



ГОРЯЧИЕ МАТЕРИИ
ХОЛОДНОГО
КОСМОСА

31

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ
ЭФФЕКТИВНОСТЬ LLM
В СЕРВИСНОМ СЕКТОРЕ

36

ТРАНСФЕР ТЕХНОЛОГИЙ
И «ЗЕЛЕННЫЕ»
ПАРТНЕРСТВА

55

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ
БИО- И
НАНОТЕХНОЛОГИИ

59

Наука и инновации

№3 (277)
МАРТ 2026

научно-
практический
журнал



Материалы
и технологии для
экстремальных
условий

ISSN 1818-9857



ISSN 2412-9372 (online)



ОКБ Академическое

КОНСТРУИРУЕТ И ИЗГОТАВЛИВАЕТ:

- емкостное, теплообменное и сепарационное оборудование для химической, нефтеперерабатывающей промышленности, фармацевтики и пищевой отрасли
- оборудование для пунктов хранения радиоактивных отходов, относящихся к 3-му классу безопасности
- оборудование для хранения высокоопасных газов (окись этилена)
- другие виды нестандартного емкостного и теплообменного оборудования по требованиям заказчика, в том числе импортозамещающего
- оказывает услуги по механической обработке и изготовлению металлических изделий с использованием металлорежущего оборудования





ПРОВОДИТ:

**радиографическую, ультразвуковую
и капиллярную дефектоскопию**

механические испытания

химический и спектральный анализ металла

**металлографические исследования сварных
соединений и металлов**

***Внедренная система менеджмента качества
(ISO 9001, ISO 19443) обеспечивает соблюдение
требований международных стандартов***



+375 (17) 364-13-64
+375 (17) 364-40-52 (факс)



<https://www.okb-acad.by/aboutus.html>



okb-acad@yandex.by



Республика Беларусь, г. Минск,
ул. Академика Красина, 99



Зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь, свидетельство о регистрации №388 от 18.05.2009 г.

Учредитель:

Национальная академия наук Беларуси

Редакционный совет:

В.С. Караник <i>председатель совета</i>	С.В. Гапоненко	М.В. Мясникович
С.А. Чижик <i>сопредседатель совета</i>	В.Л. Гурский	В.Я. Панченко
С.С. Щербаков <i>сопредседатель совета</i>	В.Г. Гусаков	В.Н. Пармон
Ж.В. Комарова	АЕ. Дайнеко	О.Г. Пенязьков
В.В. Азаренко	Дун Суочэн (Dong Suocheng)	Ф.И. Привалов
О.Ю. Баранов	В.Г. Залесский	С.П. Рубникович
В.Г. Богдан	А.И. Иванец	О.О. Руммо
	А.В. Кильчевский	Сюцин Лю (Xuqing Liu)
	А.А. Коваленя	А.В. Труханов
	Э.И. Коломиец	С.В. Харитончик
	С.А. Красный	А.Г. Шумилин

Главный редактор:

Жанна Комарова

Ведущие рубрик:

Ирина Емельянович
Наталья Минакова

Татьяна Жданович
Юлия Василишина

Дизайн и верстка:

Татьяна Аверкова

Адрес редакции:

220072, г. Минск, ул. Академическая, 1-129.
Тел.: (017) 351-14-46,
e-mail: nii2003@mail.ru,
www.innosfera.belnauka.by

Подписные индексы:

007 532 (ведомственная) 00 753 (индивидуальная)
Формат 60x84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 9,8.
Тираж 445 экз. Цена договорная.
Подписано в печать 19.03.2026.

Издатель: РУП «Издательский дом «Беларуская навука».
Свид. о гос. рег. №1/18 от 02.08.2013.
г. Минск, ул. Ф. Скорины, 40. Заказ №306

Отпечатано в ОАО «ГРАНСТЭК». Лицензия 02330 от 23.01.2014. Свидетельство о ГРИРПИ № 2/37 от 29.01.2014.

© «Наука и инновации»

При перепечатке и цитировании ссылка на журнал обязательна. За содержание рекламных объявлений редакция ответственности не несет. Мнение редакции не всегда совпадает с мнением авторов статей. Рукописи не рецензируются и не возвращаются.

Содержание

ТЕМА НОМЕРА: МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ

Юлия Ушеренко, Анатолий Белоус

Защита космических аппаратов от электромагнитного излучения 4

Представлены разработки и технические решения отечественных исследователей и инженеров, значительно продвинувшие вперед решение мировой проблемы – негативного воздействия электромагнитных излучений на летательные аппараты и технические устройства в космическом пространстве.

Сергей Грабчиков, Станислав Ластовский, Анна Якушевич,
Николай Василенков

Материалы радиационной защиты электронной компонентной базы космических аппаратов 9

Обоснован перспективный путь повышения надежности используемой электронной компонентной базы, в том числе за счет применения технологий локальной радиационной защиты.

Светлана Данилова-Третьяк, Василий Савчин, Владимир Чупрасов,
Михаил Третьяк

Испытания тепловой защиты на Земле – гарантия безопасности в космосе 17

Представлено одно из направлений работ по космической тематике, проводимых в Институте тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси – исследование материалов для обеспечения тепловой защиты летательных аппаратов.

Владимир Васецкий, Владимир Грищенко, Михаил Дорошко,
Анастасия Махнач, Олег Пенязьков

Исследование стойкости защитных материалов к ударному воздействию высокоскоростных частиц 23

На примере одного наименования распространенного конструкционного сплава Д16Т разработан и реализован способ исследования стойкости защитных материалов к ударному взаимодействию с высокоскоростными частицами. Комбинирование экспериментов и численного моделирования как наиболее перспективный подход в изучении высокоскоростного удара позволяет получить величины, которые в дальнейшем можно задействовать при описании поведения материалов мишеней без трудоемких и дорогостоящих испытаний.

Валентин Асташинский, Георгий Дзагнидзе, Павел Шоронов

Тяговые элементы плазменных двигателей космического назначения на основе миниатюрных магнитоплазменных компрессоров 28

Лабораторией физики плазменных ускорителей Института тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси разработаны не имеющие аналогов квазистационарные сильноточные плазменные ускорители, что открывает принципиально новые возможности для создания тяговых элементов двигательных установок с управляемым вектором тяги для малых космических аппаратов, а также стратосферных летательных аппаратов.

Павел Гринчук, Михаил Кияшко, Андрей Акулич, Дмитрий Соловей,
Михаил Стёпкин, Валентина Щербакова

Горячие материи холодного космоса: опыт изготовления и тестирования отечественных теплозащитных материалов 31

Описаны пути поиска и совершенствования альтернативных вариантов тепловой защиты для многофазовых космических систем нового поколения.

ИННОВАЦИОННАЯ ЭКОНОМИКА

Екатерина Пискун, Егор Крячев, Акбаржон Азизов

Риск-ориентированная оценка экономической эффективности LLM в сервисном секторе Республики Беларусь 36

Представлен анализ трансформации национального бизнеса под воздействием больших языковых моделей.

ЭКОНОМИКА КАЧЕСТВА

Эдуард Кондратьев, Николай Гудз

Лин-инструменты и эффективность процессов в вагоностроении 45

На примере вагоноремонтного завода РЖД авторы показали, как путем использования потенциала персонала, базовых лин-инструментов удалось запустить новую систему планирования работ и загрузки мощностей, повысить производительность труда и качество работ.

ЦИФРОВАЯ ПЕРСПЕКТИВА

Ирина Мальгина

Национальные стратегии развития искусственного интеллекта 49

Рассмотрены национальные стратегии развития ИИ в разных странах, в том числе и в государствах постсоветского пространства.

Цюй Цзиньтун

Трансфер технологий и «зеленые» промышленно-логистические партнерства в рамках инициативы «Пояс и путь» 55

Проанализирована деятельность Китайско-Белорусского инновационного центра промышленных технологий как платформы трансфера знаний, инкубации инноваций и углубления двустороннего научно-технического сотрудничества.

ТОЧКА КОНВЕРГЕНЦИИ

Анатолий Зинченко, Александр Шепшелев, Елена Болотник

Молекулярные био- и нанотехнологии на службе человека 59

Статья знакомит с приоритетными направлениями, наиболее значимыми результатами и перспективами научной и научно-технической деятельности Института микробиологии НАН Беларуси, в частности отраслевой лаборатории молекулярных био- и нанотехнологий.

УГОЛ ЗРЕНИЯ

Александр Орешенков

Региональные технологические платформы как инструмент обеспечения биологической безопасности 65

Приводятся данные о перспективах новой формы сотрудничества заинтересованных сторон с целью продвижения инноваций, обосновывается целесообразность ее внедрения в области фарминдустрии и биотехнологий в одном из регионов Беларуси – Витебской области.

ОТКРЫВАЯ СЕБЯ

Ирина Полоз

Ученый, мать, жена: миссия выполнима? 70

Наука – это не череда озарений, а бесконечный процесс проверки реальности и себя на прочность, – уверена героиня новой рубрики журнала, посвященной Году белорусской женщины.

Вольга Юшкевіч

3 творчым імпэтам 74

У жыцці заўсёды знойдзецца людзі, якія будуць ставіць пад сумненне твае ідэі, – упэўнена аўтар артыкула. Але важна верыць у сябе, свае сілы і працягваць ісці ўласным шляхам, нягледзячы на цяжкасці і перашкоды.

ДИССЕРТАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анна Гончар, Константин Фурс, Александр Тузиков, Александр Андрианов

Компьютерная идентификация молекул-кандидатов в лекарственные препараты против туберкулеза 78

Проведен виртуальный скрининг библиотеки биологически активных соединений, направленный на идентификацию малых молекул, способных ингибировать каталитическую активность одного из ключевых ферментов, участвующих в биосинтезе миколовых кислот клеточной стенки микобактерии туберкулеза. Обнаружено соединение-лидер, перспективное в качестве базовой структуры для разработки новых противотуберкулезных молекул.



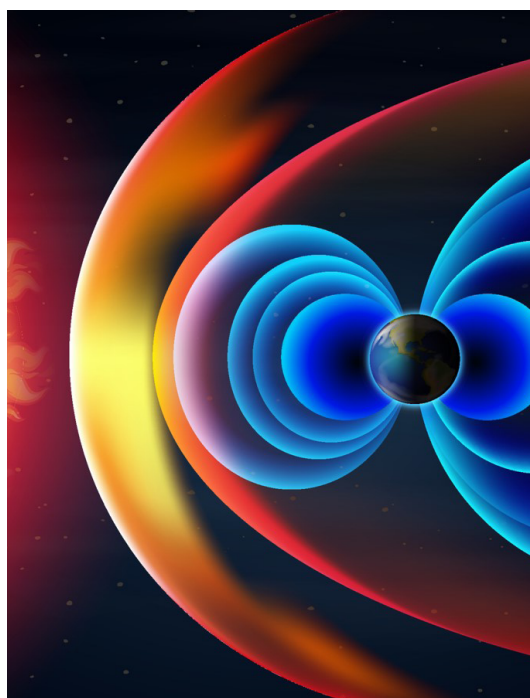


Юлия Ушеренко,
доцент кафедры
«Порошковая металлургия,
сварка и технология
материалов» Белорусского
национального технического
университета, кандидат
технических наук



Анатолий Белоус,
член-корреспондент
НАН Беларуси,
профессор,
заслуженный
изобретатель
Республики Беларусь

За последнее десятилетие в мире были достигнуты значительные успехи как в изучении особенностей влияния электромагнитных излучений на биологические и технические объекты, так и создании современных методов защиты от лучей естественного и искусственного (антропогенного) происхождения. Разработаны новые материалы, технологии и устройства, способные эффективно экранировать или нейтрализовать их вредное воздействие. Инновационные подходы в этой сфере не обошли стороной и Беларусь. В основу многих новшеств были положены результаты многолетних теоретических и экспериментальных исследований большого коллектива белорусских ученых и инженеров. Многие из этих работ стали базой для современных технических решений при обеспечении безопасности бортовой электроники отечественной космической и военной техники.



Защита космических аппаратов от электромагнитного излучения

«Доспехи» для микросхем

При работе космических аппаратов в околоземном пространстве их бортовая аппаратура подвергается интенсивному воздействию электромагнитных излучений и магнитных полей. Они вызывают «сбои» в работе управляющих систем и искажения в данных, поступающих от чувствительных научных приборов. Современные спутники – как коммерческие, так и военные – буквально насыщены электронными устройствами, и малейшее электромагнитное возмущение может привести к серьезным последствиям.

Электромагнитные (ЭМИ) и ионизирующие (ИИ) излучения – одни из главных дестабилизирующих факторов, влияющих на элементы, блоки и приборы ракетно-космических комплексов. Более того, они представляют угрозу для надежности и стабильности функционирования бортовой электроники в течение всего заданного срока активного существования (САС) аппарата, который может достигать 10 и более лет.

На фоне стремительного развития электротехнических, радиоэлектронных и информационных технологий значительно возрос уровень электромагнитного фона, расширился диапазон используемых частот ЭМИ и увеличилась их амплитуда. Одновременно развитие бортовой электроники идет по пути миниатюризации устройств, повышения плотности компоновки и снижения массы. Все это делает задачу обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) и стабильного функционирования радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) особенно сложной.

Не менее важная проблема радиационной составляющей космической среды связана с поддержанием эксплуатационной надежности приборов и аппаратуры в условиях повышенного уровня радиационных воздействий различного типа в космическом пространстве. Потoki электронов, протонов и тяжелых заряженных частиц с энергиями от ~0,1 МэВ/нуклон до ~10 ГэВ/нуклон – одна из основных причин отказов электронных систем в космосе. Эти частицы вызывают деградацию полупроводниковых элементов, сбои в микросхемах и сокращение САС аппарата.

Существует несколько подходов к повышению радиационной стойкости: использование специализированных технологических процессов и материалов при изготовлении интегральных микросхем, конструктивная защита на основе алюминиевых сплавов, методы мажоритирования и другие инженерные решения [1, 2]. Однако даже при их применении остаточные радиационные воздействия остаются значительными. Поэтому для наиболее уязвимых элементов ракетно-космической аппаратуры требуется дополнительная система защиты.

Наиболее универсальным и эффективным способом предохранения от ЭМИ остается экранирование. Именно поэтому разработка новых материалов и технологий для высокоэффективных электромагнитных и радиационных экранов сегодня приобретает стратегическое значение. Временные, финансовые и материальные затраты на эти исследования несопоставимы с потерями, которые может повлечь эксплуатация «незащищенной» космической техники. Учеными НПЦ материаловедения за последние 20 лет

было опубликовано более 100 трудов, посвященных данной проблеме [3–11].

За успешное выполнение в 2010–2016 гг. цикла научно-исследовательских работ по защите микросхем космического и специального назначения от внешних дестабилизирующих факторов и успешное внедрение новых разработок в промышленное производство в 2017 г. ведущий научный сотрудник НПЦ материаловедения С.С. Грабчиков и сотрудники холдинга «Интеграл» В.А. Солодуха и С.В. Шведов были удостоены Государственной премии Беларуси в области науки и техники.

На заседании Высшего Государственного Совета Союзного государства 4 ноября 2021 г. было принято решение о присуждении учрежденной им премии в области науки и техники за 2021 г. в том числе и белорусским ученым – за разработку и создание высокоэффективных систем электромагнитной защиты, нового поколения датчиков потоков космического излучения для космических приборов с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Лауреатами стали С.С. Грабчиков, А.В. Труханов (НПЦ НАН Беларуси по материаловедению), Н.И. Мухуров (ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»), а также их российские коллеги Н.Л. Борождкова, О.И. Кораблев, В.А. Котцов из Института космических исследований (ИКИ) РАН.

Именно в этой области ведут активные работы исследовательские центры ведущих стран мира, стремясь получить широкополосные электромагнитные экраны нового поколения, сочетающие малый вес, высокую эффективность и устойчивость к агрессивным условиям космоса.

Воздействие потоков высокоэнергетических частиц

Отдельного внимания заслуживает проблема высокоскоростных потоков микрочастиц – своеобразных пылевых снарядов, движущихся с огромными скоростями в космическом пространстве. Как часть космической пыли они представляют собой важный, но долгое время остававшийся недооцененным фактор, способный вызывать повреждения конструкций, модулей и даже элементной базы (ЭКБ) бортовой электроники космических аппаратов.

В космосе кроме большого количества «космического мусора» и микрометеоритов находятся многочисленные «сгустки» (облака) микрочастиц космической пыли и других объектов микроуровня. Специалистам в области космического материаловедения и приборостроения уже более полувека известно, что в околоземном пространстве циркулирует огромное число микрометеоритов, обломков старых спутников и сгустков микрочастиц различного происхождения. Плотность космической пыли вблизи Земли составляет порядка 3×10^{-29} кг/м³, и, по оценкам, ежедневно на поверхность планеты оседает около 400 т таких частиц [12]. Более 5 тыс. запусков различных аппаратов с начала космической эры лишь усугубили ситуацию: орбиты все больше «засоряются» мельчайшими фрагментами техники и пылевыми облаками.

В отличие от видимых метеоритов, частицы космической пыли имеют микроскопические размеры – от нескольких микрон до сотен микрометров. Основная их масса приходится на диа-

пазон 1–100 мкм. По местоположению различают межгалактическую, межзвездную, околопланетную, кометную и астероидную пыль, а также пыль Пояса Койпера и облаков вокруг звезд. Все это делает задачу анализа воздействия таких микрочастиц на долговечные космические аппараты и станции крайне актуальной.

Долгое время результаты столкновения потоков пылевых частиц с металлическими конструкциями космических аппаратов рассматривались лишь как эрозионное повреждение внешней поверхности. Однако накопленные данные показали, что реальная картина гораздо сложнее.

Белорусские ученые впервые выдвинули научную гипотезу, согласно которой при ударе микрочастицы о корпус аппарата образуется плазма, способная индуцировать в электронных системах мощные импульсные токи [13–16], которые нарушают работу бортовой электроники и могут привести к ее полному выходу из строя. Здесь стоит напомнить, что научная гипотеза – это обоснованное предположение о механизме или закономерности явления, требующее экспериментальной проверки. Только при подтверждении независимыми исследованиями она может перерасти в научную теорию.

Отечественные ученые первыми разработали физико-математические модели [17–20], описывающие указанные процессы, и показали, что последствия таких микроскопических столкновений могут приводить не только к изменению структуры материалов, но и к генерации электромагнитных импульсов, способных нарушать работу чувствительной электроники [21, 22].

Эти исследования внесли весомый вклад в международную науку

о защите космических систем от микрометеоритного и плазменного воздействия. Значительно развил данную тему С.М. Ушеренко, который экспериментально доказал существование области взаимодействия микрочастиц с материалами, характеризующейся феноменом «сверхглубокого проникания» – известным сегодня как эффект Ушеренко [21–23]. Его суть в том, что микрочастицы, двигаясь с колоссальной скоростью, способны пробивать металл и другие материалы на несколько порядков глубже, чем это предсказывают классические модели взаимодействия макротел.

В научных трудах [14, 24] представлены результаты многолетней работы белорусских ученых, посвященной анализу новых материалов, включая многослойные структуры, применяемые для защиты от электромагнитного излучения. Особое внимание здесь уделено изучению физических механизмов отражения и поглощения излучения, а также экспериментальной оценке изменений механических и электрофизических свойств защитных материалов после воздействия высокоскоростных потоков микрочастиц.

