTAL ACTIVITIES IN BUILDING MATERIALS INDUSTRY ENTERPRISES	75
Mirzaev Komiljon Abdullajonovich	
THEORETICAL EVOLUTION OF COMPETITIVENESS AND ISSUES OF THE TERRITORIAL COMPETITIVENESS OF SMALL BUSINESSES.....	82
Mamatkulova Kh. N.	
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА АО «УЗБЕКНЕФТЕГАЗ»	87
Бекмухамедова Малика Искандарбековна	
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИННОВАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ НА РАЗВИТИЕ СОЦИАЛЬНОГО СЕКТОРА ЭКОНОМИКИ: ЭКОНОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ.....	95
Холмуратов Жахонгир Салимбек ўғли	

FOREIGN EXPERIENCE IN SUPPORTING SMALL BUSINESS ENTITIES AND OPPORTUNITIES FOR ITS APPLICATION	104
Botir Baxtiyorovich Ganiyev	
STRATEGIES FOR THE DIVERSIFICATION OF INDUSTRIAL ENTERPRISES.....	108
Kalimullina Nargiza Vladimirovna	
CURRENT STATE AND CHALLENGES OF USING NATIONAL FASHION ELEMENTS IN UZBEKISTAN'S TOURISM MARKET	112
Yusupova Mokhinur Farkhod qizi	
IMPROVING THE ORGANIZATION, PLANNING, AND METHODOLOGICAL ASPECTS OF THE AUDIT OF BIOLOGICAL ASSETS	120
Akhmetova Salima Seytovna	
FACTORS DETERMINING THE DEVELOPMENT OF SMALL BUSINESS AND ENTREPRENEURSHIP	125
Imomnazarov Khurshid Ozodboevich	
SMART INCLUSIVE UNIVERSITY: A DIGITAL ECOSYSTEM MODEL FOR INCLUSIVE HIGHER EDUCATION.....	129
Kamola Makhkamova	
THEORETICAL FOUNDATIONS OF ORGANIZATIONAL AND ECONOMIC DEVELOPMENT OF THE FOOD INDUSTRY	137
Tleuov Nietulla Rakhmanovich	
SECTORAL ANALYSIS OF WATER RESOURCE USE EFFICIENCY UNDER CIRCULAR ECONOMY PRINCIPLES: EVIDENCE FROM UZBEKISTAN	143
Sotvoldiyeva Muslimaxon G'ayratjon qizi	
MECHANISMS FOR INCREASING THE IMPACT OF USING THE RESOURCES OF INTERNATIONAL FINANCIAL AND CREDIT INSTITUTIONS ON SUSTAINABLE ECONOMIC DEVELOPMENT	149
Qosimov Bobur Sobirovich	
IMPROVING ELECTRONIC SERVICES IN THE B2B AND B2G MARKET SEGMENTS OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN	154
Otaboyev Nodirbek Oybek o'g'li	
MACROECONOMIC DETERMINANTS OF INDUSTRIAL DEVELOPMENT IN UZBEKISTAN: A TIME-SERIES ECONOMETRIC ANALYSIS AND SCENARIO FORECAST FOR 2026–2027	160
Khusniddin Nuriddin ugli Muydinov	
INSTITUTIONAL CHALLENGES AND DEVELOPMENT CONSTRAINTS IN SERVICE SECTOR MANAGEMENT	166
Dauletmuratov Adilbay Mirzabaevich	
ECONOMETRIC ANALYSIS OF THE FACTORS AFFECTING INTERBANK COMPETITION IN THE DIGITAL BANKING SERVICES MARKET	173
Karimov Odiljon Boqiyevich	
PRIORITY DIRECTIONS FOR ENHANCING FINANCIAL INCLUSION THROUGH INNOVATIVE BANKING SERVICES IN THE DIGITAL ECONOMY	185
Azlarova Aziza Axrorovna	
INTEGRATED INSTITUTIONAL MECHANISM OF FORMATION AND MANAGEMENT OF NATIONAL CRAFT CLUSTER.....	192
Yakhshilikov Sardor Rustam ugli	
IMPROVING THE METHODOLOGY OF PUBLIC AUDIT IN THE SYSTEM OF STATE FINANCIAL CONTROL.....	203
B. Sh. Mirzoyev	

PROSPECTS FOR THE DIGITAL TRANSFORMATION OF LOCAL GOVERNMENT AUTHORITIES	208
Achilova Firuza Kurbanovna	
Nurmurodov Zafarjon Nurmurod ugli	
A STUDY OF HOUSING STOCK MANAGEMENT ISSUES IN THE CONTEXT OF URBANIZATION BASED ON SWOT ANALYSIS.....	212
Mamanazarov Oybek Shomurodovich	
DETERMINING THE FORECAST PARAMETERS OF INDICATORS REPRESENTING AGRO-SERVICES AND THE POSSIBILITIES FOR POVERTY REDUCTION.....	217
Pardaev Mamayunus Karshibaevich	
Abilov Feruz Nematullaevich	
EVOLUTION OF PRODUCTION MANAGEMENT MODELS IN TEXTILE ENTERPRISES AND DIGITAL DIRECTIONS FOR IMPROVING EFFICIENCY.....	223
Kodirova Xurshida Ismoilovna	
DIRECTIONS FOR REDUCING POVERTY THROUGH THE USE OF DIGITAL TECHNOLOGIES IN THE SERVICE SECTOR	228
Saparov Murod Irgashovich	
FOREIGN EXPERIENCE IN HANDICRAFT MANAGEMENT AND OPPORTUNITIES FOR ITS APPLICATION IN UZBEKISTAN.....	233
Yakhshilikov Sardor Rustam Ugli	
REGIONAL INTERDEPENDENCIES AND CROSS-BORDER DYNAMICS: ASSESSING THE INFLUENCE OF NEIGHBOURING COUNTRIES ON THE DEVELOPMENT OF UZBEKISTAN'S TOURISM SECTOR	238
Khusniddin Egamnazarov	
THEORETICAL ISSUES OF DETERMINING THE QUALITY AND EFFICIENCY INDICATORS OF AGRO-SERVICES.....	246
Abilov Feruz Nematullaevich	
THE THREE-STEP INTERNAL QUALITY CONTROL MODEL FOR THE PREPARATION OF FINANCIAL STATEMENTS IN JOINT-STOCK COMPANIES IN ACCORDANCE WITH IFRS AND ITS IMPLEMENTATION MECHANISMS.....	251
Lutfullaev Sardorbek Utkur o'g'li	
CONCEPTUAL MODEL OF AN INTEGRATED ORGANIZATIONAL AND ECONOMIC MECHANISM FOR THE DEVELOPMENT OF RAILWAY INDUSTRIAL ENTERPRISES.....	260
Baymatov Atxam Axmadaliyevich	
INNOVATIVE MECHANISMS FOR THE STATISTICAL ASSESSMENT OF POPULATION QUALITY OF LIFE AND LIVING STANDARDS IN THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN AND DIRECTIONS FOR THEIR IMPROVEMENT UNDER CONDITIONS OF SUSTAINABLE ECONOMIC GROWTH	266
Ostonaqulov Dilshod Ismatilla o'g'li	
THE IMPORTANCE OF CORPORATE CULTURE IN IMPROVING THE MANAGEMENT OF JOINT-STOCK COMPANIES	272
Nazokat Israilovna Akramova	
THE CURRENT STATE AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF SPECIAL ECONOMIC ZONES IN UZBEKISTAN	280
Toshtemirova Malika Turg'un qizi	
IMPROVEMENT OF MECHANISMS FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF FINANCIAL MANAGEMENT IN JOINT-STOCK COMPANIES.....	287
Abdubodiyev Muxammad Sharofitdinovich	
ANALYSIS OF THE CURRENT STATE AND ASSESSMENT MECHANISMS FOR THE DEVELOPMENT OF INTELLECTUAL AND TECHNOLOGICAL POTENTIAL IN THE KASHKADARYA REGION	294
Uralov Elshod Sirojiddin o'g'li	