Отдельное место в отечественной научной школе занимает цикл работ, касающихся физического моделирования в наземных условиях процессов взаимодействия «космических» микрочастиц с материалами корпусов летательных аппаратов и микросхем. Для этих целей в одном из институтов Академии наук БССР долгие годы функционировал уникальный подземный исследовательский комплекс – своего рода «лаборатория микрометеоритов». Здесь с помощью специально созданных взрывных ускорителей микрочастицы различ-

ных материалов разгонялись до космических скоростей и направлялись в мишени, имитирующие фрагменты корпусов спутников и корпусированных микросхем с установленными чипами.

Именно белорусские исследователи в ряде работ [2, 24–27] впервые экспериментально (с использованием фотографий и снимков растровой электронной микроскопии) показали характер реальных повреждений микросхем после таких ударов. Было установлено, что основными являются механические разрушения – разрывы и сколы в местах проволочных соединений, металлизированных шин питания и контактных площадок. Впервые зафиксированы и оригинальные дефекты: в зонах локального разогрева высокой интенсивности наблюдалось формирование новых кристаллических образований из полупроводникового материала разрушенного кристалла.

Долгое время зарубежным ученым не удавалось количественно определить энергию, необходимую для генерации электромагнитного поля и выброса струй плотной плазмы из материала при ударе, поскольку длительность процесса не превышает 10^{-3} секунды. В рамках классической механики такое выделение энергии объяснить невозможно. Их белорусские коллеги предложили оригинальную модель [18–20]. Ее суть в том, что воздействие электромагнитного поля начинается уже на первой стадии удара – в момент движения частиц внутри твердого тела. Возникает «классический» механизм трения, сопровождающийся потерей массы и образованием электрически заряженных частиц. Движение миллионов таких частиц инициирует появление локальных электромагнитных полей. Их пульсации

внутри так называемых солитонов высокого давления приводят к появлению эквивалентных пульсаций плотной плазмы в объеме материала, а сопровождающие ударно-волновые процессы вызывают перераспределение обобществленных электронов в металлах. Такое комплексное объяснение позволило впервые связать механические, тепловые и электромагнитные явления в единый физический процесс, что стало одним из ключевых достижений белорусской школы динамического материаловедения и физики высокоэнергетических воздействий.

Мировая проблема – белорусское решение

Невозможно не привести несколько фактов, хотя и не связанных напрямую с вопросами защиты от ЭМИ, но ярко подтверждающих инновационность и приоритет (ноу-хау) белорусских исследований в области сверхглубокого проникновения и высокоэнергетических воздействий.

За прошедшее с момента полета Юрия Гагарина время накопилось множество данных, касающихся надежности (отказов) космической техники, которые до сих пор не получили однозначной оценки учеными и специалистами в части механизмов и причин их возникновения. О некоторых из них общественность узнает лишь из редких сообщений СМИ.

Так, в 2019 г. в переходной камере российского модуля МКС была зафиксирована первая утечка воздуха, которая продолжалась до середины 2025 г. Космонавты неоднократно пытались устранить ее при помощи клеевых композиций и герметизирующих пленок. Официальной причиной назывались «микротрещины»

в металлической обшивке, предположительно вызванные эффектом усталости металла – хотя точный механизм их возникновения так и не был установлен.

В декабре 2022 г. произошла еще одна аварийная ситуация: российский корабль «Союз МС-22», пристыкованный к МКС для эвакуации российского экипажа, фактически вышел из строя из-за утечки гелия через внешнюю обшивку. По заявлению «Роскосмоса», повреждение произошло вследствие столкновения с частицей метеорного потока Геминиды. Однако вероятность попадания даже мельчайшего метеорита в конкретный участок станции с учетом колоссальных масштабов космоса близка к нулю. Через 2 месяца аналогичная проблема повторилась уже с грузовым кораблем «Прогресс МС-21». А в марте 2025 г. американские астронавты Барри Уилмор и Сунита Уильямс смогли вернуться на Землю лишь после 9-месячной задержки, вызванной утечкой гелия и отказом двигательной системы. При этом физическая причина этой поломки официально не была выявлена.

Не избежала инцидента и китайская космическая программа: в ноябре 2025 г. возвращение космического корабля «Шэньчжоу-20» с 3 тейконавтами с орбитальной станции «Тяньгун» было отложено после того, как, по словам специалистов, «в иллюминатор корабля влетел фрагмент космического мусора». Примечательно, что ни одна из установленных по периметру станции высокоскоростных видеокамер столкновения не зафиксировала.

Эти и подобные случаи вызывают закономерные вопросы: действительно ли речь идет о метеоритах или же мы имеем дело с иными микропроцессами – например, высокоскоростным

взаимодействием микрочастиц и образованием плазмы, о котором еще много лет назад писали белорусские исследователи?

Американские специалисты NASA также внимательно изучали указанные выше работы наших ученых. Убедившись в достоверности данных, они передали тему в ведение агентства перспективных исследований DARPA, которое затем, получив десятки миллионов долларов финансирования, развернуло исследовательскую программу NOM4D, направленную на создание «самовосстанавливающихся космических материалов». В рамках этой программы разрабатываются композиты нового поколения, способные к самосборке

и саморемонту в условиях космоса. Особое внимание уделяется материалам, которые могут самостоятельно восстанавливаться после повреждений, вызванных потоками высокоэнергетических частиц. Разрабатываются и жидкие вещества, которые затвердевают под действием локального нагрева, обеспечивая герметизацию микроповреждений в реальном времени. Первые эксперименты с ними запланированы в текущем году на борту Международной космической станции.

Европейское космическое агентство (ESA) финансирует аналогичный проект Cassandra (Composite Autonomous Sensing And Repair). Его ведут швейцарские компании CompPair и

CSEM совместно с бельгийской Com&Sens. Инженеры модифицируют углепластиковый композит так, чтобы он не только выдерживал нагрузки, но и мог сам диагностировать повреждения и запускать процесс ремонта.

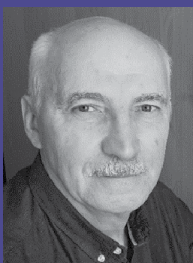
Таким образом, идеи, зародившиеся в белорусской научной школе еще десятилетия назад, нашли продолжение и развитие в крупнейших международных космических программах. Это наглядное подтверждение того, что отечественные исследования занимают достойное место в мировой науке – настолько, что формируют собственное направление, сочетающее физику, материаловедение и инженерную практику будущего. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. Космическая электроника. В 2 кн. Кн. 2. – М., 2015.
- Belous A., Saladukha V., Shvedov S. High Velocity Microparticles in Space: Influence Mechanisms and Mitigating Effects of Electromagnetic Irradiation. – Cham, Switzerland, Springer Nature Switzerland AG, 2019.
- Грабчиков С.С., Сосновская Л.Б., Шарапа Т.Е. Многослойный электромагнитный экран: пат. Респ. Беларусь №11843; заявл. 28.01.2009.
- Дмитренко В.В., Батищев А.Г., Грабчиков С.С. [и др.]. Многослойный электромагнитный экран для защиты фотоэлектронных умножителей и способ его нанесения: пат. РФ №2474890; заявл. 10.02.2013.
- Dmitrenko V.V., Besson D., Grabchikov S.S. [et al.]. Multilayer film shields for the protection of PMT from constant magnetic field // Review of Scientific Instruments. 2015. Vol. 86. P. 013903-1–013903-3.
- Дмитренко В.В., Грабчиков С.С., Ньют П.В. [и др.]. Перспективы использования многослойных пленочных экранов для защиты космической аппаратуры от постоянных магнитных полей // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2015. №5. С. 43–48.
- Grabchikov S.S., Trukhanov A.V., Kazakevich I.S. [et al.]. Effectiveness of the magnetostatic shielding by the cylindrical shells // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2016. V. 398. P. 49–53.
- Громыко Г.Ф., Грабчиков С.С., Ерофеев В.Т., Заяц Г.М. Эффективность экранирования постоянных магнитных полей цилиндрическим экраном с учетом нелинейных эффектов // Физические основы приборостроения. 2015. Т. 4, №4(17). С. 30–39.
- Zubar T., Grabchikov S., Kotelnikova A. [et al.]. Efficiency of Magnetostatic Protection Using Nanostructured Permalloy Shielding Coatings Depending on Their Microstructure // Nanomaterials. 2021. Vol. 11, 634.
- Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. Основы конструирования высокоскоростных электронных устройств: краткий курс «белой магии» / Под ред. А.И. Белоуса. – М., 2017.
- Белоус А.И., Ушеренко Ю.С. Защита от электромагнитных излучений: материалы, технологии, конструкции. – М.; Вологда, 2026.
- Plane J.M.C. Cosmic Dust in the Earth's Atmosphere // Chemical Society Reviews. 2012. Vol. 41(19). P. 6507–6518.
- Wozniakiewicz P.J., Burchell M.J. Space Dust and Debris Near the Earth // Astronomy & Geophysics. 2019. Vol. 60(3). P. 38–42.
- Belous A.I., Usherenko S.M., Romanov G.S. [et al.]. On Superdeep Penetration of a Multiparticle Flux and Damage of Electronic Elements Positioned behind an Obstacle // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2004. Vol. 77. P. 638–640.
- Овчинников В.И., Дорошкевич Е.А., Белоус А.И., Петлицкая Т.В., Реут О.П., Ушеренко С.М. Эффекты электромагнитного излучения, наблюдаемые в условиях нагружения высокоэнергетическим потоком порошковых частиц // Физика и техника высокоэнергетической обработки материалов. – Днепропетровск, 2007. С. 153–160.
- Ушеренко Ю.С., Алексенцева С.Е., Ушеренко С.М. Исследование надежности материалов внешних оболочек корпусов космических аппаратов при взаимодействии с пылевидными фракциями // Технология металлов. 2022. №5. С. 52–56. DOI: 10.31044/1684-2499-2022-0-5-52-56.
- Альтшулер Л.В., Андиленко С.К., Романов Г.С., Ушеренко С.М. О модели сверхглубокого проникновения // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15, №5. С. 55–57.
- Usherenko S.M., Koval O.I., Usherenko Yu.S. Estimation of the Energy Expended for Superdeep Penetration // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2004. Vol. 77, №3. P. 641–646.
- Соболев В.В., Ушеренко С.М. Образование плазмы в ударно-волновых процессах // Физика и техника высоких давлений. 2005. Т. 15, №2. С. 86–95.
- Owsik J., Jach K., Usherenko S. [et al.]. The Physics of Superdeep Penetration Phenomenon // Journal of Technical Physics. 2008. Vol. 49, №1. P. 3–25.
- Соболев В.В., Ушеренко С.М., Чой К.И. К вопросу о дестабилизации служебных параметров систем управления аппаратов при длительных полетах // Физика и техника высоких давлений. 2005. Т. 15, №3. С. 41–46.
- Emel'yanov V.A. [et al.]. New Problem of Risk: Process of the Accelerated Degradation of an Electronic Control System // WMSCI 2005 – The 9th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics. Proceedings.: July 10–13, 2005, Orlando, Florida, USA 2005. P. 485–488.
- Андиленко С.К., Романов Г.С., Ушеренко С.М., Шилин В.А. Некоторые эффекты сверхглубокого проникновения // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16, №22. С. 42–44.
- Belous A.I., Dybov O.A., Romanov G.S., Usherenko S.M., Shvedov S.V. On Superdeep Penetration of a Multiparticle Flux and Damage of Electronic Elements Positioned behind an Obstacle // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2004. Vol. 77(3). P. 638–640.
- Марукович Е.И., Ушеренко Ю.С., Ушеренко С.М. Динамическая модификация металлов. – Минск, 2021.
- Овчинников В.И. Технология получения многослойных материалов для защиты интегральных микросхем от высокоскоростных потоков микрочастиц: Дис. ... канд. техн. наук. – Минск, 2014.
- Белоус А.И., Овчинников В.И., Турцевич А.С. Особенности конструирования микроэлектронных устройств для космических аппаратов. – Гомель, 2014.



Сергей Грабчиков,
главный научный сотрудник
НПЦ НАН Беларуси по
материаловедению, доктор
физико-математических наук



Станислав Ластовский,
ведущий научный сотрудник
НПЦ НАН Беларуси по
материаловедению, кандидат
физико-математических наук



Анна Якушевич,
научный сотрудник
НПЦ НАН Беларуси
по материаловедению



Николай Василенков,
технический директор
АО «ТЕСПРИБОР»



Материалы радиационной защиты электронной компонентной базы космических аппаратов

Одна из актуальных задач, стоящих перед разработчиками ракетно-космической техники, — обеспечение показателей эксплуатационной надежности и сроков активной эксплуатации приборов и аппаратуры в условиях повышенного уровня ионизирующих излучений (ИИ), включающих электроны, протоны и тяжелые заряженные частицы (ТЗЧ), рентгеновское и гамма-излучения [1–4]. Как известно [3], для наступления необратимых изменений в полупроводниковых приборах поглощенные дозы радиации должны составлять или превышать $10^5 \div 10^6$ рад, в интегральных микросхемах (ИМС) — $10^4 \div 10^5$ рад. При этом некоторые ИМС категорий commercial и industrial могут характеризоваться уровнями 10^3 рад и ниже. Данные уровни радиационной стойкости электронной компонентной базы (ЭКБ) не обеспечивают требуемого временного ресурса космических аппаратов (КА) даже при работе в условиях ряда околоземных орбит, не говоря уже о полетах на другие планеты Солнечной системы.

В околоземном космическом пространстве (КП) существует три наиболее мощных радиационных поля, отличающихся по своей природе:

- **радиационные пояса Земли (РПЗ)**, состоящие в основном из электронов и протонов. Условно РПЗ делят на две части [4]: внутреннюю, расположенную ближе к Земле (от 1000 до 13 тыс. км), и внешнюю, дальнюю (от 13 тыс. до 65 тыс. км). Основная компонента частиц внутреннего РПЗ – высоко-энергетические протоны (до 1000 МэВ), внешнего – электроны с энергией в несколько МэВ;
- **солнечные космические лучи (СКЛ)**, в состав которых входят протоны и ТЗЧ. Потоки СКЛ сложно прогнозировать, что связано со случайным характером возникновения солнечных вспышек. Основная компонента СКЛ (до 95%) – протоны с энергией $1\div 10^4$ МэВ, для ТЗЧ – 10 МэВ/нуклон;
- **галактические космические лучи (ГКЛ)**, в состав которых входят протоны и ТЗЧ. В общем случае они не дают существенного вклада в величину суммарной поглощенной дозы из-за невысокой плотности потоков, однако имеют спектр энергий от 10^2 до 10^{15} МэВ. Воздействие ТЗЧ на ИМС повышенной степени интеграции приводит к сбоям и отказам за счет радиационных эффектов от отдельных ядерных частиц [1].

ИИ КП являются одним из основных дестабилизирующих факторов, определяющих сроки надежной работы ЭКБ ракетно-космических комплексов. В связи с этим ясна актуальность направления физического материаловедения, связанного с исследованием и разработкой новых материалов и технологий для защиты указанных объектов.

Методы повышения радиационной стойкости электронной компонентной базы

В настоящее время проблема повышения радиационной стойкости ЭКБ решается несколькими методами – технологическим, конструктивным, схемотехническим, а также путем моделирования радиационных эффектов на стадии проектирования. Одним из перспективных методов повышения радиационной стойкости является одна из разновидностей конструктивного метода – локальная радиационная защита (ЛРЗ). ЛРЗ представляет собой дополнительный экран, предназначенный для защиты только критичных узлов и элементов изделия, не влечет за собой серьезного увеличения массы или габаритов блоков КА. Данный подход позволяет снизить радиационные нагрузки на ЭКБ и имеет следующие преимущества: обеспечивает повышенную радиационную стойкость ЭКБ и электронной аппаратуры; позволяет использовать commercial и industrial классы, расширять номенклатуру и снижать затраты на комплектацию при производстве КА; обеспечивает снижение весовых параметров по сравнению со стандартными методами конструкционной защиты.

Эффект воздействия радиации на ЭКБ и аппаратуру КА определяется типом излучения, энергией, интенсивностью и проникающей способностью первичных и вторичных частиц в объеме вещества. Экраны ЛРЗ защищают от воздействия мягкой компоненты космического излучения – электронов и протонов, не способных глубоко проникать в вещество и определяющих дозовую составляющую радиационной нагрузки. По отношению к ИИ с более высокой проникающей способностью (рентгеновское излучение, гамма-излучение, мюоны, ТЗЧ и др.) технология ЛРЗ менее эффективна. Отметим,

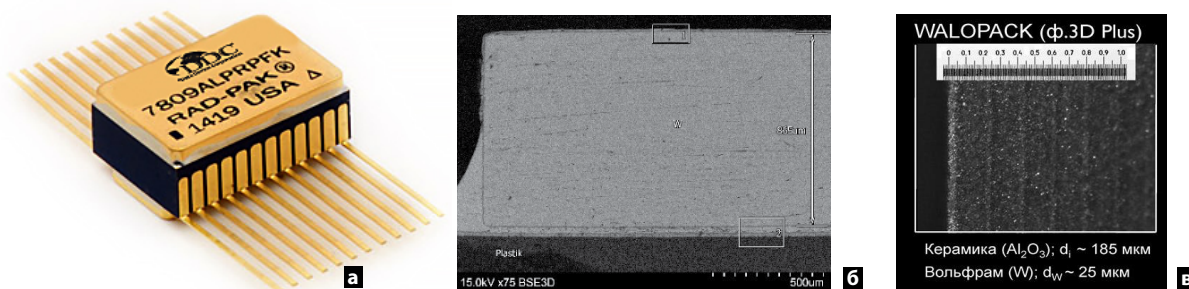


Рис. 1. Общий вид металлокерамического корпуса, изготовленного по технологии RAD-PAK (Maxwell Technologies, USA) (а), штифы крышек корпусов, изготовленных по технологиям RAD-PAK (б) и WALOPACK (в) (3D Plus, France, многослойная структура W/Al₂O₃)

что с помощью одного метода невозможно обеспечить достаточный уровень защиты оборудования КА от всего спектра космических воздействий.

Создание аппаратуры КА с заданным уровнем стойкости к локальным дозовым нагрузкам (ЛДН) при воздействии ИИ КП включает в себя решение следующих задач:

- *определение характеристик радиационной обстановки для заданной орбиты КА;*
- *анализ перечня комплектующих ЭКБ в составе аппаратуры КА и их чувствительности к интегральным дозовым эффектам;*
- *расчет ЛДН в объеме отдельных приборов;*
- *сравнение рассчитанных ЛДН с имеющимися данными об уровнях радиационной стойкости ЭКБ, расчет параметров ЛРЗ (толщина и состав материала) и применение их для дополнительной защиты критических узлов или элементов аппаратуры КА.*

За рубежом активные исследования и разработка изделий микроэлектроники с применением радиационной защиты начались в 90-х гг. прошлого века [5–7]. В патентной литературе содержится множество примеров использования с этой целью различных материалов на основе тяжелых элементов (W, Ta, W-Cu (англ. «High-Z material»)) [8–9]. Среди основных зарубежных разработчиков – производителей локальной защиты электронных компонентов и кристаллов ИМС на основе материалов специальных составов – RAD-PAK® (Maxwell Technologies, США) [10]; WALOPACK (3D Plus, Франция) [11]; RAD-COAT (Space Electronics, США) [12]; X-Ray (Actel Inc., США), (близко к RAD-PAK) [13]; ЛОЗА (локальная защита, РФ, близко к RAD-COAT) [14].

Согласно данным изготовителя [10], технология RAD-PAK обеспечивает уровень стойкости не ниже 100 крад по отношению к эффектам поглощенной дозы в условиях КП, или в 3–10 раз снижает уровень воздействия ИИ на ИМС. При этом важно, что

эффективность такой защиты существенно зависит от параметров орбиты, сроков эксплуатации и компоновки КА. Исследования защитных элементов корпуса – крышки (рис. 1б) и основания, изготовленных по технологии RAD-PAK, показали, что они представляют собой пластины толщиной 0,93 мм (Maxwell Technologies, USA). Элементный микроанализ, проведенный в работе [15], указал на содержание в их составе вольфрама (85% по массе) и меди, что согласуется с результатами измерения средней плотности объектов (16,4 г/см³). Исследования коэффициентов ослабления защитными элементами корпуса от электронного излучения с энергией 2÷4 МэВ, проведенные экспериментальным и расчетным путем, показали сильную зависимость коэффициента ослабления от энергии излучения. При энергии электрона до 1,5÷2,0 МэВ доза за экраном определяется тормозным излучением, при 4÷5 МэВ и выше – непосредственным прохождением электронов за защиту.

Покрытие корпусов типа WALOPACK [11] представляет собой структуру с чередующимися слоями с преимущественным содержанием керамики (Al₂O₃) и порошкообразного вольфрама (рис. 1в) с толщиной слоев порядка 185 мкм и 25 мкм соответственно. Средняя плотность материала составляет 4,42±0,03 г/см³. Покрытия предназначены для защиты от жесткого ионизирующего излучения и обеспечивают коэффициент ослабления по гамма-квантам – 1,5.

Технология нанесения покрытий RAD-COAT более универсальна [12–14], чем RAD-PAK и WALOPACK, она не привязана жестко к конструкции корпуса ИМС и формирует радиационную защиту в виде покрытий на основе эластичной матрицы с наполнителем из порошка вольфрама. Их нанесение проводят по технологии паст, мастик или красок. В России эти материалы получили условное название ЛОЗА (локальная защита). Некоторые



Рис. 2. Материнские платы компьютеров компании «Baе Systems» (а) и блок аппаратуры КА, содержащий радиационно-стойкую электронную память (технология RAD-PAK) (б), корпус ИМС компании «3D Plus» (технология WALOPACK) (в)

результаты работы [14]: при облучении покрытий ЛОЗА-А и ЛОЗА-В толщиной 1 г/см^2 электронами с энергией 2 МэВ и дозой до 240 Мрад уровень потоков прошедших электронов составил 7% (ЛОЗА-А) и 4% (ЛОЗА-В) по отношению к потоку падающих электронов. Для сравнения: через Al аналогичной толщины проходит 8%.

Некоторые примеры практической реализации технологии локальной радиационной защиты зарубежных производителей приведены на рис. 2. Особенно следует отметить, что подобные изделия и комплекующие категории срассе невозможно приобрести из-за санкций западных стран. При этом стоимость данных изделий составляла от 1 тыс. до 100 тыс. долл.

Результаты совместных белорусско-российских работ

В НПЦ НАН Беларуси по материаловедению в рамках ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2021–2025 гг. и НТП Союзного государства «Комплекс-СГ» на 2022–2026 гг. разработаны технологии получения материалов ЛРЗ на

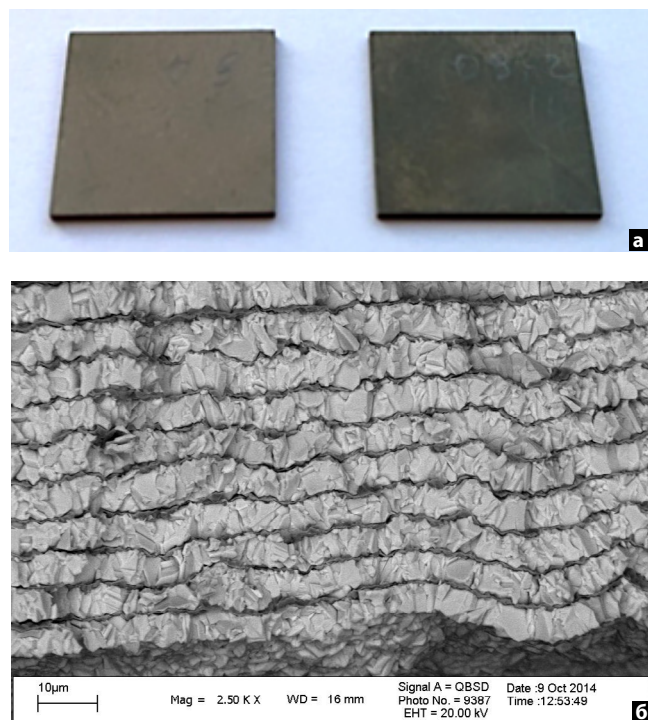


Рис. 3. Образцы композиционного материала W-Cu (20×20 мм), толщина $0,9 \div 1,5 \text{ мм}$ (а). Оптическое изображение шлифа многослойного экрана Bi/Al (б)

основе композиционных W-Cu и многослойных Bi/Al структур (рис. 3) [16, 17]. Изучены зависимости эффективности экранов на основе композитов W-Cu от толщины при воздействии потоков электронов с энергиями $1,6 \div 1,8 \text{ МэВ}$. Оценка проводилась по изменению порогового напряжения р-МОПТ (ΔU) в зависимости от флюенса электронного облучения (Φ) при облучении ИМС IN74AC04N на ускорителе электронов ЭЛУ-4. На рис. 4 приведены зависимости $\Delta U(\Phi)$ для экранов из композита W-Cu с плотностью $16,6 \text{ г/см}^3$ для различных толщин (d). Значения коэффициентов ослабления для образцов толщинами 0,6, 1,2 и 1,5 мм составили 96, 130 и 156 ед. соответственно. Сделан вывод, что оптимальными для данных уровней воздействия с позиции эффективности и массогабаритных параметров являются экраны W-Cu с толщиной $0,9 \div 1,5 \text{ мм}$, поскольку чрезмерное ее наращивание не дает существенного выигрыша в радиационно-защитных свойствах, что связано с вкладом от тормозного излучения.

В рамках федеральных программ РФ разработаны и изготовлены специализированные металло-керамические корпуса с интегрированными радиационно-защитными экранами: 100-выводной МК4247.100-2 (рис. 5а) и 144-выводной МК4248.144-2 (рис. 5б), а также для электронных многокристальных модулей («система в корпусе») с элементами ЛРЗ (рис. 5в). Проведен полный цикл их испытаний [18], в частности на стойкость к электронному облучению ИМС, собранных в корпусах серийного и специализированного исполнения. Объекты испы-

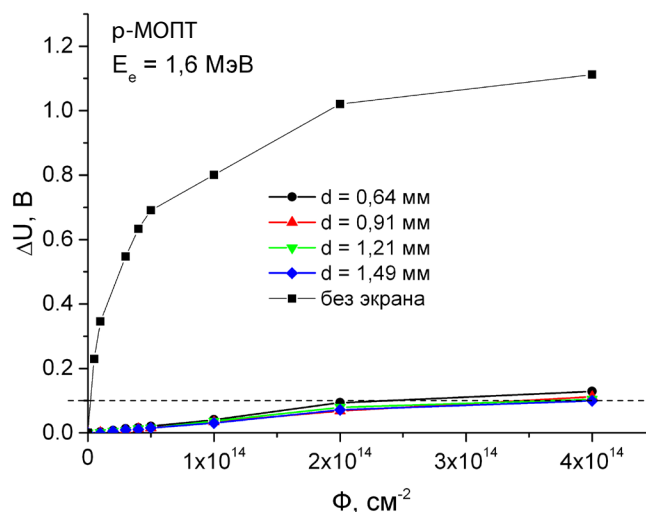


Рис. 4. Зависимости порогового напряжения р-МОПТ от флюенса электронов при облучении ИМС за экранами из композита W-Cu различной толщины и без них

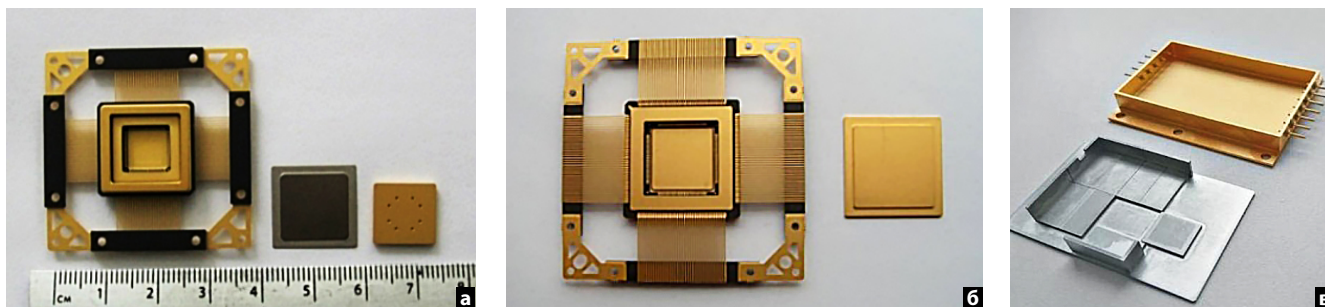


Рис. 5. Специализированные металлокерамические корпуса с интегрированными радиационно-защитными экранами: 100-выводной (а) и 144-выводной корпуса (б), корпус многокристального электронного модуля («система в корпусе») с ЛРЗ (в)

таний: ИМС типа ППЗУ 1632РТ1Т 256 К, размещенные в серийном металлокерамическом и специализированном корпусах. Показано, что в последнем стойкость ИМС к облучению электронами с энергией 1,6÷1,8 МэВ возрастает более чем в 100 раз до флюенсов $\Phi = (3\div6) \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (поглощенная доза для кремния $(1\div2) \times 10^4$ крад). Технология изготовления корпусов с элементами ЛРЗ для многокристалльных электронных модулей защищена патентом [19].

Методы математического моделирования

Современные установки для проведения испытаний ИМС и полупроводниковых приборов к воздействию радиационных факторов не моделируют реальный спектр ИИ КП, так как технически это труднореализуемая задача. Действующие методы по дозовым эффектам основаны на ГОСТ РВ 5962-004.10 и других нормативных документах, допускающих работы на установках со спектром излучения, отличающимся от реального. Дозовые эффекты ЭКБ зависят от спектра излучения, поэтому единственным решением для определения ЛДН являются методы численного моделирования. Наличие компьютерных программ дает возможность заменять дорогостоящие испытания ЭКБ на воздействие ИИ КП.

Существуют различные программные продукты для компьютерного моделирования ЛДН, основанные на прямом и обратном методах Монте-Карло, а также лучевом методе. Среди них можно отметить Geant4, NOVICE, SPENVIS, OMERE, Fastrad, FLUKA и др.

Программный комплекс (ПК) Geant4 позволяет выполнять расчеты ЛДН электронных компонентов за экранами заданной геометрии и изготовленных из любых материалов. Он представляет собой инстру-

ментарий для моделирования взаимодействия излучения с веществом методом Монте-Карло, реализованный на языке программирования C++ с использованием объектно-ориентированной технологии [20]. На рис. 6 представлены результаты расчета в ПК Geant4 зависимости коэффициентов ослабления ЛДН от массовой толщины ЛРЗ при воздействии на кристалл кремния электронов и протонов РПЗ и протонов СКЛ (массовая толщина $d_m = d \times \rho$; где d – толщина, и ρ – плотность материала). Расчетной моделью служил кристалл кремния в центре металлического корпуса из сплава НК29 с массовой толщиной стенок $d_m = 0,2 \text{ г/см}^2$. Экраны ЛРЗ из композита $W_{85}Cu_{15}$ ($\rho = 16,5 \text{ г/см}^3$) представляли собой дополнительные внешние оболочки к металлическому корпусу. Коэффициенты ослабления потоков электронов (K_e) и протонов (K_p) определялись как отношение поглощенной дозы кристаллом кремния в базовом металлическом корпусе к поглощенной дозе в корпусе с ЛРЗ. Расчеты проводились для следующих орбит:

- низкая круговая (НКО) на высоте $H = 370 \text{ км}$ с углом наклона $i = 97^\circ$;
- средняя круговая (СКО) на высоте $H = 4000 \text{ км}$ с углом наклона $i = 60^\circ$;
- высокоэллиптическая (ВЭО) с углом наклона $i = 63^\circ$ и углом перигея $\omega = 90$ на высоте в апогее $H_A = 40\,000 \text{ км}$ и высоте в перигее $H_{II} = 600 \text{ км}$.

Из результатов моделирования следует, что значения K_e на порядки (10–1000 раз) выше значений K_p на трех орбитах. Минимальные значения K_e фиксируются на НКО, а максимальные – преимущественно на СКО. Наибольший эффект применения ЛРЗ в отношении протонов РПЗ наблюдается на СКО и ВЭО, где K_p превышает 10 единиц при $d_m = 1,0 \text{ г/см}^2$. Существенного различия эффективности применения ЛРЗ при воздействии протонов СКЛ на рассматриваемых орбитах не наблюдается (рис. 6б).

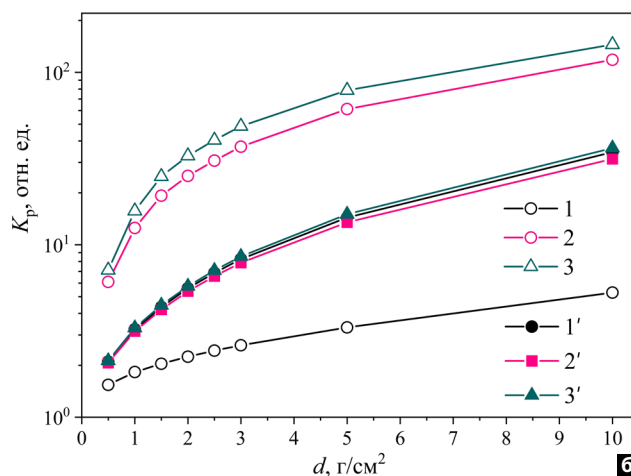
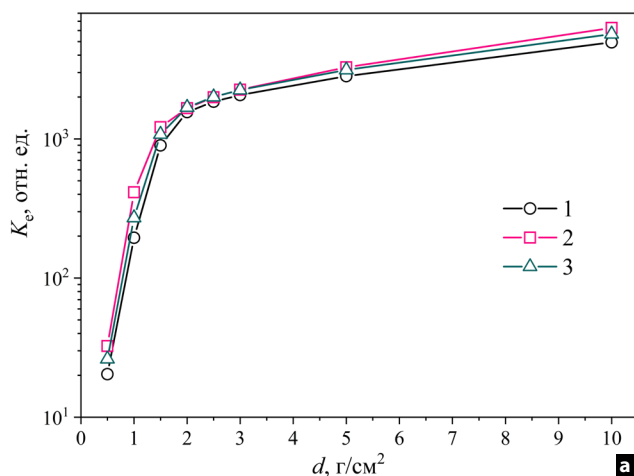


Рис. 6. Зависимости коэффициентов ослабления от массовой толщины экранов ЛРЗ: при воздействии потоков электронов ЕРПЗ (а) и потоков протонов ЕРПЗ и СКЛ (со штрихом) (б), где 1 – НКО; 2 – СКО; 3 – ВЭО

Расчет ЛРЗ для ЭКБ в корпусах многокристалльных электронных модулей

В последние годы в сборке электронных компонентов наблюдается тенденция повышения функциональности изделий за счет размещения в одном корпусе отдельных ИМС, в целом выполняющих функции законченной системы. В РФ данная технология получила название «система в корпусе» (СвК) [21], за рубежом – SIP (System in packing). Она обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционной сборкой ИМС в корпусе на печатной плате, таких как: совместное использование в одном устройстве ЭКБ, изготовленных по различным технологиям; высокая скорость разработки; возможность модернизировать систему без внесения серьезных изменений в конструкцию и технологию сборки; повышенная производительность и увеличение числа выходов годных по сравнению с методом «система на кристалле».

Применение технологии СвК в изделиях КА требует решения ряда дополнительных задач, среди которых одна из важнейших – обеспечение требуемых уровней радиационной стойкости и сроков активного существования. Изделия СвК иногда приходится комплектовать ЭКБ с низким порогом стойкости, поэтому наиболее оптимальным решением проблемы является применение экранов ЛРЗ [22].

В работе [22] с помощью ПК Geant4 рассчитывалась поглощенная доза D_0 электронов в каждой ИМС, расположенной в различных конструкциях корпусов для многокристалльных модулей: без экранов радиационной защиты (тип I), с экранами ЛРЗ на основе

композиата W-Cu (тип II, рис. 5в) и с экранами оптимизированной конструкции ЛРЗ (тип III). Конструкция оптимизировалась за счет опускания верхнего слоя композиата W-Cu на минимально допустимое расстояние к ИМС и выбора площади его поверхности, достаточной для минимизации эффекта «бокового подсвета». Показано (рис. 7), что на круговой орбите с углом наклона $i=30^\circ$ высотой $H=8000$ км увеличение d_m основания и крышки корпусов экранами ЛРЗ до значения $1,67 \text{ г/см}^2$ позволяет снизить дозовую нагрузку от электронов в 3,5–3,7 раза при минимуме и в 3,9–4,1 раза – при максимуме солнечной активности, а при оптимизации защиты (тип III) – в 6,8–9,3 раза и 7,6–10,7 раза соответственно.

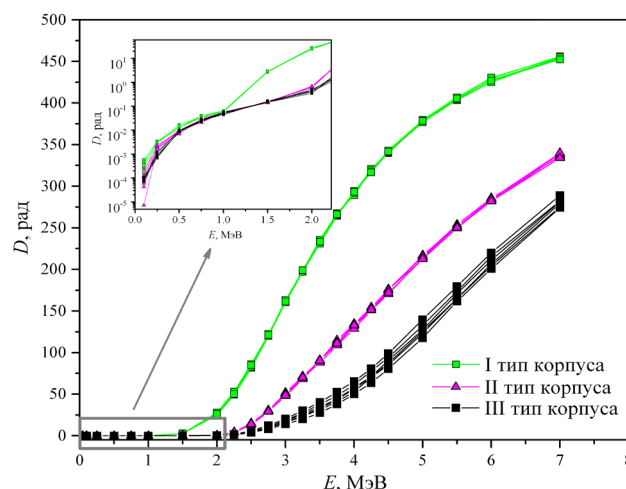
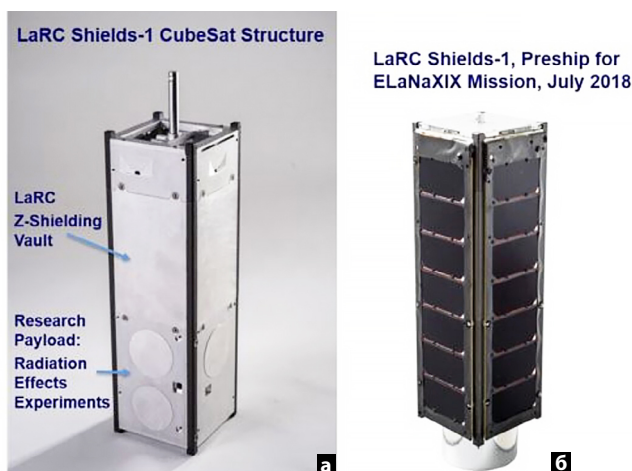


Рис. 7. Зависимости поглощенной дозы для ИМС, размещенных в корпусах многокристалльных электронных модулей трех типов, при облучении электронами флюенсом $\Phi=4,1 \times 10^6 \text{ см}^{-2}$



LaRC Shields-1, Preship for ELaNAX Mission, July 2018



Рис. 8. Общий вид МКА стандартов «CubeSat» Shields-1 миссии ELaNAX (a), «DiskSat» (Aerospace Corporation) (б) и конструкция радиационной защиты на основе пластин Z-материалов (в)

Малые космические аппараты, в том числе стандарта «CubeSat» и «DiskSat»

Бурно развивается новое направление космического приборостроения, связанное с малыми космическими аппаратами (МКА). Стоимость запуска в первую очередь зависит от их веса, поэтому классификация МКА обычно выглядит следующим образом: мини-спутники – от 100 до 600 кг, микроспутники – от 10 до 100 кг, наноспутники – от 1 до 10 кг, пикоспутники – от 100 г до 1 кг.