IMPROVING MECHANISMS FOR CONTENT PLACEMENT AND MANAGEMENT BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE.....	303
Khujamatova Shakhlo Abdusalom qizi	
STATISTICAL MODEL FOR DETERMINING SAMPLE SIZE IN THE AUDIT OF BUDGETARY ORGANIZATIONS BASED ON AUDIT RISK, MATERIALITY, AND EXPECTED MISSTATEMENT	309
Jasur Bosimovich Muqumov	
ЭКСЕРГООЭКОНОМИЧЕСКАЯ И ЭКСЕРГООЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОЛНЕЧНО-АККУМУЛЯТОРНОГО ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ХРАНЕНИИ ЯБЛОК	318
Мирзабаев Акрам Махкамovich	
Матчанов Нураддин Азадович	
Кулматов Хайрулло Хабибуллаевич	
Шодиев Бобур Тоир угли	

ЭКСЕРГООЭКОНОМИЧЕСКАЯ И ЭКСЕРГООЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОЛНЕЧНО-АККУМУЛЯТОРНОГО ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ХРАНЕНИИ ЯБЛОК

Мирзабаев Акрам Махкамovich

д. т. н., профессор Национального исследовательского университета «ТИИИМСХ»,
Республика Узбекистан

ORCID: 0000-0002-4298-1041

E-mail: mirzabaev.akram@gmail.ru

Матчанов Нураддин Азадович

д. т. н., профессор Ташкентского государственного технического университета,
Ташкент,
Узбекистан

ORCID: 0000-0001-8238-990X

E-mail: sirnornurisei@gmail.com

Кулматов Хайрулло Хабибуллаевич

PhD, доцент Ферганского государственного технического университета, Фергана,
Узбекистан

ORCID: 0009-0008-5504-4875

E-mail: hayrullo05051986@gmail.com

Шодиев Бобур Тоир угли

исследователь Национального исследовательского университета «ТИИИМСХ»,
Республика Узбекистан

ORCID: 0009-0008-8973-6861

E-mail: boburshodiyev2994@gmail.com

Аннотация. Предложена продуктивно-ориентированная методика эксергетической, эксергоэкономической и эксергоэкологической оценки солнечно-аккумуляторного холодоснабжения при длительном хранении яблок сорта Golden Delicious. Расчёт выполнен для двух камер К-01 и К-02 промышленного плодоовощехранилища, оснащённого сетевой СФЭС мощностью 297 кВт и рассматриваемым LiFePO_4 -накопителем ёмкостью 500 кВт·ч и мощностью 200 кВт. На основании геометрии камер и требований к воздушным проходам обоснована загрузка 384 вентилируемых контейнеров по 340 кг в каждой камере, или 261,1 т яблок в двух камерах. Для девятимесячного цикла сентябрь–май расчётное электропотребление составило 29,0 МВт·ч, холодильная нагрузка — 45,9 МВт·ч_{th}, а полезная эксергия холода — 3,04 МВт·ч_{ex}. В базовом сетевом сценарии операционная стоимость полезной эксергии холода равна 8587 сум/кВт·ч_{ex}, а углеродная интенсивность энергетической цепи — 5,25 кг CO₂-экв./кВт·ч_{ex}. Интеграция СФЭС, BESS и допустимого предварительного охлаждения снижает сетевой отбор до 10,0 МВт·ч, операционную стоимость — до 2956 сум/кВт·ч_{ex} и углеродную интенсивность — до 2,13 кг CO₂-экв./кВт·ч_{ex}. При учёте сценарной утечки R404A расширенный эксергоэкологический показатель составляет 3,29 кг CO₂-экв./кВт·ч_{ex}. Вместе с тем при ценах на оборудование уровня 2023 г. полная приведённая удельная стоимость варианта с BESS, отнесённая к полезной эксергии холода, достигает

0,92 USD/кВт·ч_{ex}, поэтому накопитель экономически оправдывается не только снижением объёма покупки электроэнергии, но и резервированием критической нагрузки. Полученные показатели являются расчётными и сопровождаются явным перечнем допущений и результатов анализа чувствительности.

Ключевые слова: яблоки Golden Delicious; холодильное хранение; сетевая СФЭС; LiFePO₄ BESS; термическая инерция; эксергия холода; эксергоэкономика; эксергоэкология; углеродная интенсивность.

Abstract. A product-oriented methodology is proposed for the exergetic, exergoeconomic, and exergoenvironmental assessment of solar-assisted, battery-supported refrigeration during the long-term storage of Golden Delicious apples. The calculations were performed for two cold storage chambers, K-01 and K-02, of an industrial fruit storage facility equipped with a 297 kW grid-connected photovoltaic (PV) system and a 500 kWh/200 kW LiFePO₄ battery energy storage system (BESS). Based on the chamber geometry and the required ventilation clearances, a storage capacity of 384 ventilated containers, each containing 340 kg of apples, was justified for each chamber, corresponding to a total storage capacity of 261.1 t for the two chambers. For the nine-month storage period from September to May, the calculated electricity consumption was 29.0 MWh, the refrigeration load was 45.9 MWh_{th}, and the useful exergy of cooling was 3.04 MWh_{ex}. In the baseline grid-supplied scenario, the operating cost of useful cooling exergy was 8,587 UZS/kWh_{ex}, while the carbon intensity of the energy chain was 5.25 kg CO₂-eq./kWh_{ex}. The integration of the PV system, BESS, and permissible pre-cooling reduced grid electricity consumption to 10.0 MWh, decreased the operating cost to 2,956 UZS/kWh_{ex}, and lowered the carbon intensity to 2.13 kg CO₂-eq./kWh_{ex}. When a scenario-based leakage of R404A refrigerant is taken into account, the extended exergoenvironmental indicator reaches 3.29 kg CO₂-eq./kWh_{ex}. At the same time, using equipment prices representative of 2023, the total allocated cost of the BESS-based configuration reaches 0.92 USD/kWh_{ex}, indicating that the battery system is economically justified not only by reducing electricity purchases from the grid but also by providing backup for critical loads. The reported performance indicators are calculated values and are accompanied by an explicit list of assumptions and sensitivity analysis results.

Keywords: Golden Delicious apples; refrigerated storage; grid-connected photovoltaic system; LiFePO₄ battery energy storage system (BESS); thermal inertia; cooling exergy; exergoeconomics; exergoenvironmental analysis; carbon intensity.