В последние 10–15 лет большой практический успех достигнут при использовании одного из вариантов МКА – наноспутников, так называемый стандарт «CubeSat» [23]. Он обусловлен унификацией и стандартизацией основных габаритных и весовых параметров комплектующих элементов. Наноспутники, как правило, выводятся на орбиту сразу по несколько (до 70) единиц либо посредством ракет-носителей, либо с борта пилотируемых космических кораблей и орбитальных станций. Стоимость выведения таких спутников не превышает нескольких десятков тысяч долларов, вследствие чего они нашли широкое применение в различных сферах жизнедеятельности человека: логистика и навигация наземного, воздушного и морского транспорта; Интернет и мобильная связь; спутниковое и цифровое ТВ; геологоразведка; точное земледелие; спасательные работы и т.д.

Подавляющее большинство МКА запускают США: от общего мирового объема 10 052 аппаратов за период с 2014 по 2023 г. доля США – 74% (7420 шт.,

из них 5652 шт. – «StarLink»). Участие остальных стран-операторов таково: 7% – Китай (719 шт.), 7% – Великобритания (679 шт.), 2% – Россия (159 шт.), 2% – Япония (135 шт.). Остальные 7% распределены между 67 странами [24].

Наноспутники системы CubeSat состоят из базовых стандартных блоков – унитов (U) и содержат от 1 до 8 единиц (рис. 8a). Размер одного такого блока составляет $10,0 \times 10,0 \times 11,3$ см³, вес – 0,118 кг (1U). Разновидность МКА в дискообразном стандарте «DiskSat» (рис. 8б), разработанная Aerospace Corporation, представляет собой композитную плоскую панель диаметром 1 м и толщиной 2,5 см с объемом 20 дм³, что эквивалентно 20U CubeSat при массе конструкции менее 3 кг.

В большинстве случаев наноспутники собирают из готовых, доступных материалов, комплектующих и электронных компонентов. Их стоимость варьируется в пределах от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч долларов. Несмотря на невысокую стоимость наноспутников, производители всегда стремятся к повышению сроков их эксплуатации. Отметим основные проблемы, возникающие при решении данных вопросов:

- применение ЭКБ классов *commercial* и *industrial*;
- низкий уровень конструкционной защиты МКА по сравнению с обычными КА (внешний корпус, стенки корпуса приборов и оборудования МКА обычно изготавливают из алюминия толщиной 2 мм и менее);
- сложная радиационная обстановка на рабочих орбитах МКА, расположенных на расстоянии 300–600 км от Земли (низкие околоземные орбиты (НОО)).

НОО позволяют использовать атмосферное торможение для утилизации МКА, в результате при запуске их в большом количестве не создается угрожающего объема космического мусора. Особую опасность для ЭКБ на этих орбитах представляют протоны СКЛ, спектр которых простирается далеко в область высоких энергий. Так, при значениях энергий 10, 100, 200 и 500 МэВ плотности потоков протонов достигают значений $1,5 \times 10^3$, $1,1 \times 10^3$, $2,5 \times 10^2$ и $1,6 \times 10^1$ см²с⁻¹ соответственно.

Все перечисленные моменты значительно усложняют решение проблемы повышения сроков эксплуатации МКА. Перспективный путь – повышение надежности используемой ЭКБ, в том числе за счет применения технологии ЛРЗ. Следует отметить, что последняя имеет еще одно важное практическое достоинство – возможность выравнивания уровней стойкости элементов ЭКБ с различной радиационной стойкостью, что в итоге способствует обеспечению функциональной и эксплуатационной надежности приборов и аппаратуры в условиях повышенной радиационной нагрузки.

Актуальность направления, связанного с применением радиационной защиты ЭКБ МКА, подтверждена последними результатами, полученными NASA в рамках миссии ELaNaXIX [25]. МКА Shields-1 был запущен в декабре 2018 г. и работал на полярной НОО. На МКА Shields-1 использовали радиационную защиту в виде пластин из материалов Z-типа Al-Ti-Ta (рис. 8в). Результаты, приведенные в работе [25], свидетельствуют о снижении общей ионизирующей дозы при применении защиты из пластин состава Al-Ti и Al-Ti-Ta, по сравнению со стандартными алюминиевыми конструкциями.

Космическое пространство характеризуется огромными по диапазонам энергий и широкими по своим видам спектрами ионизирующих излучений. Радиационные условия в разных его зонах и во времени различаются. Решить задачу защиты ЭКБ по всему энергетическому спектру и видам космических излучений очень сложно. Одним или несколькими материалами здесь не обойтись, поэтому необходимо иметь широкий их набор, равно как и технологий. Это задача на многие годы для разработчиков, технологов и материаловедов. Как известно, следующий этап освоения КП связан с изучением Луны, планет Солнечной системы и дальнего космоса. Перед создателями космических аппаратов встают цели, связанные со сложными условиями, длительностью полетов, необходимостью защиты человека и аппаратуры, что в свою очередь возвращает нас к вопросам радиационной защиты и безопасности.

Сотрудничество России и Беларуси должно играть более значительную роль, поскольку стоящие перед Союзным государством масштабные, долгосрочные задачи и цели по обеспечению логистики и навигации наземного, воздушного и морского транспорта, интернет- и мобильной связи, спутникового и цифрового телевидения требуют эффективных технологических и технических решений. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Чумаков А.И. Действие космической радиации на интегральные схемы / А.И. Чумаков. – М., 2004.
2. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов / под ред. Г.Г. Райкунова. – М., 2013.
3. Новиков Л.С. Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов / Л.С. Новиков. – М., 2010.
4. Модель космоса / под ред. М.И. Панасюка. Т. 1. – М., 2007.
5. Fan W.S. Shielding considerations for satellite microelectronics / W.S. Fan, C.R. Drumm, S.B. Boeske // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1996. Vol. 45, №6. P. 2790–2796.
6. Mangeret R. Effects of material and/or structure on shielding of electronic devices / R. Mangeret, T. Carriere, J. Beacour // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1996. Vol. 45, №6. P. 2665–2670.
7. The Radiation design Handbook. European Space Agency / European Space Research and Technology Centre. – Netherlands, 1993.
8. Patent USA №6720493 B1. Apr. 13. 2004.
9. Patent USA №7163752 B2. Jan. 16. 2007.
10. www.maxwell.com/microelectronics/products/technologies/radpak_overview.html.
11. www.3d-plus.com/radiation-assurance.php.
12. www.spaceelectronics.com.
13. www.actel-in.com.
14. Оптимальные составы для локальной защиты бортовой электроники от космической радиации / В.Т. Заболотный, Е.Е. Старостин, А.В. Кочетков // Физика и химия обработки материалов. 2008. №5. С. 15–18.
15. Уланова А.В. Особенности оценки радиационной стойкости микросхем в специализированных защитных корпусах / А.В. Уланова [и др.] // МЭС-2012: материалы конф., Москва, октябрь 2012 г. / ИППМ РАН. – М., 2012.
16. Грабчиков С.С., Цыбульская Л.С., Шендюков В.С. и др. Способ нанесения толсто-слоистого висмутитового покрытия на алюминий и его сплавы для создания радиационных экранов. Евразийский патент №201700228 от 31.10.2018. Дата выдачи заявки: 2019.02.28.
17. Василенков Н.А. В борьбе с радиацией / Н.А. Василенков, С.С. Грабчиков, А.Ю. Максимов, С.Б. Ластовский // Российский космос. Т. 113. 2015. №5. С. 38–41.
18. Якушевич А.С. Локальная радиационная защита электронной компонентной базы космических аппаратов / А.С. Якушевич, Ю.В. Богатырев, Н.А. Василенков, С.С. Грабчиков [и др.] // Электроника: наука, технология, бизнес. 2021. №1. С. 1–7.
19. Василенков Н.А., Грабчиков С.С., Ластовский С.Б. [и др.]. Корпус прибора с радиационной защитой электронных компонентов. Патент на полезную модель Республики Беларусь №u 20240201 от 28.03.2025. Заявка №20240201 от 05.09.2024.
20. geant4.web.cern.ch.
21. Мейлицев В. Система в корпусе. Краткий обзор технологий / В. Мейлицев // Электроника: наука, технология, бизнес. 2021. №2. С. 108–113.
22. Ослабление потоков электронов радиационных поясов Земли защитными экранами на основе композита W-Cu / А.С. Якушевич, Ю.В. Богатырев, С.С. Грабчиков [и др.] // Современная электроника. 2021. №2. С. 2–5.
23. Абламейко С.В. Малые космические аппараты / С.В. Абламейко, В.А. Саечников, А.А. Спиридонов. – Минск, 2012.
24. Филатов С.А., Долгих М.Н., Батырев Е.В., Филатова О.С., Гавриленко Н.А. Технологии и конструктивные решения увеличения ресурса малых космических аппаратов. Доклад на IX космическом конгрессе. г. Минск 21–23.11.2025 г. Минск. <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/structures-materials-and-mechanisms/#6.5>.
25. <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/structures-materials-and-mechanisms/#6.5>.



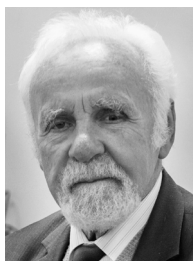
Светлана Данилова-Третьяк,
заместитель директора Института
тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова
НАН Беларуси, кандидат технических
наук, доцент



Василий Савчин,
заместитель директора ИТМО
им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,
кандидат технических наук, доцент



Владимир Чупрасов,
кандидат технических наук



Михаил Третьяк,
кандидат технических наук

Испытания тепловой защиты на Земле — гарантия безопасности в космосе

Исследование материалов для обеспечения тепловой защиты летательных аппаратов — одно из направлений работ по космической тематике, проводимых в Институте тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси. Вход спускаемого космического аппарата в атмосферу происходит со скоростью более 7 км/с и занимает весьма короткое время, за которое набегающие высокоэнергетические потоки при правильном подборе тепловой защиты не успевают разрушить его прежде, чем спуск завершится. В 1967 г. ученые института совместно со специалистами НПО «Энергия» исследовали теплозащитные материалы (ТЗМ) в однофазных плазменных потоках при атмосферном давлении и тепловых потоках до $1 \cdot 10^7$ Вт/м². Установлено, что разработки НПО «Энергия» в рассматриваемом диапазоне теплосиловых нагрузок сохраняли свою работоспособность. Их выбор осуществлялся в рамках договоров с основными производителями ракетно-космических систем, конструкторскими организациями и головными НИИ СССР.

В постсоветское время география участия белорусских специалистов по ТЗМ расширилась до Европейского космического агентства и организаций восточного вектора. НИР института по данному направлению включают:

- разработку и создание инструментов для получения потоков газа с параметрами, моделирующими натурные условия траектории спуска (полета) конкретного аппарата или головной части;
- экспериментальную и расчетную диагностику (газодинамическую, оптическую) получаемых плазменных потоков газа и диагностику их взаимодействия с твердым телом;
- разработку методик исследований и испытаний ТЗМ различных классов, оценку результатов и выдачу рекомендаций по их выбору.

Основной метод получения достоверных данных о работоспособности ТЗМ – экспериментальное исследование его разрушения в высокотемпературном газовом потоке с заданными параметрами. Ценность почерпнутой при этом информации возрастает по мере приближения условий эксперимента к натурным. Чтобы добиться этого в части состава рабочей среды, тепловых и газодинамических параметров, в ИТМО создан ряд стендов на базе электродуговых нагревателей газа (плазмотронов) [1, 2].

Главный элемент стенда «Луч-2» (рис. 1) – комбинированный электродуговой нагреватель газа линейной схемы (плазмотрон ЭДПГ-1,2) с газодинамической и магнитной стабилизацией дугового разряда. Стенд позволяет проводить испытания материалов для тепловой защиты летательных аппаратов,

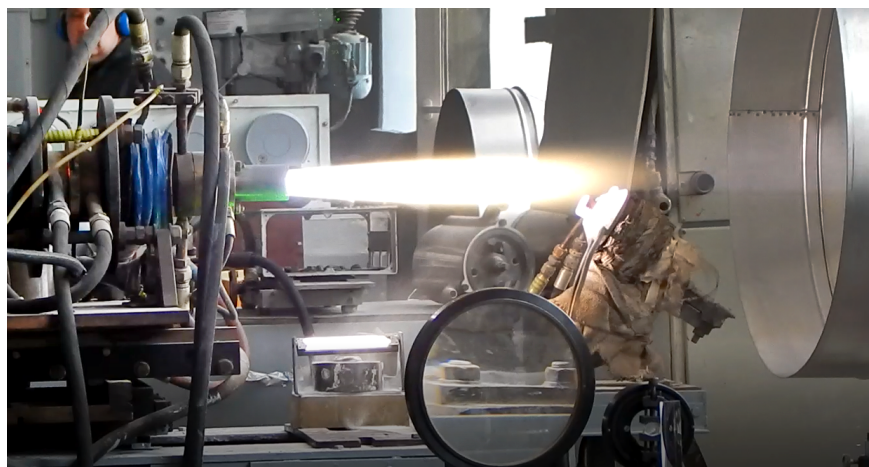


Рис. 1. Общий вид стенда «Луч-2»

движущихся с гиперзвуковой скоростью, при изменяющейся во времени тепловой нагрузке и в газопылевой среде.

Базовые параметры стенда: электрическая мощность – 1000–1500 кВт, расход рабочего газа (воздуха) – до 120 г/с, давление газа в разрядной камере – до $30 \cdot 10^5$ Н/м², энтальпия торможения – до 40 МДж/кг, что соответствует энергии гиперзвуковой холодной струи при скорости $M \sim 25$. Вид сверхзвуковой недорасширенной высокотемпературной струи, истекающей из

сопла плазмотрона, показан на рис. 2. Из-за разницы давлений между истекающим газом и окружающей средой в струе образуются скачки уплотнения (слои среды, в которых термодинамические параметры газа, такие как плотность и давление, меняются скачкообразно), то есть нарушается непрерывность физических свойств среды. В результате формируется ячеистая структура, так называемые «бочки». При одном из режимов максимальная температура плазмы на оси струи на расстоянии 15 мм от среза сопла

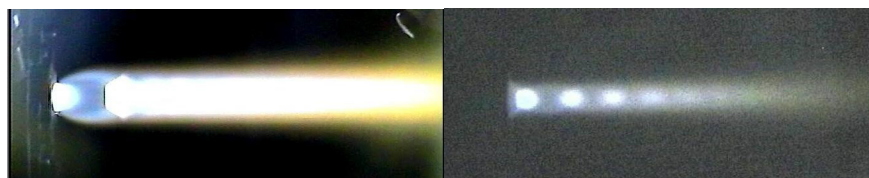


Рис. 2. Вид сверхзвуковой струи (плазмотрон ЭДПГ-1,2)

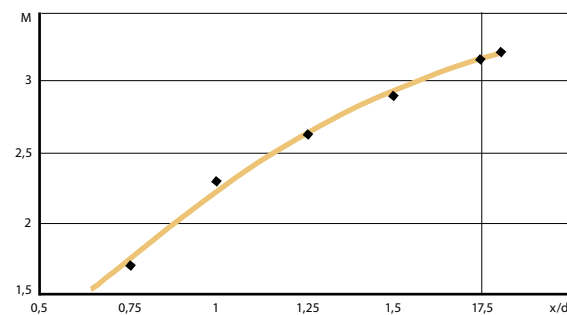


Рис. 3. Распределение числа Маха вдоль оси струи ($P_k = 10 \cdot 10^5$ Н/м²)

плазмотрона составляла ~ 7700 К, спадая на 500–1000 К по радиусу. Температура определяется по относительным интенсивностям спектральных линий меди и железа на расстоянии 5, 10 и 15 мм от среза сопла плазмотрона в спектральном диапазоне 400–900 нм. Температурные профили, полученные для разных моментов времени работы плазмотрона, могут отличаться почти на 1000 К и иметь различную скорость спада значения на периферии плазменной струи, что указывает на нестационарный характер ее истечения. Погрешность определения T не превышает $\pm 10\%$ [3].

Превышение скорости истечения плазмы из сопла над скоростью звука определяется числом Маха, которое рассчитывается из экспериментальных данных по давлению торможения на оси струи. Если оно больше 1, то поток называется сверхзвуковым. Распределение этой величины (зона первой «бочки») при давлении в электродуговой камере плазмотрона 10×10^5 Н/м² отражено на рис. 3. Следует учитывать, что в высокотемпературной зоне локальная скорость звука в воздухе – свыше 1 тыс. м/с. При давлении в камере $30 \cdot 10^5$ Н/м² число Маха перед диском Маха составляет 4,2.

Для определения тепловых потоков вдоль оси струи используются медные калориметры диаметром 6–8 мм, которые монтируются в образцы. Сигнал записывается цифровым регистратором с частотой 100 измерений в секунду по восьми каналам. Тепловой поток, действующий на образец, при давлении в разрядной камере $P_k = 10 \cdot 10^5$ Н/м² достигает $3,5 \cdot 10^7$ Вт/м², а при давлении $20 \cdot 10^5$ Н/м² – $4,4 \cdot 10^7$ Вт/м². Процесс абляции (унос вещества) ТЗМ фиксируется видеокамерой

и регистратором электрических сигналов от датчиков с записью на компьютере для дальнейшей обработки информации.

При создании многообразных транспортных космических систем особое значение имеют массовые характеристики тепловой защиты, так как площадь поверхностей, подверженных аэродинамическому нагреву, может достигать нескольких тысяч квадратных метров [4]. В этом смысле подходящими являются высокопористые волокнистые материалы, способные рассеивать тепловое излучение на оптических неоднородностях (порах, волокнах). Условия входа космического аппарата в атмосферу планеты (скорость нагрева, уровень температуры, давление газовой среды) оказывают влияние на эффективность тепловой защиты. Для воспроизведения данных условий и определения эффективного коэффициента теплопроводности таких материалов при высоких температурах (до 1800 К) сконструирован стенд (рис. 4) на базе установки радиационного нагрева «Уран-1»,

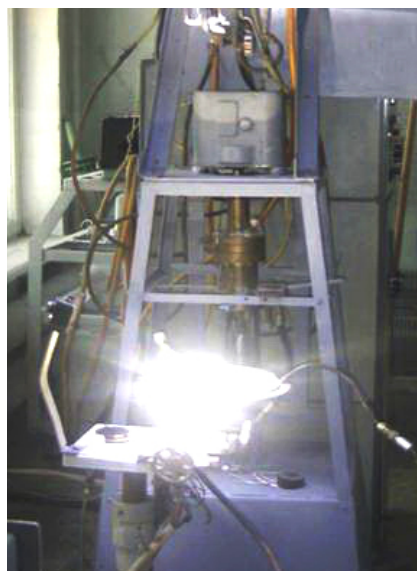


Рис. 4. Стенд радиационного нагрева

позволяющий получать сфокусированный пучок лучистой энергии плотностью до $0,6 \cdot 10^7$ Вт/м² в фокусном пятне диаметром 12 мм и нагревать исследуемый образец до 1500–2500 °С. В качестве источника излучения используется дуговая ксеноновая лампа высокого давления типа ДКСР 10000 (спектр излучения близок к солнечному). Потребляемая мощность источника ≈ 20 кВА. Методика определения эффективного коэффициента теплопроводности основана на решении двумерной обратной коэффициентной задачи теплопроводности с помощью термограмм, полученных в процессе эксперимента. На данном стенде проведены соответствующие исследования волокнистых материалов различной плотности на основе Al_2O_3 и SiO_2 , а также ячеистых из молибдена с высокой пористостью (работы выполнены совместно с Московским государственным техническим университетом имени Н.Э. Баумана (Россия) и Европейским космическим агентством в рамках международного проекта «ИНТАС») [5]. Представлена модель, описывающая эффективную теплопроводность волокнистых материалов с учетом радиационной составляющей, теплопроводности в газовой фазе, а также теплопереноса по волокнистому скелету [6], подтверждающая и значительно дополняющая данные, получаемые на экспериментальном стенде.