ВВЕДЕНИЕ

Холодильное хранение яблок относится к технологически критическим процессам агропромышленного комплекса: качество продукции определяется не только достигнутой температурой, но также скоростью первичного охлаждения, относительной влажностью, однородностью воздушного потока и стабильностью режима в течение всего периода хранения. При этом электрическая нагрузка холодильного предприятия имеет выраженную климатическую и технологическую изменчивость, тогда как генерация сетевой солнечной фотоэлектрической станции (СФЭС) ограничена светлым временем суток. В связи с этим энергетическая оценка только по годовому балансу не отвечает на вопрос, насколько рационально используются электрический накопитель и термическая инерция продукции.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕМЕ

Современная литература по солнечному холодоснабжению показывает, что применение фотоэлектрических систем для обеспечения холодильных нагрузок имеет существенный потенциал в аграрном секторе, особенно в регионах с высокой солнечной радиацией [1–6; 5–10]. В работах [7; 11] обобщены современные солнечные системы охлаждения и показана их актуальность для хранения плодоовощной продукции в условиях Узбекистана. При этом отмечается, что солнечное охлаждение позволяет снижать энергопотребление и экологическую нагрузку, но требует согласования энергетической и технологической частей.

Для сетевых СФЭС важным методическим основанием является мониторинг показателей производительности PV-систем. Стандарт IEC 61724-1 описывает оборудование, методы и терминологию мониторинга фотоэлектрических систем, включая сбор данных, контроль качества, расчётные параметры и эксплуатационные метрики [8; 12]. Для присоединения распределённых энергетических ресурсов к сети применимы положения IEEE 1547-2018, в которых регламентируются присоединение к электрической сети, функциональная совместимость, качество электрической энергии, островной режим работы и требования к испытаниям [9; 13].

В исследованиях по управлению холодильными нагрузками всё большее внимание уделяется термической инерции камер и продукции [10; 14]. Прогнозное управление позволяет смещать часть потребления во времени без нарушения температурных ограничений. В отличие от традиционного подхода, при котором холодильное оборудование рассматривается как жёстко заданная нагрузка, современная постановка допускает использование холодильной камеры как управляемого энергетического ресурса.

В этом свете в ранее выполненном цикле исследований авторами для промышленного плодоовощехранилища Ферганской долины были обоснованы электротехническая схема сетевой СФЭС, режимы её параллельной работы с сетью, параметры холодильного комплекса, мониторинговый баланс 2025 г. и предварительная конфигурация «СФЭС + LiFePO₄ BESS + управляемая холодильная нагрузка» [11–12]. В рассматриваемом холодильном комплексе энергетические параметры системы следующие: установленная мощность СФЭС составляет 297 кВт, годовое электропотребление самого холодильного комплекса равно 849,0 МВт·ч, сетевой отбор — 403,5 МВт·ч, а полезное солнечное покрытие нагрузки — 445,5 МВт·ч; энергетически взвешенный SSR составил 52,5 %. Для периода 1–14 июля получена зависимость $COP = 5,290 - 0,0421T_{нар}$ при $R^2 = 0,962$, которая подтверждает температурную чувствительность холодильной системы.

В настоящем исследовании эксергетический анализ дополняет энергетический баланс, поскольку учитывает качество получаемого холодильного эффекта и температурный уровень его производства. Методология SPECO позволяет отнести затраты к потокам эксергии, а эксергоэкологический подход — сопоставить экологическое воздействие с полезным эксергетическим продуктом системы [13; 14]. Для холодильных установок такой анализ особенно важен, так как одна и та же электрическая энергия может создавать различную полезную эксергию холода в зависимости от температуры наружного воздуха и температуры хранения [15].

Научная задача настоящей работы состоит в разработке продуктово-ориентированной расчётной схемы, в которой сетевой отбор, локально используемая PV-энергия, циклирование BESS, холодильная нагрузка и термическая инерция яблок оцениваются в единой энергетической, эксергетической, стоимостной и экологической границе. В связи с этим основной целью работы является определение для конкретного цикла хранения Golden Delicious рациональной массы продукции в камерах, холодильной и электрической нагрузки, полезной эксергии холода, удельной эксергоэкономической стоимости, эксергоэкологической углеродной интенсивности и вклада BESS и предварительного охлаждения в снижение сетевого отбора.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования и расчётный технологический сценарий. Объектом исследования является промышленное плодоовощехранилище NIRT FRUIT MChJ в Ферганской области. Каждая камера имеет размеры 20 × 6,5 × 5,8 м и объём 754 м³; ограждения выполнены из PUR-сэндвич-панелей толщиной 150 мм, расчётный коэффициент теплопередачи $U = 0,107$ Вт/(м²·К). Камеры К-01 и К-02 предназначены для осенних сортов Fuji и Golden Delicious, оснащены компрессорами Bitzer 4HE-25Y с номинальной электрической мощностью 17,6 кВт и холодопроизводительностью 46,5 кВт на камеру. Эксплуатационная уставка температуры воздуха составляет –2 °С, относительная влажность — 88–92 %, календарь хранения — до девяти месяцев.

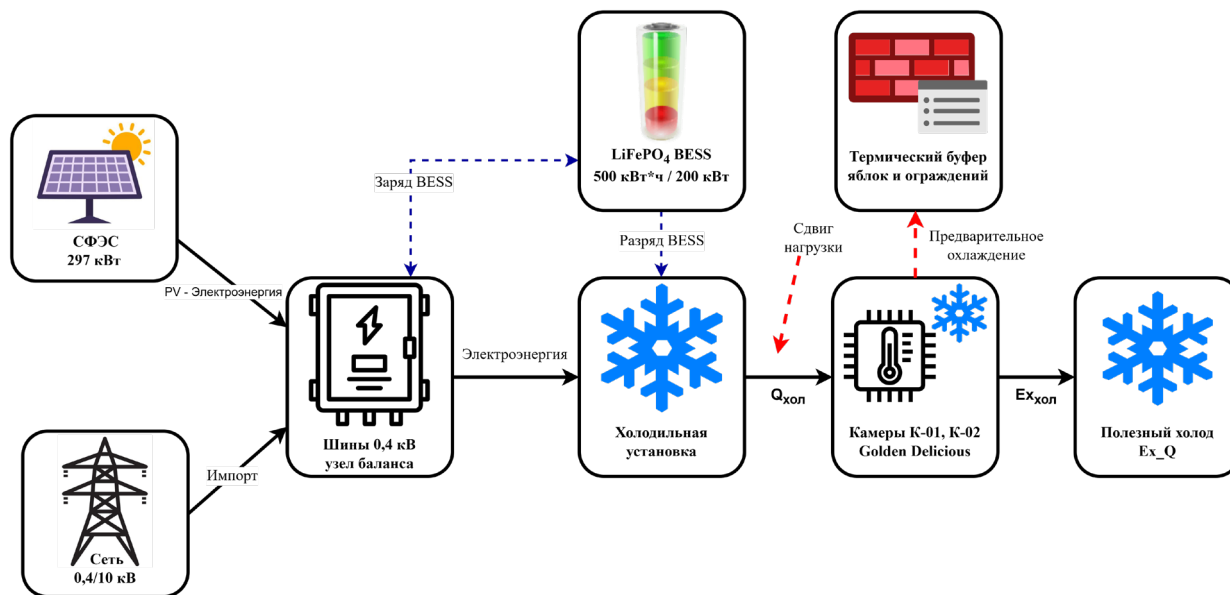
Для настоящего расчёта выбран сорт Golden Delicious и один девятимесячный цикл с 1 сентября по 31 мая (273 суток). Температура продукта при поступлении принята равной 25 °С с диапазоном чувствительности 20–30 °С, длительность первоначального охлаждения — 96 ч. Температура воздуха в камере поддерживается на уровне –2 °С, при этом температура массы продукта должна контролироваться в безопасном диапазоне, исключающем подмораживание. Хранение свыше 180 суток требует подтверждения параметров регулируемой атмосферы, поскольку содержание O₂ и CO₂ в исходных данных отсутствует; кинетика качества и газовый состав в настоящую модель не включались.

В табл. 1 представлены исходные данные, допущения и диапазоны чувствительности рассматриваемого объекта. На рис. 1 представлена принципиальная схема, указывающая границы энергетической, эксергетической, стоимостной и экологической оценки системы «СФЭС–BESS–холодильная установка–яблочные камеры».

Таблица 1

Исходные данные, допущения и диапазоны чувствительности объекта¹

Группа	Параметр	Базовое значение	Диапазон/основание
Камера	Размеры: объём	20 × 6,5 × 5,8 м; 754 м³	Паспорт объекта
Камера	Ограждения	PUR 150 мм; $U = 0,107 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$	Предыдущая работа авторов [1,2].
Продукт	Сорт; период хранения	Golden Delicious; сентябрь–май	K-01/K-02; 273 суток
Продукт	Температура продукции при поступлении	25 °C	Чувствительность 20–30 °C
Режим	Уставка; RH; pull-down	–2 °C; 88–92 %; 96 ч	Эксплуатационные параметры
Контейнер	Габарит; масса яблок	1,20 × 1,00 × 0,78 м; 340 кг	Проектное допущение
Воздух	Рециркуляция	30 ч ⁻¹ в период первоначального охлаждения; 15 ч ⁻¹ хранение	Расчёт подбора вентиляторов
Воздух	Наружный воздухообмен	2 объёма/сут при загрузке; 0,2–0,5 при хранении	Сценарное допущение
СФЭС	Установленная мощность	297 кВт	Факт по объекту
BESS	Энергия/мощность	500 кВт·ч / 200 кВт	Рассматриваемая конфигурация
BESS	DOD; $\eta_{\text{д}}$; срок	0,80; 0,90; 15 лет	Расчётный сценарий
Экономика	Тариф; дисконт	900 сум/кВт·ч; 8 %	Фактический тариф; сценарий
Экономика	CAPEX PV/BESS	750 USD/кВт; 350 USD/кВт·ч	Уровень цен 2023 г.; чувствительность
Экология	$EF_{\text{сети}}$; PV	0,55 и 0,045 кг CO ₂ e/кВт·ч	Сеть: 0,45–0,60; PV: 0,041–0,048
Экология	Выбросы жизненного цикла BESS	75 кг CO ₂ e/кВт·ч ёмкости	Чувствительность 50–100
Хладагент	Референтный сценарий	R404A; 12 кг/камеру; утечка 5 %/год	Фактический тип и заряд требуют проверки

Рис. 1. Границы энергетической, эксергетической, стоимостной и экологической оценки системы «СФЭС–BESS–холодильная установка–яблочные камеры»².

Методика расчёта. Оптимизация загрузки камер и проверка мощности первоначального охлаждения. В плане камеры предусмотрены центральный проход шириной 1,2 м, периферийный зазор не менее 0,3 м и верхний пленум высотой около 1,1 м. При размещении 16 контейнерных позиций по длине и четырёх

¹ Источник: составлено авторами по данным объекта и [9; 13; 14; 19; 20; 24–26].

² Источник: разработано авторами.

рядов по ширине получают 64 позиции на полу. Шестиярусное складирование даёт 384 вентилируемых контейнера. Масса 340 кг на контейнер выбрана ниже предельной геометрической вместимости, чтобы сохранить свободный объём для циркуляции воздуха и не превысить холодопроизводительность в период первичного охлаждения:

$$m_{\text{ябл,кам}} = N_{\text{пол}} \cdot N_{\text{ур}} \cdot m_{\text{конт}} \quad (1)$$

Для одной камеры $m_{\text{ябл,кам}} = 64 \times 6 \times 340 = 130\,560$ кг, для двух камер — 261,12 т. Объём контейнеров составляет 47,7 % объёма камеры, покрытие пола — 59,1 %, а средняя загрузочная плотность — 173 кг/м³ (см. рис. 2).

$$Q_{\text{охл}} = \frac{m_{\text{ябл}} c_{\text{р,ябл}} (T_{\text{нач}} - T_{\text{хр}}) + m_{\text{конт}} c_{\text{р,конт}} (T_{\text{нач}} - T_{\text{хр}})}{t_{\text{охл}}} + Q_{\text{огр}} + Q_{\text{инф}} + Q_{\text{дых}} + Q_{\text{вент}} \quad (2)$$

Расчётная мощность первоначального охлаждения одной камеры составляет 44,3 кВт, что ниже паспортной холодопроизводительности 46,5 кВт и оставляет около 4,8 % резерва. Следовательно, принятое размещение является верхней практически допустимой загрузкой для заданных 96 ч. При поступлении яблок с температурой 30 °С либо при увеличении воздухообмена загрузку следует уменьшить или выполнять ступенчатое заполнение.

Холодильная и электрическая нагрузка. Часовая холодильная нагрузка ($Q_{\text{наг}}(t)$) представлена суммой теплопритоков через ограждения ($Q_{\text{огр}}(t)$), инфильтрации ($Q_{\text{инф}}(t)$), охлаждения продукции и тары ($Q_{\text{прод}}(t) + Q_{\text{тара}}(t)$), теплоты дыхания продукции ($Q_{\text{дых}}(t)$), вентиляторов ($Q_{\text{вент}}(t)$), освещения ($Q_{\text{осв}}(t)$) и доли тепла от оттайки $Q_{\text{отт}}(t)$. Для прозрачности расчёта все составляющие определены отдельно, а затем агрегированы по месяцам (см. формулы (3–5)):

$$Q_{\text{наг}}(t) = Q_{\text{огр}}(t) + Q_{\text{инф}}(t) + Q_{\text{прод}}(t) + Q_{\text{тара}}(t) + Q_{\text{дых}}(t) + Q_{\text{вент}}(t) + Q_{\text{осв}}(t) + Q_{\text{отт}}(t) \quad (3)$$

$$Q_{\text{огр}}(t) = UA_{\text{стен}} [T_{\text{нар}}(t) - T_{\text{кам}}] + UA_{\text{пола}} [T_{\text{гр}} - T_{\text{кам}}] \quad (4)$$

$$Q_{\text{прод}} = m_{\text{ябл}} c_{\text{р,ябл}} (T_{\text{нач}} - T_{\text{прод}}) \quad (5)$$

На рис. 2 представлена принципиальная расчётная схема размещения контейнеров и оптимизированная масса Golden Delicious в камере

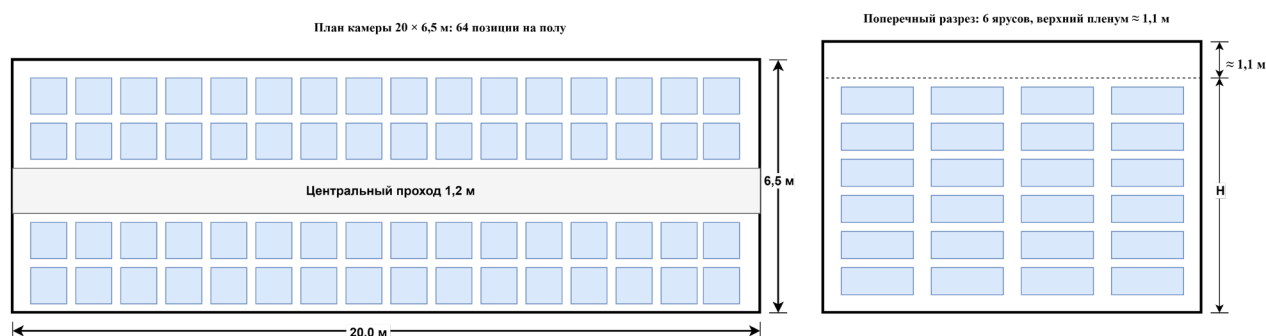


Рис. 2. Расчётная схема размещения контейнеров и оптимизированная масса Golden Delicious в камере³

В настоящем сообщении удельная теплоёмкость яблок принята равной 3,65 кДж/(кг·К), что соответствует продукту с высоким влагосодержанием; для тары принято значение 1,7 кДж/(кг·К) [16].