Для сравнительных испытаний ТЗМ или сопловых вкладышей при температурах 3000–4000 К, скоростях истечения рабочего тела $M \geq 1$ и высоких значениях давления торможения газового потока имеется экспериментальный стенд на базе коаксиального электродугового нагревателя газа. Его электрическая мощность составляет 500–750 кВт,

расход рабочего газа (воздуха) – до 0,12 кг/с, энтальпия газового потока 3,5–5,5 МДж/кг, давление в разрядной камере – до 60 атм при испытании образцов в виде втулок и до 25 атм – в виде цилиндров диаметром до 20 мм.

При создании энергетических устройств для космической техники в ряде случаев необходимо решать задачу внутренней тепловой защиты конструктивных элементов. Для экспериментальной отработки создан стенд на базе линейного плазмотрона с торцевым электродом, обеспечивающий тепловую нагрузку на исследуемый материал (внутренняя поверхность образцов в виде полых цилиндров) токонесущей плазмой дугового разряда. На этом стенде выполнен ряд исследований, связанных с неразрушающейся тепловой защитой (пористые стенки с транспирационным охлаждением), проведены испытания ряда аблирующих материалов применительно к тепловой защите конструктивных элементов экспериментальной установки «Ампула» [7].

С середины 1970-х гг. в связи с начатыми работами по советской космической программе «Энергия» – «Буран» встал вопрос о работоспособности (термостойкости) теплозащитных покрытий как на трубопроводах ракеты «Энергия», так и на многофазной транспортной космической системе (МТКС) «Буран» при воздействии на них двухфазных потоков (частицы Al_2O_3 +воздух, SiO_2 +воздух). Решение по использованию конкретных материалов было принято с учетом результатов, полученных в ИТМО. Работы по исследованию их термостойкости продолжались и после полета МТКС с целью устранения некоторых недостатков, выявленных после посадки «Бурана»,

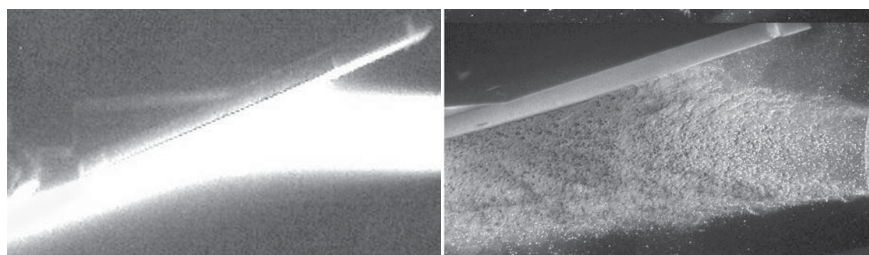


Рис. 5. Гетерогенный плазменный поток, набегающий на преграду, расположенную под углом

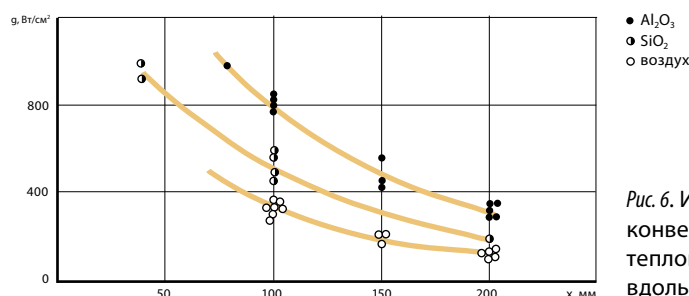


Рис. 6. Изменение конвективного теплового потока вдоль оси струи

в частности изучалась термостойкость специальных шпатлевок – как вновь созданных, так и после климатических испытаний от 5 до 25 лет.

Некоторое представление о проводимом в ИТМО подборе теплозащитных композиций для МТКС «Буран» дают методика и результаты испытаний двух композиций теплозащитных покрытий, относящихся к классу «легковесов». Материалы взяты из единственной статьи, разрешенной в те годы к опубликованию в открытой печати [8]. В указанной работе исследовалась работоспособность перспективных теплозащитных покрытий (ТЗП) ТТП-ФС на основе хлорсульфированного полиэтилена, формальдегидных микросфер, древесной муки, полипропиленового порошка и отвердителей и ТТП-БС(л) на базе бутадиен-стирольного карбоксилатного латекса, фенолформальдегидных микросфер, метилцеллюлозы и отвердителей.

Получить более полную информацию о работоспособности

того или иного ТЗП в заданных условиях представляется возможным, если наряду с высокотемпературными аэродинамическими испытаниями изучить кинетику термического разложения композиций. Экспериментальное исследование кинетики процесса проводилось на дериватографе при заданной скорости нагрева 20 °С/мин в самогенерируемой атмосфере (воздух и продукты разложения). Установлено, что термостойкость композиции ТТП-ФС невелика (180 °С), что обусловлено наличием в ней хлорсульфированного полиэтилена (известно, что увеличение содержания хлора в полиэтилене снижает его термостойкость). Термостойкость композиции ТТП-БС(л) характеризуется температурой 360 °С, при которой первый материал теряет уже 30% своей массы. Вместе с тем остаточная масса обеих композиций составила 3–4%.

Экспериментальное изучение работоспособности теплозащитных композиций ТТП-ФС и

ТТП-БС(л) проведено на 40 моделях при тепловых нагрузках $1 \cdot 10^7$ Вт/м², $0,5 \cdot 10^7$ и $0,3 \cdot 10^7$. Рабочая среда – воздух с 50%-м (по массе) содержанием полидисперсных частиц Al_2O_3 . Высокоэнергетические испытания легковесной тепловой защиты (облицовочных плиток) для «Бурана» и других ТЗМ проведены на специально созданном стенде на базе линейного плазмотрона ЭДПГ с газодинамической стабилизацией дугового разряда мощностью до 500 кВт. Стенд оборудован системой подачи дисперсной фазы (Al_2O_3 , SiO_2 и других частиц) в плазменный поток (рис. 5), что позволяет проводить исследования ТЗМ в гетерогенных потоках при тепловой нагрузке до $1 \cdot 10^7$ Вт/м² (рис. 6) и энтальпии торможения до 25 МДж/кг. При испытаниях ТЗМ в высокотемпературных двухфазных потоках с частицами Al_2O_3 и SiO_2 достигнута скорость частиц ~ 2400 м/с.

Для равномерного распределения дисперсной фазы в выходном сечении струи разработан распылительный насадок к плазмотрону, состоящий из водоохлаждаемого корпуса и системы подачи порошкообразного материала. На внутренней поверхности выполнена многозаходная правая и левая винтовая нарезка с образованием пирамидальных ромбовидных выступов, а между входной и выходной частями – кольцевая полость, соединенная с системой подачи порошка тремя каналами, размещенными в корпусе под углом 30–50° к оси насадка. В процессе работы электродугового подогревателя плазмообразующий газ поступает во входную полость и турбулируется, а порошкообразный материал диспергируется и равномерно распыляется по сече-

нию канала насадка в выходную часть транспортирующим газом. За счет дальнейшего перемешивания с турбулентным потоком в выходной части порошок нагревается и обеспечивается равномерное распределение его температуры и скорости в сечении высокотемпературной струи.

Испытания проводились с предварительным нагревом моделей до 300 °С и выдержкой при этой температуре в течение 1–1,5 мин, что соответствует натурным условиям эксплуатации ТЗМ. В таких условиях композиционные материалы начинают разлагаться с уносом газообразных продуктов за счет содержания эпоксидных и формальдегидных смол. Далее

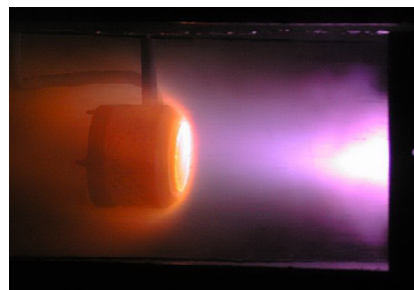
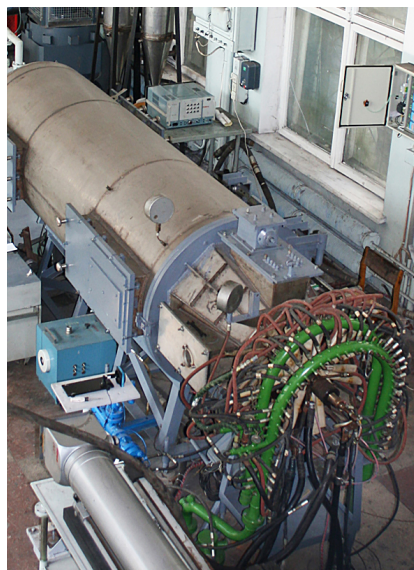


Рис. 7. Торцевой холловский ускоритель

рабочая поверхность подвергалась воздействию высокотемпературного двухфазного потока. Анализ данных по кинетике разложения и разрушению в двухфазных (газ – частицы) плазменных потоках композиций ТТП-ФС и ТТП-БС(л) показал, что скорость уноса массы материалов возрастает, если высокотемпературные испытания проводить с предварительным нагревом. При этом скорость уноса массы для ТТП-БС(л) увеличивается примерно на 45–50%, а для композиции ТТП-ФС – примерно на 35–40%, причем с возрастанием тепловой нагрузки от $0,3 \cdot 10^7$ до $1 \cdot 10^7$ Вт/м² эти показатели растут примерно на 80% и 90% соответственно. Визуальный осмотр изделий ТЗП показал, что при тепловых нагрузках до $0,5 \cdot 10^7$ Вт/м² наблюдается равномерный унос материала с поверхности, а при более высоких – неравномерный с разрушением моделей по толщине («прогар»). Анализ полученных данных позволил предположить, что для исследованных композиций при тепловых нагрузках ниже $0,3 \cdot 10^7$ Вт/м² и при пониженных давлениях будет наблюдаться расслоение, возможен послойный срыв материала за счет некомпенсированного внутриобъемного давления газообразных продуктов. Такой процесс разрушения теплового щита американского лунного аппарата «Орион» наблюдался в испытательном полете.

Участие в исследовании тепловой защиты легендарного «Бурана» принимали сотрудники ИТМО: заведующий лабораторией теплозащиты, кандидат технических наук Ф.Б. Юревич; заместитель заведующего лабораторией А.П. Искренков; старший научный сотрудник В.В. Чупрасов; заместитель

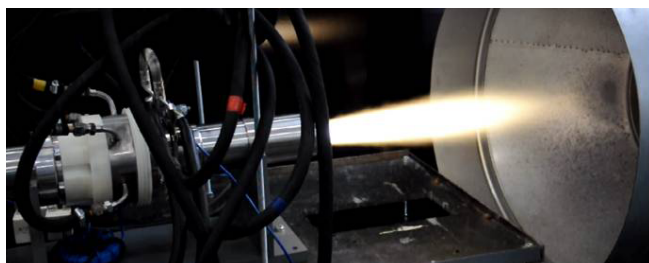


Рис. 8. Плазмотрон с газовыхревой стабилизацией дуги мощностью 600 кВт

заведующего отделом, кандидат технических наук М.С. Третьяк; ведущий инженер В.В. Мазак.

Многочисленные испытания, проведенные в институте, позволяли разработчикам ТЗМ и ТЗП делать правильный выбор для обеспечения безопасности космических спускаемых миссий и приносили экономический эффект.

Экспериментальные исследования в потоках плазмы осуществлялись как при атмосферном давлении на стенде «Луч-2», так и в вакууме на торцевом холловском ускорителе (рис. 7).

Для ОАО «РКК «Энергия» и ФГУП «НПО имени С.А. Лавочкина» проведены высокотемпературные испытания тепловой защиты пилотируемого аппарата нового поколения, предназначенного для высадки десанта на Луну в условиях лучисто-конвективного нагрева, имитирующих вход в атмосферу Земли со 2-й космической скоростью, а также тепловой защиты десантного модуля изделия «Экзо-Марс» в потоках плазмы торцевого холловского ускорителя и линейного плазмотрона. Изучены особенности разрушения и свойства ТЗМ для спускаемого аппарата «Фобос-Грунт» на заданных режимах работы ЭДПГ (стенд «Луч-2») при повышенном давлении в разрядной камере. В свое время проведены испытания материалов для аппаратов, спускаемых на Марс и Венеру.

Отечественные стенды до-полняют возможности российских установок ЦНИмаш, ЦАГИ им. Жуковского, ИПМ им. А.Ю. Ишлинского РАН и находятся на уровне разработок соответствующих центров Западной Европы (DLR, IRS – Германия; ASTRIUM-ST – Франция).

Что касается плазмотронов для получения высокотемпературных скоростных потоков различных газов, то такие установки были созданы не только для внутреннего использования, а поставлялись в ведущие организации оборонно-космического комплекса СССР и в зарубежные страны (рис. 8). Комплекс экспериментальных стендов, позволяющих моделировать натурные

условия работы ТЗМ, действует в ИТМО и в настоящее время, один из совсем немногих на постсоветском пространстве.

На данном оборудовании в широком диапазоне условий исследованы изменения тепловых и аэродинамических параметров различных классов аблирующих материалов – графитов, углерод-углеродных композиций, керамики, угле-, стекло-, органических полимеров и др. Результаты используются при прогнозировании и создании тепловой защиты гиперзвуковой техники. Многие миссии уже реализованы, но впереди – широкие горизонты для исследований космического пространства. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Третьяк М.С. К вопросу исследования теплозащитных покрытий для ракетно-космических изделий / М.С. Третьяк, В.В. Торопов, В.В. Чупрасов // Материалы Первого Белорусского космического конгресса. – Минск, 2003. С. 34–37.
2. Драгун В.Л. Исследование работоспособности и теплозащитных свойств покрытий для ракетно-космических изделий // Информатика. 2007. №3. С. 51–55.
3. Смягликов И.П. Спектроскопическая диагностика сверхзвуковой плазменной струи в потоке воздуха / И.П. Смягликов [и др.] // Труды VII симпозиума Беларуси и Сербии по физике и диагностике лабораторной и астрофизической плазмы. Минск, 22–26 сентября 2008 г. – Минск, 2008. С. 220–223.
4. Гофин М.Я. Жаростойкие и теплозащитные конструкции многоразовых космических аппаратов / М.Я. Гофин. – М., 2003.
5. Исследование эффективной теплопроводности перспективных материалов тепловой защиты / С.В. Резник [и др.] // Труды 3-й Междунар. конф. «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий». – Кацивели-Понизовка, 2004. С. 7–8.
6. Гринчук П.С. Процессы переноса энергии и вещества в гетерогенных средах со стохастической структурой: автореф. дис. на соиск. уч. ст. доктора физ.-мат. наук: 01.04.14 / П.С. Гринчук; Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси. – Минск, 2014.
7. Мазак В.В. Исследование аблирующих теплозащитных материалов применительно к экспериментальной энергоустановке «Ампула» // Труды КБЭМ. 1989. №17.
8. Третьяк М.С., Чупрасов В.В., Фрайман Ю.Е. Исследование работоспособности легковесных теплозащитных покрытий // Сб. науч. тр. «Тепло- и массоперенос-97». – Минск, 1997. С. 149–153.

Исследование стойкости защитных материалов к ударному воздействию высокоскоростных частиц



Современные авиационная, ракетно-космическая, военная и энергетическая отрасли предъявляют высокие требования к прочностным характеристикам конструкций, работающих в условиях ударных и взрывных нагрузок. В связи с этим высокоскоростное ударное воздействие частиц на мишени из различных материалов стало одним из направлений исследования стойкости защитных покрытий и конструкций при нагрузках указанного типа [1, 2]. Круг рассматриваемых задач достаточно широк, и, в частности, к нему относится как пробитие брони поражающими элементами, так и построение эффективной и легкой экранной защиты для космических аппаратов, подверженных атаке метеорно-техногенных тел.

В общем случае динамическое взаимодействие ударника с мишенью можно представить в виде класса задач, имеющих различные решения в зависимости от ряда условий: при малых начальных скоростях соударения работы, как правило, проводятся с помощью методов теории упругости; при умеренных – рассматривается режим пластического деформирования материала мишени и ударника; при высоких – учитывается сжимаемость идеальной среды; при сверхвысоких – необходимо дополнительно учитывать испарение, ионизацию и излучение.

Теме высокоскоростного удара для разных диапазонов скоростей посвящено большое количество работ, однако их значительная часть рассматривает взаимодействие на скоростях 5–8 км/с, при которых развивающиеся напряжения многократно превосхо-

дят пределы прочности материалов, и мишень деформируется в соответствии с законами гидродинамики с учетом сжимаемости и сил инерции. Область скоростей до 3 км/с, при которых прочностные характеристики имеют серьезное значение, менее освоена, поэтому получение данных о разрушении различных веществ при соударениях в диапазоне 0,5–3 км/с является экспериментальной задачей, результаты которой востребованы на практике.

Моделирование высокоскоростных столкновений и процессов образования кратеров с использованием современных вычислительных методов представляет собой эффективный способ углубить наше понимание этих сложных явлений. Формирование численных моделей позволяет изучать основные физические параметры в условиях, которые не всегда доступны для опытных работ. Воссоздание подобных алгоритмов

связано с построением или выбором адекватных математических моделей, особенно при широком диапазоне изменений давления, температуры и деформаций [3, 4]. Подбор констант в расчетах для моделей ударника и мишени позволяет добиться наилучшего совпадения с экспериментальными результатами.

Экспериментальное оборудование

Характерной особенностью подобных исследований является сложность разгона ударника до высоких скоростей и регистрации динамики протекающих процессов на малых временных интервалах, а также определение основных параметров воздействия на мишень.