³ Источник: разработано авторами.

Средняя теплота дыхания в режиме хранения задана на уровне 5 Вт/т с анализом чувствительности [17]. Инфильтрация рассчитана по разности энтальпий наружного и камерного воздуха [18]. Электрическая мощность вентиляторов принята равной 2,2 кВт на камеру в период первоначального охлаждения и 1,1 кВт в режиме хранения. Дополнительно учтены освещение мощностью 0,5 кВт, оттайка мощностью 4 кВт в течение 0,5 ч/сут, автоматика мощностью 0,15 кВт и обогрев вспомогательных элементов мощностью 0,3 кВт с коэффициентом включения 0,5.

Летняя регрессия COP не экстраполировалась непосредственно на зимние температуры. Для сезонного расчёта использована калиброванная модель второго закона:

$$COP(t) = \eta_{II} \cdot \frac{T_{исп}}{T_{конд}(t) - T_{исп}}, \quad T_{конд}(t) = \max[T_{нар}(t) + 10^\circ C; 25^\circ C] \quad (6)$$

Коэффициент η_{II} выбран так, чтобы при $T_{нар} = 31,1^\circ C$ модель воспроизводила мониторинговое значение $COP = 3,98$, что обеспечивает преимущество со SCADA-регрессией и одновременно ограничивает необоснованное увеличение COP зимой.

Сценарии энергоснабжения, BESS и термический сдвиг. В табл. 2 представлены расчётные сценарии для четырёх различных составов системы энергоснабжения объекта: сеть + холодильная система; сеть + СФЭС; сеть + СФЭС + BESS; сеть + СФЭС + BESS + предварительное охлаждение.

Таблица 2
Расчётные сценарии⁴

Сценарий	Состав системы	Назначение
A0	Сеть + холодильная система	Базовый вариант
A1	Сеть + СФЭС	Прямое локальное использование PV
A2	Сеть + СФЭС + BESS	Электрический сдвиг солнечной энергии
A3	Сеть + СФЭС + BESS + предварительное охлаждение	Совместное электрическое и термическое аккумулирование

Как видно из табл. 2, для A1 помесечное локальное PV-покрытие принято по верифицированным SSR объекта. Для A2 и A3 увеличение локального использования PV масштабировано по соотношениям, полученным на проектно-имитационном этапе: 411,6/320,8 для «PV + BESS» и 419,9/320,8 для интегрированной конфигурации [12]. Тем самым результаты A2 и A3 являются продуктово-ориентированными сценариями, а не прямыми измерениями двух камер.

$$SOC_{t+1} = SOC_t + \frac{(\eta_{зар} P_{зар}(t) - P_{раз}(t) / \eta_{раз}) \Delta t}{E_{BESS}} \quad (7)$$

$$E_{тепл,сдв} = S_{экв} \Delta T_{пред} \quad (8)$$

Эквивалентная тепловая ёмкость двух камер, яблок, тары, воздуха и активной части конструкций принята равной 298,0 кВт·ч/К. Предварительное охлаждение на 0,5 и 1,0 °C создаёт соответственно 149,0 и 298,0 кВт·ч_{th} управляемого теплового буфера. При COP = 3,98 это эквивалентно переносу 37,4 и 74,9 кВт·ч электрической энергии, или среднему снижению вечерней мощности на 12,5 и 25,0 кВт в трёхчасовом интервале.

Эксергетическая, эксергоэкономическая и эксергоэкологическая модели. Границей эксергетической оценки системы энергоснабжения объекта является электрическая шина 0,4 кВ: электрическая энергия сети, СФЭС и BESS принимается равной электрической эксергии. Эксергия солнечного излучения до PV-модулей и эксергетические потери производства модулей не включены — их влияние учитывается через коэффициент выбросов жизненного цикла PV [19, 20]:

$$Ex_{хол,м} = Q_{хол,м} \left(\frac{T_{0,м}}{T_{хр}} - 1 \right) \quad (9)$$

$$\eta_{экс} = \frac{\sum Ex_{хол,м}}{E_{эл} + E_{BESS,пот}} \quad (10)$$

⁴ Источник: составлено авторами.

где $T_{0,m}$ — среднемесячная температура окружающей среды в абсолютной шкале, (T_{xp}) — температура холодильного пространства, принятая равной 271,15 К. Эксергетическое разрушение определяется разностью между электрической эксергией на границе системы и полезной эксергией холода:

$$C_{\text{экс,оп}} = \frac{C_{\text{сеть}}}{Ex_{\text{хол}}}, \quad C_{\text{экс,LCC}} = \frac{C_{\text{сеть}} + Z_{PV} + Z_{BESS}}{Ex_{\text{хол}}} \quad (11)$$

где операционный показатель $C_{\text{экс,оп}}$ отражает только покупку электроэнергии. Полный относимый показатель $C_{\text{экс,LCC}}$ дополнительно включает годовые приведённые затраты на СФЭС и BESS. Затраты на PV распределены пропорционально PV-энергии, использованной выбранным яблочным блоком. Затраты на BESS распределены пропорционально объёму энергии, отданной при разряде, относительно годового объёма энергии, отданной системой при разряде [21–23]. Капитальные затраты существующей холодильной установки исключены как общие для всех сценариев:

$$b_{\text{экс}} = \frac{M_{\text{сеть}} + M_{PV} + M_{BESS}}{Ex_{\text{хол}}} \quad (12)$$

$$b_{\text{экс,расш}} = \frac{M_{\text{сеть}} + M_{PV} + M_{BESS} + M_{\text{хл}}}{Ex_{\text{хол}}} \quad (13)$$

Основной эксергоэкологический показатель учитывает энергетическую цепь [24–25]. Расширенный вариант дополнительно включает прямые выбросы от утечки хладагента. Поскольку фактические тип, заряд и журнал дозаправок отсутствуют, применён референтный сценарий R404A: 12 кг на камеру, утечка 5 %/год, GWP100 = 3922. Полученный вклад хладагента интерпретируется как чувствительность, а не как инвентаризированный выброс объекта.

АНАЛИЗ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Загрузка, первоначальное охлаждение и холодильная нагрузка. Оптимизированная масса составляет 130,6 т на камеру и 261,1 т для К-01/К-02. В период первичного охлаждения 84,1 % расчётной холодопроизводительности расходуется на охлаждение продукта и тары; оставшаяся часть приходится на ограждения, инфильтрацию, дыхание и тепловыделение вентиляторов. Расчётная пиковая нагрузка 44,3 кВт на камеру не превышает паспортное значение 46,5 кВт, однако располагаемый резерв мощности остаётся ограниченным. Поэтому поступление продукта при температуре 30 °С, одновременное длительное открывание дверей или ухудшение теплоизоляции требуют ступенчатой загрузки. На рис. 3 представлены месячная холодильная нагрузка объекта, электропотребление и полезная эксергия холода в расчётном цикле.