Эксперименты по взаимодействию высокоскоростных ударников с дюралюминиевыми и стальными мишенями проводились

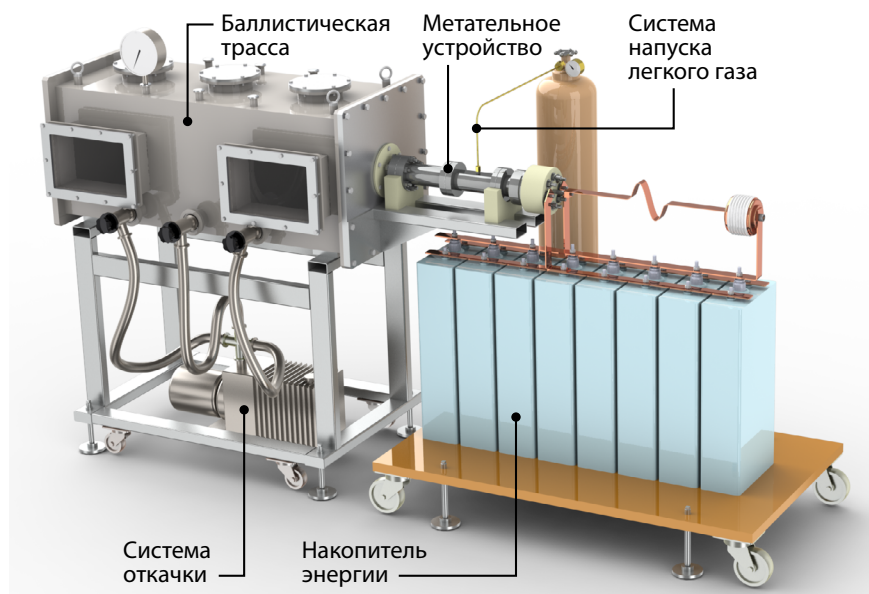


Рис. 1. Изображение экспериментального стенда с основными составляющими системами

на двухступенчатой легкогазовой магнитоплазменной баллистической установке МПК-7 (рис. 1) в Институте тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси [5, 6].

На МПК-7 в рамках реализованных контрактов выполнены следующие работы:

- **проведены испытания по определению стойкости теплозащитных покрытий** и конструкций десантного модуля проекта «ЭкзоМарс» к атаке твердых частиц;
- **исследованы особенности разрушения материалов** данных покрытий и образцов многослойной теплозащиты при пониженном давлении, нормальной температуре, значениях угла встречи 90° и 45° при скоростях стального ударника диаметром 2,5 мм, имитирующих действие метеорно-техногенных тел;
- **изучены защитные свойства** отобранных ранее образцов экранов противометеоритной защиты

(трех типов) при воздействии стальных одиночных ударников диаметром 2,5 мм со скоростью $\sim 3,0$ км/с при пониженном давлении, нормальной температуре, значениях угла встречи 90° ;

- **установлена стойкость трех типов теплозащитных покрытий** (в том числе многослойных), относящихся к аэродинамическому экрану и защитному кожуху десантного модуля проекта «ЭкзоМарс» в условиях воздействия стальных одиночных ударников диаме-

тром 2,5 мм, имеющих скорость $\approx 3,0$ км/с при углах встречи с мишенью 45° и 90° ;

- **испытаны на стойкость образцы** элементов экранной противометеоритной защиты, состоящих из дюралюминиевой подложки толщиной 1,8 мм и двухслойного композиционного покрытия $\text{NiCr}+\text{Al}+\text{Y}/\text{ZrO}_2$, модифицированного плазменным потоком (НТП Союзного государства «Мониторинг-СГ»).

Ключевой модуль баллистической установки – метательное устройство. Это двухступенчатая легкогазовая пушка [7], работающая следующим образом (рис. 2): электрическая энергия, необходимая для метания и запасенная в конденсаторной батарее, высвобождается в виде разряда в разрядную камеру, функционирующую по принципу эрозионного магнитоплазменного компрессора. Образующийся при этом плазменный поток высокой плотности и температуры толкает поршень вдоль канала легкогазовой секции высокого давления. Это приводит к адиабатическому сжатию и нагреву рабочего газа (водород или гелий) перед поршнем. При достижении определенного давления разрыва сжатый газ разрушает целостность диафрагмы и толкает ударник, постепенно ускоряя его в канале разгона.

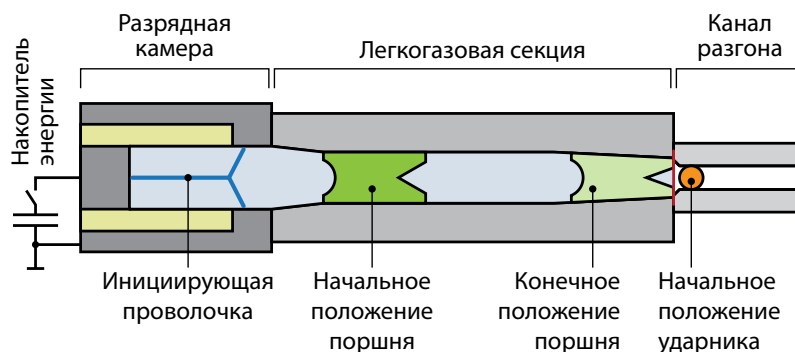


Рис. 2. Схема двухступенчатого метательного устройства

Изменять скорость вылета ударников в экспериментах можно несколькими способами: величиной первоначального напряжения заряда батареи конденсаторов, начальным давлением рабочего газа в легкогазовой секции, варьированием количества и материала диафрагм. Одиночные ударники сферической формы (диаметром 2,5, 4,0 и 5,0 мм) служат метаемыми частицами. Их скорость измеряется при помощи высокоскоростной камеры, способной выполнять съемку с частотой до 2 100 000 кадров/с. При увеличении диаметра частицы максимально достижимая скорость метания уменьшается.

Материалы и образцы

Из повседневных практических наблюдений понятно, что при фиксированной скорости ударника результат взаимодействия с металлической мишенью должен существенно зависеть от толщины образца. Для тонких действительно наблюдается пробитие мишени и появляется отверстие; для мишеней средней толщины этого не происходит, а в месте удара материал сильно деформируется и появляется выпуклость с обратной стороны; для толстых – видно углубление, по форме и признакам напоминающее классический кратер, при этом с обратной стороны искривление не визуализируется. Последний тип представляет собой приближение к так называемым «полубесконечным» массивным мишеням и наиболее прост для исследований как экспериментального, так и численного характера. Это связано с тем, что линейные размеры толстого образца намного больше диаметра ударника, и при расчетах можно пренебречь влиянием

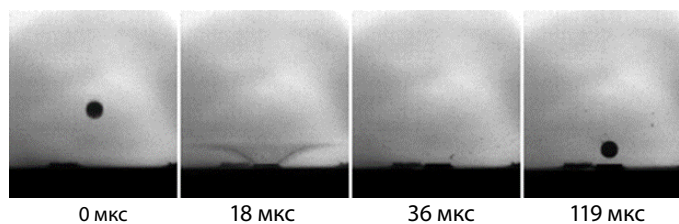


Рис. 3. Высокоскоростная съемка процесса соударения стального шарика диаметром 4 мм с мишенью из Д16Т на скорости 0,9 км/с

краевых эффектов на величину получающегося кратера.

В ходе экспериментов изучались мишени из широко применяемого авиационного конструкционного материала – алюминиевого сплава Д16Т. В качестве ударников использовались шарики, изготовленные из конструкционной подшипниковой стали ШХ15. Данная марка выбиралась так, чтобы, с одной стороны, твердость ударника превышала соответствующую величину у мишеней, с другой – еще большее увеличение твердости неоправданно, так как в этом случае образец становится более хрупким, что будет способствовать преждевременному раскалыванию шариков при ударе. Во всех случаях высокоскоростного взаимодействия рассматривался прямой удар под углом 90° в пределах погрешности установки мишени перпендикулярно оси канала разгона.

Результаты наблюдений и моделирования

Рассмотрим типично наблюдаемую картину внешнего проявления взаимодействия ударника диаметром 4,0 мм с мишенями из сплава Д16Т при последовательном увеличении скорости, полученную при помощи высокоскоростной видеосъемки (336 тыс. кадров/с, время экспозиции кадров – 0,16 мкс). На рис. 3 представлены кадры взаимодействия на скорости 0,9 км/с. Нуле-

вая отметка времени на первом снимке выбрана условно для оценки времени между показанными кадрами.

Видно, что при ударе происходит выброс частиц в расширяющемся конусе с углом разлета около 110° при вершине. Это свидетельствует о том, что глубина проникания примерно равна диаметру ударника, который отскакивает от мишени через 80 мкс после столкновения со скоростью около 75 м/с.

Картина соударения при 1,52 км/с меняется (рис. 4): из мишени происходит выброс вещества, который можно разделить на два этапа: эмиссия небольшого количества мелких частиц с углом разлета 90° сразу после столкновения; извержение плотного потока вещества мишени, состоящего из более крупных частиц с углом разлета около 40° через ~50 мкс. Примерно через 240 мкс после столкновения ударник вылетает из мишени в обратном направлении со скоростью 45 м/с. Уменьшение угла разлета частиц указывает на большую глубину кратера, которая в данном эксперименте превысила диаметр ударника в 2,5 раза. Увеличение глубины кратера также подтверждается уменьшением скорости отскока по сравнению с предыдущим случаем.

При еще большем увеличении скорости взаимодействия наблюдается дальнейший рост глубины кратера, о чем свидетельствует

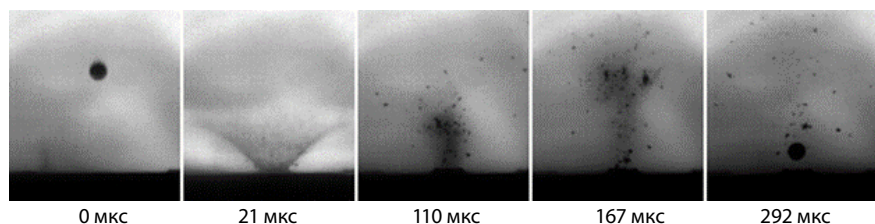


Рис. 4. Высокоскоростная съемка процесса соударения стального шарика диаметром 4 мм с мишенью из Д16Т на скорости 1,52 км/с

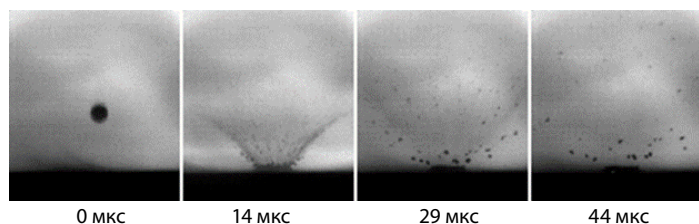


Рис. 5. Высокоскоростная съемка процесса соударения стального шарика диаметром 4 мм с мишенью из Д16Т на скорости 1,68 км/с

более узкий конус разлета частиц – около 75° . Это заметно на приведенной на рис. 5 последовательности кадров, полученных для скорости 1,68 км/с. Из последних кадров видно, что произошло заклинивание ударника в канале кратера. Дальнейшее увеличение скорости не приводит к заметному изменению регистрируемой картины соударения.

Застревание ударника в канале кратера может быть связано с изменением сферичности первого при деформации (рис. 6). При скоростях, превышающих 1,4 км/с,

на его поверхности наблюдаются трещины, однако при этом ударник сохраняет свою целостность и форму, близкую к сферической. При скоростях менее 1,7–1,8 км/с возникает кратер приблизительно цилиндрической формы с полусферическим дном. Для больших скоростей начинается растрескивание ударника, приводящее к его разрушению на отдельные части, что приводит к образованию сложной формы дна кратера.

Глубина кратера служит одним из характерных показателей степени разрушения «толстой»

(массивной) мишени. На рис. 7а представлены графики зависимостей глубины проникания металлической частицы в мишень из Д16Т от скорости взаимодействия для различных диаметров ударников, задействованных в экспериментах. При сравнении кратеров, полученных при примерно одинаковой скорости соударения, видно, что с увеличением диаметра ударника глубина кратера возрастает. Это связано с возрастанием энергии ударника за счет большей массы. Для ударников диаметром 2,5, 4,0 и 5,0 мм зависимость глубины от скорости в диапазоне 0,5–1,8 км/с имеет линейный характер.

Значения глубин для ударников разных размеров удобно сравнивать в приведенном виде, то есть в виде отношения глубины кратера к диаметру ударника (рис. 7б). Видно, что в этих переменных все результаты приблизительно следуют одной и той же экспериментальной зависимости. Таким образом, моделирование соударения достаточно проводить только для ударников одного размера.

При численном моделировании высокоскоростного удара важную роль играет корректное описание свойств материала

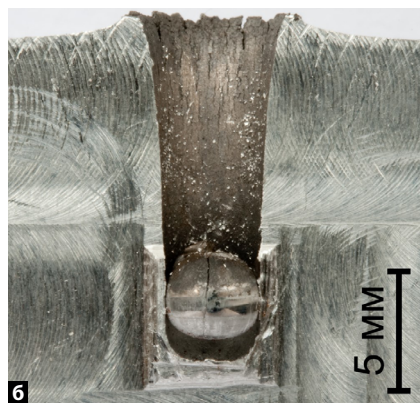


Рис. 6. Фотография среза кратера, образовавшегося после удара в мишенях из алюминиевого сплава Д16Т:

а – диаметр ударника 4 мм, скорость 1,44 км/с; б – 4 мм и 1,68 км/с; в – 2,5 мм и 1,98 км/с

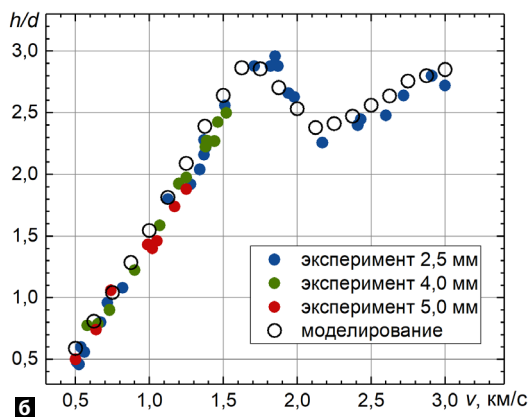
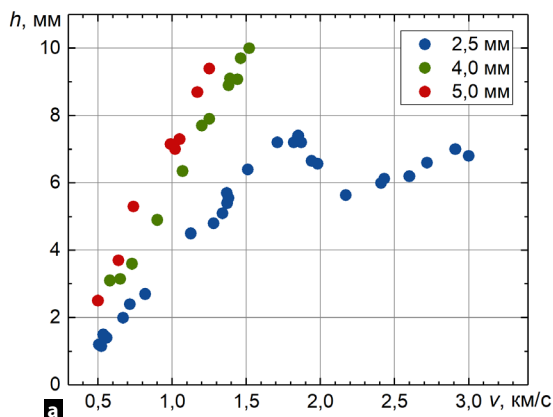


Рис. 7. Зависимость глубины кратера от скорости соударения для ударника диаметром 2,5, 4,0 и 5,0 мм: а – в мм; б – в приведенном виде

в широком диапазоне пластических деформаций, скоростей деформаций и температур. При импульсных нагружениях мишень имеет довольно сложный отклик на динамическое воздействие, в результате чего возникает необходимость задания параметров для моделирования таких явлений, как деформационное и скоростное упрочнение, температурное разупрочнение, разрушение и т.д. Все это разнообразие физических процессов, происходящих при динамическом нагружении, может быть описано схемой, которая в общем случае состоит из уравнения состояния и модели пластичности.

Для задания модели материалов мишени и ударника использовалось уравнение состояния в форме Ми – Грюнайзена, а для модели пластичности выбрано уравнение Джонсона – Кука [3, 4]. В работах по определению материальных констант, входящих в эти выражения, встречаются различные наборы параметров, значительно отличающиеся друг от друга. Поэтому в программе явного динамического анализа ANSYS Autodyn было проведено численное моделирование проникновения ударников диаметром 2,5 мм в мишени из алюминиевого сплава Д16Т с применением параметров моделей,

найденных в литературе [8–10], и определены константы, позволяющие получить наилучшее совпадение с опытными результатами (рис. 7б).

Таким образом, на примере одного наименования широко распространенного в технике конструкционного сплава Д16Т разработан и реализован способ исследования стойкости защитных материалов к ударному взаимодействию с высокоскоростными частицами.

Комбинирование экспериментов и численного моделирования – наиболее перспективный подход в изучении высокоскоростного удара, поскольку полученные величины можно в дальнейшем задействовать при описании поведения материалов мишеней без трудоемких и дорогостоящих испытаний. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Высокоскоростные ударные явления / под ред. Р. Кинслоу. – М., 1973.
2. Динамика удара / Дж. Зукас и др. – М., 1985.
3. Фомин В.М., Гулидов А.И., Сапожников Г.А. Высокоскоростное взаимодействие тел. – Новосибирск, 1999.
4. Орленко Л.П. Физика взрыва и удара / Л.П. Орленко. – М., 2008.
5. Khramtsov P.P. Physical Principles of Operation of a Two-Stage Light Gas Magnetoplasma Launcher for High-Vacuum Ballistic Tests / P.P. Khramtsov [et al.] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2015. Vol. 88, №5. P. 1118–1126.

6. Khramtsov P.P. Diagnostics of Density Fields in Hypersonic Flows around a Cone in a Light-Gas Gun by the Shadow Photometric Method / P.P. Khramtsov [et al.] // Technical Physics. 2019. Vol. 64, №10. P. 1424–1429.
7. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел / под ред. А.В. Герасимова. – Томск, 2007.
8. Ivetic G. Three-dimensional FEM analysis of laser shock peening of aluminum alloy 2024-T351 thin sheets // Surface Engineering. 2011. Vol. 27, №6. P. 445–453.
9. Daoud M. Effect of rake angle on Johnson-Cook material constants and their impact on cutting process parameters of Al2024-T3 alloy machining simulation / M. Daoud // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015. Vol. 81, №9. P. 1987–1997.
10. Winzer R., Glinicka A. The static and dynamic compressive behaviour of selected aluminium alloys / R. Winzer, A. Glinicka // Engineering transactions. 2011. Vol. 59, №2. С. 85–100.

Владимир Васецкий,
старший научный сотрудник
лаборатории физико-химической
гидродинамики Института
тепло- и массообмена
им. А.В. Лыкова НАН Беларуси

Владимир Грищенко,
научный сотрудник лаборатории
физико-химической гидродинамики
ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси

Михаил Дорошко,
научный сотрудник лаборатории
физико-химической гидродинамики
ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси

Анастасия Махнач,
научный сотрудник лаборатории
физико-химической гидродинамики
ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси

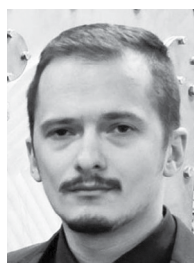
Олег Пенязьков,
доктор физико-математических наук,
академик, директор ИТМО
им. А.В. Лыкова НАН Беларуси



Тяговые элементы плазменных двигателей космического назначения *на основе миниатюрных магнитоплазменных компрессоров*



Валентин Асташинский,
заведующий отделением
физики плазмы
и плазменных технологий
Института тепло-
и массообмена
им. А.В. Лыкова
НАН Беларуси,
член-корреспондент



Георгий Дзагидзе,
научный сотрудник
лаборатории
физики плазменных
ускорителей Института
тепло- и массообмена
им. А.В. Лыкова
НАН Беларуси



Павел Шоронов,
научный сотрудник
лаборатории
физики плазменных
ускорителей Института
тепло- и массообмена
им. А.В. Лыкова
НАН Беларуси

Запуск первого искусственного спутника Земли 4 октября 1957 г. в СССР положил начало практическому освоению Вселенной. Для вывода космического аппарата (КА), например, на орбиту Земли используют мощные химические ракетные двигатели (жидкостные, твердотопливные и гибридные). Для ориентации и коррекции орбит уже находящихся в космосе КА применяют электрореактивные двигатели (ЭРД), к которым относятся и плазменные, на солнечных батареях в качестве источников энергии.

Первый в мире ЭРД входил в состав системы советской автоматической межпланетной станции «Зонд-2», запущенной 30.11.1964 г.