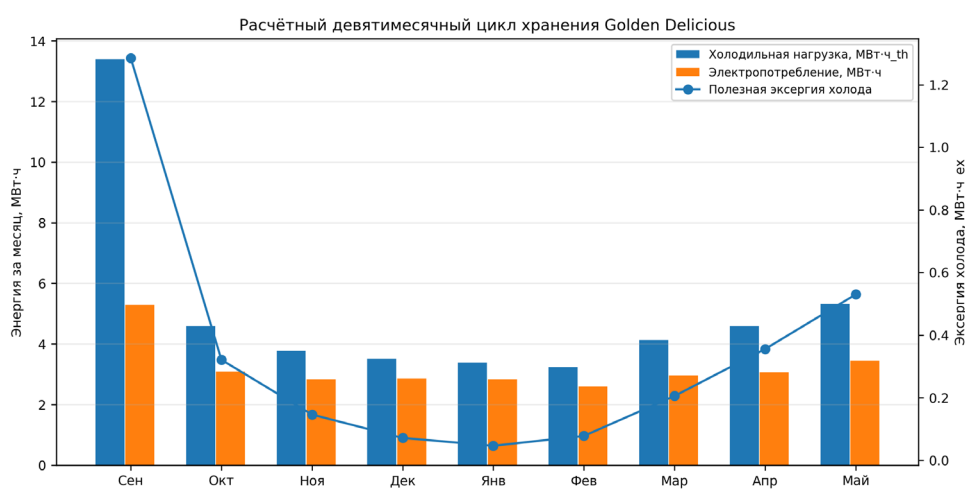


Рис. 3. Месячная холодильная нагрузка, электропотребление и полезная эксергия холода в расчётном цикле⁵

⁵ Источник: расчёты авторов.

Как видно из рис. 3, за цикл хранения суммарная холодильная нагрузка составила 45,9 МВт·ч_{th}, электропотребление — 29,0 МВт·ч, полезная эксергия холода — 3,04 МВт·ч_{ex}. Средний COP компрессорной части равен 5,23, а системный COP с вентиляторами и вспомогательными нагрузками — 1,58. Удельное электропотребление составляет 111,0 кВт·ч/т, полезная эксергия холода — 11,63 кВт·ч_{ex}/т. Максимальные значения Q и E_x наблюдаются в сентябре из-за первоначального охлаждения продукции и высокой температуры наружного воздуха. Зимой энергетическая нагрузка снижается, но эксергетический фактор также уменьшается из-за сближения T₀ и T_r.

Энергетические и эксергетические показатели сценариев. В табл. 3 представлены энергетические и эксергетические результаты за один цикл хранения яблок по различным сценариям энергоснабжения. Как видно из табл. 3, в А1 прямое солнечное покрытие выбранного блока составляет 15,0 МВт·ч, вследствие чего сетевой отбор уменьшается с 29,0 до 14,0 МВт·ч. В А3 локальное использование PV достигает 19,0 МВт·ч, сетевой отбор — 10,0 МВт·ч. Относимый к яблочному блоку разряд BESS составляет около 4,0 МВт·ч, или приблизительно 10 эквивалентных полных циклов по доступной ёмкости 400 кВт·ч. Для всего предприятия предварительный годовой объём энергии, отданной системой накопления при разряде, составляет 99,1 МВт·ч, что соответствует примерно 248 эквивалентным полным циклам.

Таблица 3

Энергетические и эксергетические результаты за один цикл хранения⁶

Сц.	Сеть, МВт·ч	PV→нагрузка, МВт·ч	Разряд BESS, МВт·ч	η_{ex} , %	Опер. затраты, млн сум
A0	28.98	0.00	0.00	10.48	26.08
A1	13.97	15.01	0.00	10.48	12.57
A2	10.28	18.70	3.69	10.33	9.25
A3	9.97	19.00	4.00	10.32	8.98

Следовательно, систему накопления целесообразно рассматривать как общий энергетический актив предприятия, а не как оборудование, предназначенное исключительно для двух камер хранения. Эксергетическая эффективность сохраняется на уровне около 10,5 % для сценариев А0–А1 и незначительно снижается до 10,3 % в сценариях А2–А3 вследствие потерь при заряде и разряде [23]. СФЭС изменяет источник электрической эксергии, но не устраняет основное разрушение эксергии при преобразовании высококачественной электроэнергии в низкотемпературный холодильный эффект [13–15]. BESS повышает гибкость и надёжность энергоснабжения, однако сам по себе не увеличивает термодинамическую эффективность холодильного цикла.

Эксергоэкономические и эксергоэкологические результаты. В табл. 4 представлены результаты эксергоэкономических и эксергоэкологических показателей системы охлаждения объекта по четырём сценариям энергоснабжения.

Таблица 4

Эксергоэкономические и эксергоэкологические показатели системы охлаждения объекта⁷

Сц.	$C_{экс,LCC}$ USD/кВт·ч _{ex}	Затраты, USD/т	$b_{экс}$, кг CO ₂ e/кВт·ч _{ex}	CO ₂ , кг/т	$b_{экс,расш}$, кг CO ₂ e/кВт·ч _{ex}
A0	0.734	8.54	5.25	61.0	6.41
A1	0.622	7.24	2.75	32.0	3.91
A2	0.923	10.73	2.18	25.3	3.34
A3	0.919	10.68	2.13	24.7	3.29

Как видно из табл. 4, сценарий А3 демонстрирует наиболее благоприятный результат по операционному тарифному критерию: стоимость сетевой электроэнергии снижается с 26,08 до 8,98 млн сум за цикл, а C_{ex,op} - с 8587 до 2956 сум/кВт·ч_{ex}. Однако с учётом капитальных и эксплуатационных затрат на СФЭС и BESS минимальное значение C_{ex,LCC} равно 0,622 USD/кВт·ч_{ex}, достигается в сценарии А1. В сценарии А3 данный показатель составляет 0,919 USD/кВт·ч_{ex}, что превышает значение базового сценария А0 — 0,734 USD/кВт·ч_{ex}. При плоском тарифе уровня 2023 г. аккумулятор не

⁶ Источник: расчёты авторов.

⁷ Источник: расчёты авторов.

окупается исключительно за счёт энергетического арбитража, поэтому при оценке его экономической эффективности необходимо учитывать резервирование электроснабжения, предотвращение порчи продукции и снижение пиковой мощности [21; 22].

На рис. 4 показан эксергоэкономический и эксергоэкологический компромисс расчётных сценариев, при котором углеродная интенсивность энергетической цепи снижается с 5,25 кг CO₂-экв./кВт·ч_{ex} в A0 до 2,13 кг CO₂-экв./кВт·ч_{ex} в A3, то есть на 59,5 %. В пересчёте на продукцию показатель сокращается с 61,0 до 24,7 кг CO₂-экв./т. При добавлении референтной утечки R404A показатели увеличиваются до 6,41 и 3,29 кг CO₂-экв./кВт·ч_{ex} соответственно [24–26], что показывает: контроль утечек и переход к хладагенту с низким GWP могут быть сопоставимы по экологическому эффекту с модернизацией электроснабжения.

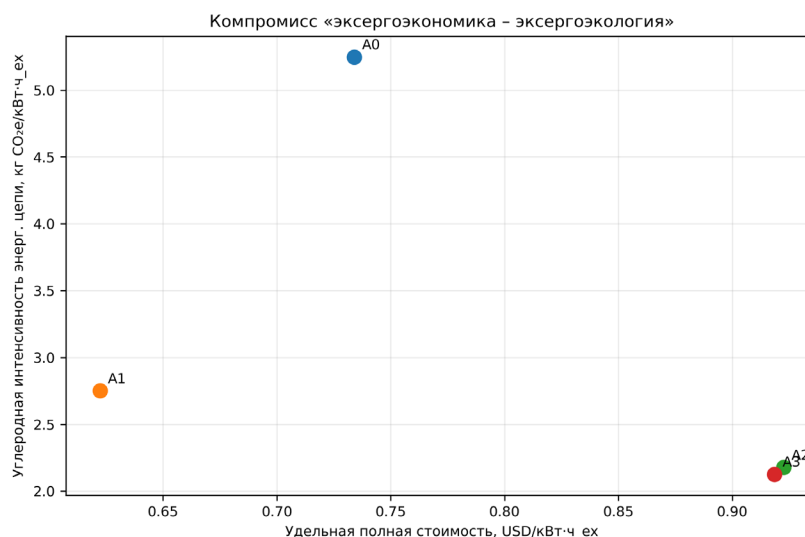


Рис. 4. Эксергоэкономический и эксергоэкологический компромисс расчётных сценариев⁸

Чувствительность и ограничения. В табл. 5 представлены основные неопределённости и результаты анализа чувствительности параметров продукции (яблок) и энергоснабжения объекта исследования. Ключевым ограничением является отсутствие покамерного электросчётчика, данных о фактической массе продукции, журнала открывания дверей, сведений о марке и заправочной массе хладагента.

Таблица 5

Основные неопределённости и чувствительность продукции и параметров энергоснабжения объекта исследования⁹

Фактор	База	Диапазон	Влияние на результат
Масса яблок	261,1 т	240–280 т	Влияет на нагрузку первоначального охлаждения и удельные показатели в расчёте на 1 т продукции.
Температура продукции при поступлении	25 °C	20–30 °C	Основной фактор, определяющий пиковую нагрузку первоначального охлаждения.
Теплота дыхания	5 Вт/т	3–10 Вт/т	Влияет на зимнюю базовую нагрузку
Капитальные затраты на СФЭС и систему накопления электрической энергии (BESS)	750/350 USD	650–900 / 300–480	$C_{\text{экс, LCC}}$ A3: ориентировочно 0,73–1,27 USD/кВт·ч _{ex}

⁸ Источник: расчёты авторов.

⁹ Источник: расчёты авторов.

Коэффициент выбросов электросети	0,55 кг/кВт·ч	0,45–0,60	$b_{\text{экс}}$ АЗ: 1,76–2,32 кг/кВт·ч _{ех} без утечки
Утечка хладагента	5 %/год	2–10 %	$b_{\text{экс,расш}}$ АЗ: 2,23–4,64 кг/кВт·ч _{ех}
Распределение затрат СФЭС и BESS	годовой объём разряженной энергии	альтернативные правила	Изменяет долю капитальных затрат, относимую к хранению продукции, но не влияет на энергетический баланс.
Качество яблок	не моделируется	регулируемая атмосфера (CA), O ₂ /CO ₂ , потери массы	Требует отдельной продуктовой верификации

Настоящая статья представляет воспроизводимый инженерный расчёт, откалиброванный по параметрам объекта и агрегированному мониторингу, но не исключает необходимости проведения натурального аудита.

Полученный расчёт показывает, что яблоки и конструкции камер действительно могут использоваться как кратковременный термический накопитель, но его функция отличается от BESS. Смещение температуры на 1 °C создаёт около 298 кВт·ч_{th} буферного холода, эквивалентного 74,9 кВт·ч электроэнергии при летнем COP. Это существенно для снижения трёхчасового вечернего пика двух камер, однако не заменяет BESS при длительном отключении сети. BESS 500 кВт·ч/200 кВт, напротив, имеет доступную энергию около 380 кВт·ч и способен обеспечить более двух часов критической нагрузки порядка 140 кВт на уровне всего яблочного блока, если неприоритетные потребители отключены [21–23].

При прочих равных условиях прямое использование энергии СФЭС является наиболее экономически предпочтительным вариантом, тогда как применение BESS способствует повышению надёжности энергоснабжения и снижению потребления электроэнергии из сети, но требует дополнительных капитальных затрат и сопровождается небольшими эксергетическими потерями [22; 23]. Именно поэтому решение по накопителю нельзя принимать только по показателю SSR или стоимости купленной электроэнергии. Для холодильного предприятия должна быть выполнена стоимостная оценка технологических рисков: потери температуры, порчи продукции, аварийного простоя компрессоров и ограничения мощности со стороны сети.

Эксергоэкологическая оценка также меняет приоритеты. Снижение сетевого отбора даёт основной эффект энергетической цепи, но потенциальная утечка хладагента с высоким GWP способна заметно увеличить углеродную интенсивность полезного холода [24–26]. В связи с этим практические меры по снижению углеродной интенсивности должны включать четыре взаимосвязанных направления: локальное использование энергии СФЭС, управляемое циклирование BESS, повышение энергоэффективности вентиляторов и компрессоров, а также обеспечение герметичности холодильного контура либо переход на хладагент с более низким значением GWP.

Научно-методическая новизна настоящего исследования заключается в сопоставлении двух форм аккумулирования — электрической энергии в LiFePO₄ BESS и тепловой энергии в массе яблок — посредством единого полезного продукта ($Ex_{\{\text{cool}\}}$), представляющего собой полезную эксергию холода. Такой подход позволяет одновременно оценивать стоимость и экологическое воздействие в расчёте на 1 кВт·ч полезной эксергии холода и на 1 т сохранённой продукции [13; 14].

Такой показатель делает видимым термодинамическое качество процесса и предотвращает ошибочный вывод о том, что увеличение солнечной доли автоматически повышает эксергетическую эффективность.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Констатируя вышеизложенное, можно отметить, что для двух камер хранения Golden Delicious объёмом по 754 м³ рациональная расчётная загрузка составляет 130,6 т на камеру, или 261,1 т в двух камерах. При поступлении продукции с температурой 25 °C и длительности первоначального охлаждения 96 ч максимальная холодильная нагрузка равна 44,3 кВт на камеру и не превышает паспортные 46,5 кВт. За девятимесячный цикл расчётное электропотребление составляет 29,0 МВт·ч, холодильная нагрузка — 45,9 МВт·ч_{th}, полезная эксергия холода — 3,04 МВт·ч_{ех}, а удельное электропотребление — 111 кВт·ч/т. Прямое использование СФЭС снижает сетевой отбор до 14,0 МВт·ч, а интегрированный сценарий с