Электротермический импульсный абляционный двигатель поддерживал ориентацию станции в пространстве в течение 70 мин. В США в 1964 г. в суборбитальном полете (SERT-1) прошла первая демонстрация ионного двигателя, который успешно функционировал в течение запланированной 31 мин.

Наконец, 29 декабря 1971 г. был запущен метеоспутник «Метеор-10», на котором был установлен стационарный плазменный двигатель (СПД) в качестве корректирующего (создан А.И. Морозовым в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова АН СССР) на основе плазменного ускорителя с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения, кото-

рый проработал в космосе более 170 часов, подняв при этом орбиту «Метеора-10» на 15 км. Несмотря на многообразие других типов двигателей, СПД Морозова и его современные варианты до сих пор занимают лидирующее положение в мире среди электроразрядных систем, отправляемых в космос (рис. 1).

В аэрокосмической отрасли большое внимание уделяется вопросам, связанным с запуском и использованием малых космических аппаратов (МКА) массой от единиц до нескольких сотен килограммов. В связи с этим ученые различных стран активно ведут исследования, направленные на уменьшение габаритных размеров и массы ЭРД при одновременном улучшении их тяго-

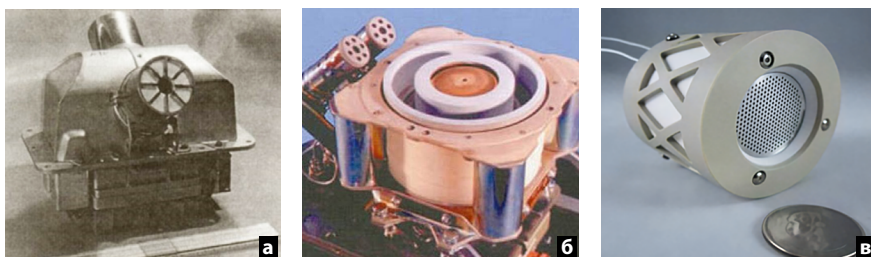


Рис. 1. Электрореактивные двигатели: а – импульсный абляционный плазменный двигатель; б – стационарный плазменный двигатель Морозова СПД-100; в – ионный двигатель

вых характеристик и надежности. Эта задача становится особенно актуальной, учитывая огромные расстояния при будущих межпланетных перелетах даже в пределах Солнечной системы. Следует отметить, что управление движением космического аппарата осуществляется несколькими независимыми плазменными двигателями. Поэтому особый интерес вызывает создание электроразрядных тяговых элементов с управляемым вектором тяги, которые позволили бы сократить число корректирующих двигателей МКА.

Однако существующие подходы по управлению вектором тяги основаны либо на совмещении нескольких независимых тяговых элементов в одной установке, либо на применении внешних магнитных или механических систем для отклонения от оси плазменной струи, истекающей из ЭРД, что приводит к существенному увеличению массогабаритных параметров космических аппаратов.

В лаборатории физики плазменных ускорителей Института тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси созданы не имеющие аналогов квазистационарные сильноточные плазменные ускорители, в том числе в малогабаритном и миниатюрном исполнении, в которых реализуется ионно-дрейфовое ускоре-

ние замагниченной плазмы. Они генерируют высокоэнергетические компрессионные плазменные потоки заданного состава (скорость потока – до 10^7 см/с, температура и концентрация заряженных частиц плазмы – до $5 \cdot 10^5$ К и 10^{17} – 10^{18} см $^{-3}$ соответственно при длительности существования ~ 100 мкс), которые по совокупности превышают параметры плазмы в других существующих плазмодинамических системах.

В рамках научно-технической программы Союзного государства «Разработка комплексных технологий создания материалов, устройств и ключевых элементов космических средств и перспективной продукции других отраслей» («Технология-СГ», 2016–2020 гг.) реализован миниатюрный торцевой эрозионный ускоритель (мини-ТЭУ), генерирующий компрессионный плазменный поток, обеспечивающий при сравнительно низком

уровне запасаемой в накопителе энергии (до 1,8 кДж) достаточно высокие динамические параметры плазмы (рис. 2).

Разрядное устройство мини-ТЭУ представляет собой корпус из диэлектрического материала, в котором особым образом расположены стержневые электроды. Центральный электрод (катод) диаметром 6 мм находится на оси этой аксиально симметричной системы. Внешний электрод (анод) включает набор из 4 стержневых диаметром 3,5 мм, симметрично расположенных по окружности диаметром 22 мм.

По результатам исследования тяговых характеристик установлено, что при вкладываемой в разряд мини-ТЭУ энергии от 0,2 до 1,8 кДж в случае использования меди в качестве плазмообразующего вещества торцевого ускорителя скорость истечения плазмы формируемого в вакууме компрессионного потока, как и импульс среднемассовой тяги, на протяжении разряда длительностью ~ 100 мкс составляет от 10 до 20 км/с; а определяемая компрессионным плазменным потоком сила тяги в это время – ~ 100 – 1000 Н. В указанных начальных условиях показана возможность отклонения плазменного потока от оси разрядного устройства на угол от 3 до 15° без использования внешних магнитных или

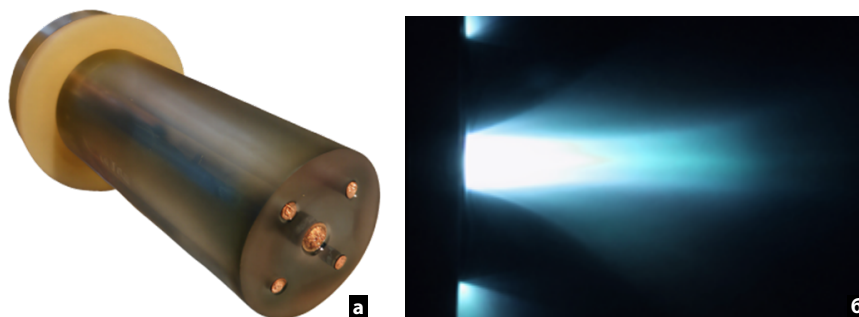


Рис. 2. Внешний вид разрядного устройства мини-ТЭУ (а) и компрессионного потока, формируемого в ходе его разряда (б)



Рис. 3. Отклонение вектора тяги от оси системы в мини-ТЭУ

механических систем, только за счет изменения начальных электрофизических параметров разряда (рис. 3).

Кроме миниатюрных эрозионных устройств разрабатываются и малогабаритные газоразрядные системы, к которым относится и миниатюрный магнитоплазменный компрессор (мини-МПК) (рис. 4).

Внешний электрод (анод) состоит из восьми стержней, симметрично расположенных по окружности диаметром 22 мм. Катод имеет форму усеченного конуса длиной 20 мм с диаметрами большего основания 12 мм и меньшего – 6 мм. В центре катода имеется отверстие диаметром 3 мм, играющее роль дивертора.

Изучение тяговых характеристик мини-МПК позволило установить, что при давлении воздуха в межэлектродном промежутке от 1 до 50 мм рт. ст. и вкладываемой в разряд мини-МПК энергии от 0,2 до 1,8 кДж скорость истечения плазмы компрессионного потока, как и импульс среднемассовой тяги, достигает значений от 10 до 50 км/с на протяжении разряда длительностью ~100 мкс.



Рис. 4. Внешний вид разрядного устройства мини-МПК (а) и компрессионного потока, формируемого в ходе его разряда (б)

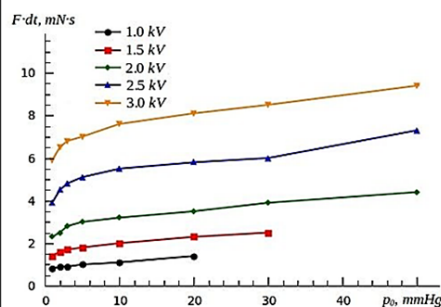


Рис. 5. Зависимость импульса тяги от давления остаточного газа для различных значений напряжения на накопителе энергии

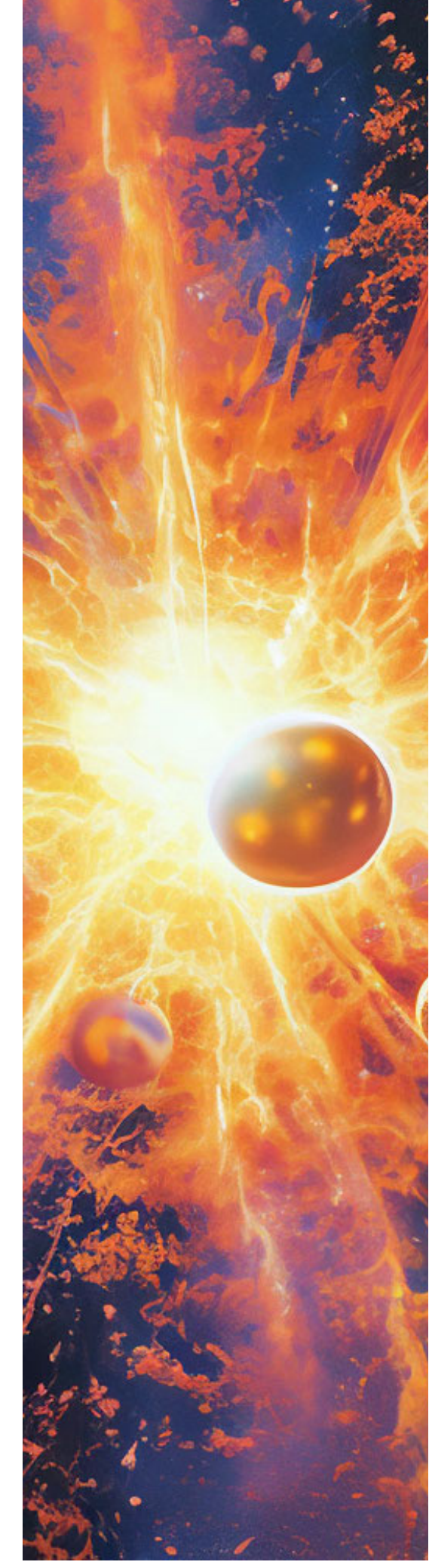


Рис. 6. Кинокадры компрессионного плазменного потока:
а – истекающий прямо компрессионный плазменный поток;
б и в – поток, отклоненный в разные стороны

Сила тяги в это время достигает ~10–100 Н. Следует отметить, что максимальные ее значения мини-МПК обеспечивает при давлении около 50 мм рт. ст., которое типично для высоты около 20 км над поверхностью Земли (рис. 5).

Таким образом, мини-МПК может быть использован и как тяговый элемент для электро ракетных двигателей высотных летательных аппаратов, работающих в верхних слоях атмосферы, например стратосферных дирижаблей. В этом случае полностью исчезает необходимость хранения и подачи в межэлектродный промежуток ускорителя плазмообразующего вещества, в качестве которого берется воздух окружающей аппарат атмосферы. По результатам предварительных исследований возможности управления вектором тяги мини-МПК с секционированным анодом установлено, что путем изменения только начальных электрофизических параметров разряда возможно формирование плазменного потока, отклоняющегося от оси разрядного устройства на угол до 15° (рис. 6).

Таким образом, мини-МПК и мини-ТЭУ открывают принципиально новые возможности для создания тяговых элементов плазменных двигательных установок с управляемым вектором тяги для малых космических аппаратов, а также стратосферных летательных аппаратов. При тяговых характеристиках, сравнимых с соответствующими значениями для уже существующих ЭРД, данные системы имеют более простую конструкцию разрядных устройств, а также обеспечивают управление вектором тяги ускорителя без дополнительных внешних магнитных или механических приспособлений. ■



Горячие материи холодного космоса:

Опыт изготовления и тестирования отечественных теплозащитных материалов

Один из барьеров на пути человека в космос связан с необходимостью преодоления большого нагрева поверхности возвращаемого на Землю корабля, движущегося с высокой скоростью в плотных слоях атмосферы. Значительная часть его кинетической энергии за счет торможения и адиабатического сжатия воздуха переходит в тепловую. Для спускаемого летательного аппарата (ЛА) массой около 3 т, как у классического «Союз ТМА-М», она составляет около 10^{10} Дж. При массе тепловой защиты в 15–20% от массы ЛА оценка для разогрева материала даже при его равномерном нагреве дает несколько тысяч градусов. Нужен технический барьер, охраняющий человека внутри от такого экстремального теплового потока. С этой проблемой столкнулись и при создании высокоскоростных самолетов, но для космических аппаратов она стояла особенно остро и все еще не может считаться окончательно решенной. В авиационной технике большой потенциал охлаждения поверхности, контактирующей с высокоскоростным воздушным потоком,

связан с возможностью прокачки топлива через соответствующие конструкции. При этом активное охлаждение требует сложных контуров подачи и отвода жидкости, что заметно увеличивает массу аппарата. У космических кораблей такого запаса топлива нет, особенно на стадии спуска, поэтому приходится работать преимущественно с пассивными системами охлаждения и с пассивной тепловой защитой, всевозможные варианты которой реализовывались на разных этапах развития техники. В большинстве случаев это подразумевает комбинацию физических механизмов, таких как низкая теплопроводность, абляция и т.д. Первыми проблему защиты от аэродинамических тепловых нагрузок при входе в атмосферу решили советские инженеры, которые на головной части ракеты Р5-М С.П. Королева применили абляционное покрытие на основе асботекстолита [1, 2]. Затем на протяжении многих лет с этой целью на баллистических ракетах и спускаемых космических аппаратах присутствовали аблирующие теплозащитные

покрытия с полимерной матрицей [3]. Так, например, еще в начале 1990-х гг. в НАСА был представлен и до настоящего времени применяется композиционный материал на основе пористого углерода и фенолформальдегидной смолы PICA (Phenolic Impregnated Carbon Ablators) [4].

Изменение концепции космических аппаратов в сторону их многоразового использования модифицировало и требования к теплозащитным материалам (ТЗМ). По сравнению со спускаемыми кораблями капсульных схем («Союз») траектория спуска многоразовых (Space Shuttle и «Буря») более плавная, но за счет аэродинамического торможения отдельные участки поверхности носового обтекателя и передней кромки крыла могут нагреваться до 1900 К. Для многократной эксплуатации (до 100 полетов) оболочки обтекателя и передних кромок крыла изготавливались из углерод-углеродных композиционных составов, а большая часть поверхности аппарата была покрыта плитками из спеченных волокон кварцевого стекла с максимальной рабочей температурой около 1500 К [5–8]. Их теплозащитный эффект связан с низкой теплопроводностью и высокой теплостойкостью. Тихой революцией в этой области был материал ТЗМК теплозащиты «Бурана», где советские ученые и инженеры добились не просто производства плиток из оксидных волокон микронного диаметра, но, в отличие от американского аналога, обеспечили сеть механических связей между данными волокнами (рис. 1). Это повышало механическую прочность и делало материалы устойчивее к многократным нагрузкам [7]. Отметим, что испы-

тания ТЗМК в свое время выполнялись и на плазматронных стендах Института тепло- и массообмена. Эксплуатация систем Space Shuttle показала, что на их эффективность критическим образом влияло обслуживание функционально неразрушаемой плиточной тепловой защиты, имеющей площадь около 1000 м² и требующей после каждого полета только на осмотр и восстановительный ремонт около 40 тыс. человеко-часов [7]. В конечном счете все еще относительно низкие механическая прочность плиток из спеченных волокон кварцевого стекла и температура эксплуатации стали причинами поиска и совершенствования альтернативных вариантов тепловой защиты для многоразовых космических систем нового поколения.

Важные требования к таким материалам – высокая температура плавления (сублимации), стойкость к тепловому удару и низкая плотность. Именно такое сочетание встречается редко и требует специальных подходов. Тугоплавкие металлы, потенциально пригодные для подобных задач, характеризуются очень высокой плотностью, превышающей такую даже у железа в полтора-два раза. Керамические материалы, которые работоспособны при тем-

пературах 2000 К и выше, в большинстве своем достаточно хрупки, плохо переносят вибрации, трудно поддаются механической обработке, а многие из них еще и не выдерживают теплового удара, когда скорость нагрева поверхности составляет несколько десятков градусов в секунду.

В последние годы проблема поиска новых ТЗМ получила новый импульс в связи с развитием гиперзвуковых ЛА и аппаратов типа SpaceLiner. При этом материалы должны быть устойчивы уже до 2000 К, выдерживать высокие знакопеременные силовые нагрузки, а также обладать химической и эрозионной стойкостью. На наш взгляд, принципиальная разница между двумя упомянутыми проблемами и соответствующими материалами состоит в том, что для спускаемых объектов характерное время воздействия экстремальных тепловых нагрузок составляет несколько минут, а для современных аппаратов, долгое время перемещающихся в плотных слоях атмосферы, оно выше на порядок и может достигать нескольких десятков минут. Эта разница обуславливает и новые требования. Так, например, традиционная основа для теплозащиты – углеродный материал –

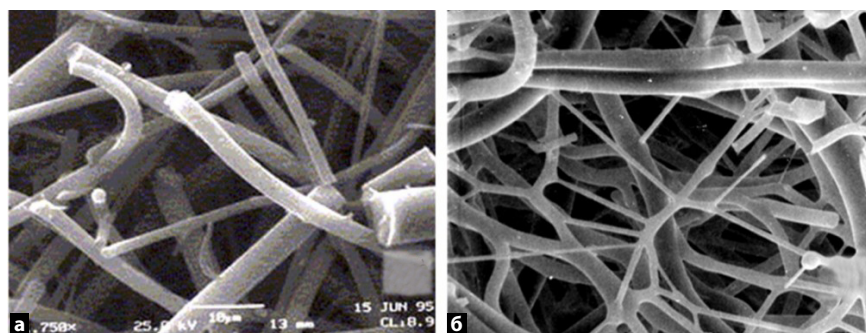


Рис. 1. Сравнение микроструктуры материалов легковесных керамических теплозащитных покрытий: а – Li-900 плотностью 144 кг/м³ (Space Shuttle, США), б – ТЗМК-10 плотностью 150 кг/м³ («Буря», СССР) [7, 8]

не способна длительное время выдерживать воздействие высоких температур в окислительной атмосфере [10].

Важно отметить существенную особенность эксплуатации материалов при экстремальных тепловых нагрузках, вызванных аэродинамическим нагревом в высокоскоростных потоках воздуха. Катализируемые поверхностью реакции рекомбинации могут увеличить локальные тепловые потоки в несколько раз в условиях входа космического аппарата в атмосферу Земли [11]. С этой точки зрения знание для конкретных материалов параметров процесса рекомбинации, катализируемой поверхностью в высокоэнтальпийных газовых потоках, является критически важным для создания современных теплозащитных материалов.

Основу для их нового поколения составляют карбиды, нитриды и бориды переходных металлов IV–V групп периодической системы. Эти соединения обладают наибольшей величиной температуры плавления и твердости, имеют достаточно широкую область гомогенности и в меньшей степени подвержены влиянию окислительных атмосфер. Отметим, что большинство жаропрочных материалов с температурой плавления выше 2700 °C характеризуется плотностью от 5 г/см³ (TiC, 4,94 г/см³, 3100 °C) и выше [12]. Только карбид кремния при плотности 3,2 г/см³ термодинамически стоек в твердом виде до 2820 °C. При этом наиболее тугоплавкие соединения, такие как карбид гафния HfC (12,76 г/см³, ~3900 °C), карбид тантала TaC (14,50 г/см³, ~3880 °C) и наиболее тугоплавкий из элементов – вольфрам W (19,25 г/см³, 3422 °C), проигрывают карбиду кремния в 4–6 раз с точки зрения плот-

ности и могут рассматриваться только как материалы для покрытий, которые в том числе снижают каталитическую активность теплозащитной поверхности.