BESS и температурным сдвигом — до 10,0 МВт·ч. Операционная стоимость полезной эксергии при этом уменьшается с 8587 до 2956 сум/кВт·ч_{ex}, а углеродная интенсивность энергетической цепи — с 5,25 до 2,13 кг CO₂-экв./кВт·ч_{ex} [11–17]. Вместе с тем полная приведённая удельная стоимость для сценария А3 при ценах 2023 г. составляет 0,92 USD/кВт·ч_{ex} и превышает стоимость варианта без BESS, вследствие чего накопитель должен оцениваться совместно с резервной функцией и предотвращением технологического ущерба [21–23]. Предварительное охлаждение на 1 °С обеспечивает около 298 кВт·ч_{th} буферного холода и позволяет сместить примерно 75 кВт·ч электрического потребления из вечернего окна. Практическое применение результатов требует покамерного субучёта, уточнения фактической загрузки и характеристик хладагента, а также натурной проверки качества яблок в течение всего периода хранения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ghafoor A., Munir A. Worldwide overview of solar thermal cooling technologies // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – Vol. 43. – P. 763–774. – DOI: 10.1016/j.rser.2014.11.073.
2. Otanicar T., Taylor R. A., Phelan P. E. Prospects for solar cooling: An economic and environmental assessment // *Solar Energy*. – 2012. – Vol. 86, No. 5. – P. 1287–1299. – DOI: 10.1016/j.solener.2012.01.020.
3. Han Y., Li M., Wang Y., Li G., Ma X., Wang R. Impedance matching control strategy for a solar cooling system directly driven by distributed photovoltaics // *Energy*. – 2019. – Vol. 168. – P. 953–965. – DOI: 10.1016/j.energy.2018.11.148.
4. Seyednezhad M., Najafi H. Solar-powered thermoelectric-based cooling and heating system for building applications: A parametric study // *Energies*. – 2021. – Vol. 14, No. 17. – Art. 5573. – DOI: 10.3390/en14175573.
5. Bozorgi M., Tasnim S. H., Mahmud S. Enhancing indoor thermal comfort and sustainability: A solar-driven desiccant cooling and adsorption chiller system with environmental impact assessment // *Solar Energy*. – 2024. – Vol. 271. – Art. 112440. – DOI: 10.1016/j.solener.2024.112440.
6. Hovgaard T. G., Larsen L. F. S., Edlund K., Jørgensen J. B. Model predictive control technologies for efficient and flexible power consumption in refrigeration systems // *Energy*. – 2012. – Vol. 44, No. 1. – P. 105–116. – DOI: 10.1016/j.energy.2011.12.007.
7. International Electrotechnical Commission. IEC 61724-1:2021. Photovoltaic system performance. Part 1: Monitoring. – 2nd ed. – Geneva: IEC, 2021.
8. IEEE Standards Association. IEEE Std 1547-2018. IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. – New York: IEEE, 2018.
9. Matchanov N. A., Kulmatov K. K., Muminov S. A., Dekhkonova M. K., Shodiev B. T. Power supply of an industrial refrigeration enterprise based on a grid-connected photovoltaic power plant (Fergana Valley). Part 1: Schematic solutions and operational assessment // *Alternative Energy*. – 2026. – Vol. 23, No. 2. – P. 101–111. – DOI: 10.70769/2181-284.ME.2(23).2026.9.
10. Lazzaretto A., Tsatsaronis G. SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems // *Energy*. – 2006. – Vol. 31, No. 8–9. – P. 1257–1289. – DOI: 10.1016/j.energy.2005.03.011.
11. Meyer L., Tsatsaronis G., Buchgeister J., Schebek L. Exergoenvironmental analysis for evaluation of the environmental impact of energy conversion systems // *Energy*. – 2009. – Vol. 34, No. 1. – P. 75–89. – DOI: 10.1016/j.energy.2008.07.018.
12. Ahamed J. U., Saidur R., Masjuki H. H. A review on exergy analysis of vapor compression refrigeration systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2011. – Vol. 15, No. 3. – P. 1593–1600. – DOI: 10.1016/j.rser.2010.11.039.
13. Mykhailik V., Lebovka N. Specific heat of apple at different moisture contents and temperatures // *Journal of Food Engineering*. – 2014. – Vol. 123. – P. 32–35. – DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2013.09.015.
14. ASHRAE Handbook—Refrigeration. SI Edition. – Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2022.
15. Barbosa-Cánovas G. V., Fernández-Molina J. J., Alzamora S. M., Tapia M. S., López-Malo A., Welti-Chanes J. Handling and Preservation of Fruits and Vegetables by Combined Methods for Rural Areas. – Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2003. – FAO Agricultural Services Bulletin No. 149. – ISBN 92-5-104861-4.
16. Yaptenco K. F., Esguerra E. B. Good Practice in the Design, Management and Operation of a Fresh Produce Packing-House / technical editors R. S. Rolle, E. Hewett. – Bangkok: FAO Regional Office for Asia and the Pacific, 2012. – RAP Publication 2012/04. – 188 p. – ISBN 978-92-5-107194-6.

17. International Organization for Standardization. ISO 14040:2006. Environmental Management. Life Cycle Assessment. Principles and Framework. – Geneva: ISO, 2006.
18. International Organization for Standardization. ISO 14044:2006. Environmental Management. Life Cycle Assessment. Requirements and Guidelines. – Geneva: ISO, 2006.
19. Stucki M., Götz M., de Wild-Scholten M., Frischknecht R. Environmental Life Cycle Assessment of Electricity from PV Systems: 2023 Data Update. – Paris: IEA Photovoltaic Power Systems Programme, Task 12, 2024.
20. Cole W., Karmakar A. Cost Projections for Utility-Scale Battery Storage: 2023 Update. – Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2023. – Technical Report NREL/TP-6A40-85332.
21. Quoilin S., Kavvadias K., Mercier A., Pappone I., Zucker A. Quantifying self-consumption linked to solar home battery systems: Statistical analysis and economic assessment // *Applied Energy*. – 2016. – Vol. 182. – P. 58–67. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.08.077.
22. Schimpe M., Naumann M., Truong N., Hesse H. C., Santhanagopalan S., Saxon A., Jossen A. Energy efficiency evaluation of a stationary lithium-ion battery container storage system via electro-thermal modeling and detailed component analysis // *Applied Energy*. – 2018. – Vol. 210. – P. 211–229. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.10.129.
23. International Renewable Energy Agency. Renewable Power Generation Costs in 2023. – Abu Dhabi: IRENA, 2024.
24. Peters J. F., Baumann M., Zimmermann B., Braun J., Weil M. The environmental impact of Li-ion batteries and the role of key parameters: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – Vol. 67. – P. 491–506. – DOI: 10.1016/j.rser.2016.08.039.
25. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani et al. – Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2021. – DOI: 10.1017/9781009157896.
26. United States Environmental Protection Agency. Technology Transitions GWP Reference Table [Electronic resource]. – Washington, DC: U.S. EPA. – Date of access: 17.07.2026.

Proofreader: Xondamir Ismoilov
Layout and Designer: Hasan Maqsudov

2026. № 7

© When materials are reproduced, the ECONOSCITECH-INTEGRATION journal must be cited as the source. Authors are responsible for the accuracy of the information in materials and advertisements published in the journal. Editorial opinions may not always align with those of the authors. Submitted materials will not be returned to the editorial office.

To publish articles in this journal, you may submit articles, advertisements, stories, and other creative materials through the following links. Materials and advertisements are published on a paid basis.

You may subscribe to the journal at any time using the following details. Once subscribed, please send a screenshot or photo of your payment confirmation to our Telegram page @iqtisodiyot_77. Based on this, we will send the latest issue of the journal to your address each month.

Our address: Tashkent city, Yunusobod district, 19th block, House 17.