По описанным выше причинам в последнее время в качестве перспективного материала для тепловой защиты рассматривается карбидокремниевая керамика [13–15]. Отметим, что уже в начале 1970-х гг. она использовалась в качестве ТЗМ для конструкций МГД-генератора [16]. Важно, что создавать и тестировать прототипы таких материалов впервые в отечественной практике начали в ИТМО [17], благодаря как существующей научно-технической школе, так и новым изысканиям, нацеленным на создание и обработку карбидокремниевой керамики различного функционального назначения.

Важный аспект применения карбида кремния в качестве ТЗМ – поиск механизмов и методов подавления его каталитической активности в высокоэнтальпийных газовых потоках. Так, было установлено, что при прогреве поверхности образцов из этого материала до 1700 К в потоке воздушной или азотной плазмы температура лицевой поверхности скачкообразно увеличивается до 2500 К [18]. Это объясняется потерей поверхностной защитной пленки из диоксида кремния, образующейся там изначально за счет окисления SiC при изготовлении образцов, и кратным увеличением теплового потока, обусловленного химическими реакциями [18].

Таким образом, краугольным камнем карбидокремниевых керамик является высокая каталитическая активность в высокоэнтальпийных воздушных потоках, а основным методом ее подавления – термобарьерные пленки,

в частности из диоксида кремния, на поверхности таких материалов. Судя по литературным источникам, большинство образцов карбидокремниевой керамики, тестируемых в качестве ТЗМ, получают методом самоспекания (self-sintered ceramics, self-bonded ceramics), когда происходит нагрев до температуры, близкой к температуре плавления самого карбида кремния. В этом случае в керамике отсутствует свободный кремний. Коллективом авторов данной работы была усовершенствована технология реакционного спекания для получения на основе порошковых материалов высококачественной карбидокремниевой керамики типа Si/SiC (reaction bonded – RB SiC) [19, 20], особенность которой – в использовании данного процесса с добавлением существенного количества кремния (10–20 об.%), плотно заполняющего пористое пространство карбидокремниевой матрицы. Технологическая схема получения состава позволяет при необходимости увеличить количество свободного кремния до 30–40%. Была сформулирована и экспериментально проверена идея эффективности применения разработки для наружного слоя композитной теплозащиты. В отличие от большинства трудов по данной тематике, акцент сделан не только на термостойкости материала, но и на частичном поглощении им теплового потока за счет фазовых переходов плавления и испарения соединения, заполняющего пористое пространство карбидокремниевой матрицы [21]. Материал также имеет более низкую каталитическую активность, связанную с образованием на его поверхности большого количества диоксида кремния за счет его плавления и окисления (в окислительной среде). Отметим, что в данном

случае тугоплавкая матрица SiC ($T_{пл}=2820\text{ }^{\circ}\text{C}$) обеспечивает механическую прочность и стабильность геометрии изделия, а плавление ($T_{пл}=1415\text{ }^{\circ}\text{C}$) и испарение ($T_{кип}=2350\text{ }^{\circ}\text{C}$) кремния отвечают за поглощение части тепловой энергии. Материал с похожим принципом действия известен – это псевдосплав вольфрам-медь [22], но его плотность выше в 5,5 раза.

Технология изготовления материала RB SiC, которым заполняются поры карбидокремниевой матрицы, позволяет путем повторной высокотемпературной обработки в вакууме удалить (испарить) свободный кремний из порового пространства и после этого пропитать образец другим, относительно легкоплавким составом. Возможно, что найдется тот, который за счет фазовых переходов плавления и испарения позволит поглотить наибольшее количество тепловой энергии. В качестве критериев отбора таких материалов можно рассматривать температуры плавления и испарения, а также их плотность. Для использования в составе теплозащитного композита темпе-

ратура плавления не должна быть слишком низкой ($T_{пл}\geq 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$). С другой стороны, температура кипения материала-заполнителя должна быть ниже температуры распада тугоплавкой карбидокремниевой матрицы $T_{кип} < 2820\text{ }^{\circ}\text{C}$. На основании описанных выше критериев было отобрано 5 подходящих заполнителей – кремний, хром, марганец, никель и медь. Ванадий, иттрий, кобальт, железо, бериллий, скандий были исключены по причине высокой температуры кипения. Алюминий, магний, серебро не подошли из-за низких температур плавления. Анализ показал, что кремний оптимален для заполнения пор. Его плавление и испарение при прочих равных условиях при 30%-ной пористости карбидокремниевой матрицы позволяют поглотить наибольшее количество тепловой энергии. При этом средняя плотность композита уменьшается на 8% при заполнении пор кремнием, в то время как для других вариантов она увеличивается на 35–50%. Испытания на плазме в условиях тепловой нагрузки до 7 МВт/м^2 показали хорошую стойкость образца к температу-

рам выше $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ и к скоростям нагрева порядка 70 К/с (рис. 2а). Скорость уноса материала заметно ниже, чем даже у псевдосплава вольфрам-медь, испытанного в аналогичных условиях. Микроструктурный анализ шлифов полностью подтвердил гипотезу о плавлении и испарении кремния из порового пространства и частичном поглощении тепла высокоэнтальпийного газового потока за счет фазовых переходов (рис. 2б).

Еще одним разработанным и испытанным объектом стал керамоматричный композит C/Si/SiC на основе силицированной многослойной углеродной ткани (рис. 2в), представляющий собой склейку из нескольких ее плотных слоев, изготовленную на основе ПАН-волокна. Было протестировано несколько вариантов. Лучший результат по механическим свойствам конечного продукта показало связующее на основе фенолформальдегидной смолы (бакелитовый лак ЛБС-1). Такой тип материала видится нам наиболее перспективным с точки зрения создания тонкостенных и легковесных теплозащитных конструкций, поскольку его плотность – всего $1,9\text{ г/см}^3$, а коэффициент теплопроводности ниже в 40–50 раз, чем у карбидокремниевой керамики, полученной на основе порошкового сырья.

Дальнейшим развитием темы ТЗМ стало создание образцов, полученных прессованием и спеканием измельченных углеродных волокон, силицированных предварительно в парах кремния (рис. 2г). Такой материал занимает промежуточное положение между полученным по порошковой технологии и на базе многослойной углеткани.

Существует немало вопросов, связанных как с разработкой крупноразмерных конструкций

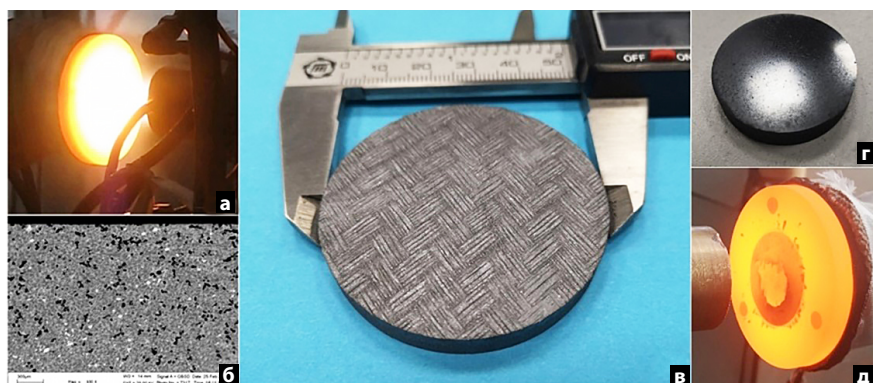


Рис. 2. Изготовленные образцы материалов на основе силицированной углеткани (в) и силицированных углеродных волокон (г), процесс их тестирования на плазмотронном стенде (а, д) и подтверждение удаления кремния из порового пространства карбидокремниевой керамики после тепловых испытаний (микрошлиф поперечного сечения образца, серые области – карбид кремния, черные – пустые поры, светло-серые – поры, заполненные кремнием) (б)

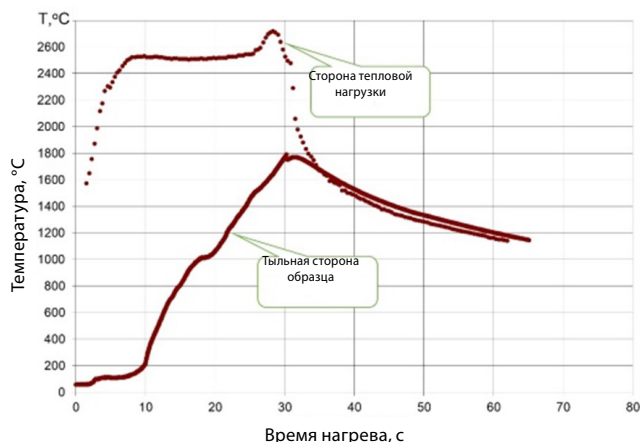


Рис. 3. Результаты измерения температуры на поверхности образца материала из силицированной углеткани при плазматронных испытаниях

из полученных материалов, так и с улучшением всего комплекса их свойств. Однако результаты все-таки дают надежду на развитие данной тематики в рамках деятельности отечественных исследовательских команд.

Авторы выражают благодарность кандидату технических наук В.В. Чупрасову и кандидату технических наук М.С. Третьяку, которые всю свою профессиональную карьеру в Институте тепло- и массообмена посвятили теплозащитным материалам, чей опыт и знания вдохновили на проведение данных исследований и благодаря чьим знаниям и стараниям получены описанные результаты. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Полежаев Ю.В., Юревич Ю.Б. Тепловая защита / Ю.В. Полежаев, Ю.Б. Юревич. — М., 1976.
- Reznik S.V. Development of Elements of Reusable Heat Shields from a Carbon-Ceramic Composite Material. 1. Theoretical Forecast / S.V. Reznik, P.V. Prosuntsov, K.V. Mikhailovskii // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2019. Vol. 92, №1. P. 89–94.
- Reznik S.V. Development of Elements of a Reusable Heat Shield from a Carbon-Ceramic Composite Material. 2. Thermal Tests of Specimens of the Material / S.V. Reznik [et al.] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2019. Vol. 92, №2. P. 306–313.
- Tran H. Phenolic Impregnated Carbon Ablators (PICA) for Discovery class missions / H. Tran [et al.] // 31st Thermophysics Conference. —New Orleans, 1996. P. 1911.
- Семенов Ю.П. Многооразовый орбитальный корабль «Буря» / Ю.П. Семенов; под ред. Г.Е. Лозинского. — М., 1995.
- Гоффин М.Я. Жаростойкие конструкции многооразовых аэрокосмических аппаратов / М.Я. Гоффин. — М., 2003.
- Тимошенко В.П. Тепловая защита многооразовых космических аппаратов: опыт и пути совершенствования / В.П. Тимошенко, С.В. Резник, П.В. Просунцов / 4-я Междунар. науч. конф. «Ракетно-космическая техника: фундаментальные и прикладные проблемы», Москва, 14–15 нояб. 2013 г. — М., 2013 г.
- Резник С.В. Актуальные проблемы проектирования, производства и испытания ракетно-космических композитных конструкций // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. №3(15). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-3-638.
- Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
- McKee D.W. Oxidation behavior and protection of carbon/carbon composites // Carbon. 1987. Vol. 25, №4. P. 551–557.
- Goulard R. On catalytic recombination rates in hypersonic stagnation heat transfer // Journal of Jet Propulsion. 1958. Vol. 28, №11. P. 737–745.
- Гаршин А.П., Кулик В.И., Нилов А.С. Основные направления повышения коррозионной жаростойкости огнеупорных волокнисто-армированных керамоматричных композитов // Новые огнеупоры. 2018. №12. С. 49–59.
- Pidan S. Recombination coefficients and spectral emissivity of silicon carbide-based thermal protection materials / S. Pidano [et al.] // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. 2005. Vol. 19, №4. P. 566–571.
- Biamino S. Multilayer SiC for thermal protection system of space vehicles: Manufacturing and testing under simulated re-entry conditions / S. Biamino [et al.] // Journal of the European Ceramic Society. 2008. Vol. 28, №14. P. 2791–2800.
- Sakraker I., Asma C.O. Experimental investigation of passive/active oxidation behavior of SiC based ceramic thermal protection materials exposed to high enthalpy plasma // Journal of the European Ceramic Society. 2013. Vol. 33, №2. P. 351–359.
- Кублицкас Ч.Б. Исследование карбида кремния в потоке инертного газа / Ч.Б. Кублицкас [и др.] // Теплофизика высоких температур. 1974. Т. 12, №4. С. 846–850.
- Grinchuk P.S., Tretyak M.S., Chuprasov V.V. Thermal protection material on the base of silicon-carbide ceramics // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Moscow, 2020. DOI 10.1088/1757-899X/709/4/044112.
- Жестков Б.Е. Влияние воздействия высокоскоростного потока азота на структуру и химический состав высокотемпературного покрытия на композиционном SiC-материале / Б.Е. Жестков [и др.] // Теплофизика высоких температур. 2018. Т. 56, №3. С. 395–398.
- Grinchuk P.S. Effect of technological parameters on densification of reaction bonded Si/SiC ceramics / P.S. Grinchuk [et al.] // Journal of the European Ceramic Society. 2018. Vol. 38, №15. P. 4815–4823.
- Grinchuk P.S. Advanced technology for fabrication of reaction-bonded SiC with controlled composition and properties / P.S. Grinchuk [et al.] // Journal of the European Ceramic Society. 2021. Vol. 41. Iss. 12. P. 5813–5824.
- Курячий А.П. Математическая модель системы тепловой защиты с испарением хладагента из капиллярно-пористого материала в полость // Теплофизика высоких температур. 1991. Т. 29, №3. С. 540–547.
- Coultas T.A. Analysis of self-cooling with infiltrated porous tungsten composites / T.A. Coultas [et al.] // Journal of Spacecraft and Rockets. 1964. Vol. 1, №6. P. 643–648.

Павел Гринчук,
заведующий отделением теплофизики
Института тепло- и массообмена
им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,
член-корреспондент

Михаил Кияшко,
старший научный сотрудник лаборатории
радиационно-конвективного теплообмена
ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,
кандидат физико-математических наук

Андрей Акулич,
старший научный сотрудник лаборатории
радиационно-конвективного теплообмена
ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси

Дмитрий Соловей,
старший научный сотрудник лаборатории
радиационно-конвективного теплообмена
ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,
кандидат технических наук

Михаил Стёпкин,
инженер-технолог лаборатории
радиационно-конвективного теплообмена
ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси

Валентина Щербакова,
младший научный сотрудник лаборатории
радиационно-конвективного теплообмена
ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси

Риск-ориентированная оценка экономической эффективности LLM в сервисном секторе Республики Беларусь

УДК 338.24:004.8



Екатерина Пискун,
доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, кандидат экономических наук;
espiskun@gmail.com



Егор Крячев,
магистрант кафедры проектирования информационно-компьютерных систем БГУИР;
ekrychev@gmail.com



Акбаржон Азизов,
магистрант кафедры проектирования информационно-компьютерных систем БГУИР;
azizovakbarjon618@gmail.com

Аннотация. Представлен анализ трансформации национального бизнеса под воздействием больших языковых моделей (LLM), являющихся внутренним катализатором интенсификации труда в сервисном секторе экономики Республики Беларусь. Основываясь на синтезе системного анализа и экономико-математического моделирования, адаптирована концепция производственной функции с постоянной эластичностью замещения для оценки потенциала вытеснения рутинных операций интеллектуальными агентами. Эмпирически подтверждена высокая детерминация между интеграцией LLM-решений и операционной продуктивностью. Установлено, что в условиях белорусского рынка внедрение больших языковых моделей позволяет минимизировать время при обработке клиентских данных с нескольких часов до полутора минут. Количественная оценка демонстрирует возможность замещения трудовых ресурсов, сопоставимую по масштабам с деятельностью сотен штатных специалистов. Сформулированы оригинальные модели расчета рисков от внедрения LLM, учитывающие не только прямые выгоды, но и вероятностные распределения ущерба от специфических киберрисков. Полученные выводы могут быть использованы топ-менеджментом при переходе к AI-ориентированным моделям управления в условиях лимитированного доступа к аппаратным мощностям и жестких требований национального регулятора.

Ключевые слова: генеративный интеллект, экономический эффект, производительность, Республика Беларусь, технологический суверенитет, эластичность замещения, риск-менеджмент.

Для цитирования: Пискун Е., Крячев Е., Азизов А. Риск-ориентированная оценка экономической эффективности LLM в сервисном секторе Республики Беларусь // Наука и инновации. 2026. №3. С. 36–44.

<https://doi.org/10.29235/1818-9857-2026-03-36-44>

Цифровизация мировой хозяйственной системы посредством внедрения больших языковых моделей позволила выйти за рамки сугубо технологических инноваций, превратившись в стабильный фактор повышения операционной эффективности бизнеса. Интенсивный переход к решениям на базе LLM, способных к автономному синтезу семантически связанного контента, характеризуется замещением рутинных когнитивных функций цифровыми решениями, что в свою очередь обеспечивает изменение себестоимости сервиса и приводит к трансформации взаимодействия с потребителями.

Динамика инвестиций в ИИ-ориентированную инфраструктуру подтверждает необратимый характер данных изменений. Согласно прогнозам американской исследовательской и консалтинговой компании IDC, к 2028 г. мировые расходы в данном сегменте могут превысить 631 млрд долл. [1]. При этом стратегический потенциал технологии оценивается экспертами Bloomberg Intelligence в масштабе 1,3 трлн долл. к 2032 г. [2]. С позиции экономики наибольший интерес представляют оценки McKinsey, фиксирующие ежегодный вклад генеративного ИИ в глобальный ВВП в диапазоне 2,6–4,4 трлн долл. [3]. Высокая скорость адаптации технологии бизнесом подтверждается тем, что к 2025 г. уже более 70% организаций интегрировали решения на базе искусственного интеллекта в свои ключевые бизнес-функции [4].

Цель работы состоит в систематизации и сравнительном анализе экономических результатов от внедрения больших языковых моделей на примере международного опыта и практики ведущих предприятий Республики Беларусь. В рамках статьи решаются задачи по выявлению ключевых метрик эффективности операционных процессов, оценке потенциала высвобождения рабочего времени персонала и анализу системных рисков, сопровождающих проникновение данных инноваций в национальное экономическое пространство.

Методика и инструментарий исследования

В основу данной работы заложен принцип количественно-качественного анализа, направленный на подтверждение гипотезы о влиянии внедрения LLM на экономическую эффективность компаний. При этом технология больших языковых моделей рассматривается не как изолированное ИТ-решение, а как экономический фактор, способствующий сдвигу границы производственных возможностей в организациях сервисного сектора. Под таковым понимается совокупность отраслей, нацеленных на удовлетворение потребностей юридических и физических лиц посредством предоставления интеллектуальных, финансовых и информационных услуг (банковский сектор, розничная торговля, телекоммуникации).

Методический аппарат работы включает следующие этапы:

- **анализ, базирующийся на сопоставлении международной практики (бенчмарков) и локальных кейсов Республики Беларусь.** В качестве эталонных значений используются данные о росте производительности труда, зафиксированные Национальным бюро экономических исследований (NBER), что позволяет оценить «теоретический потолок» эффективности для отечественных условий [5];
- **изучение выбранных объектов (ОАО «АСБ Беларусбанк» [6], СООО «МТС» [7] и др.),** обусловленное их высокой сервисной активностью. Методика анализа этих кейсов предполагает декомпозицию их бизнес-процессов на автоматизируемые и неавтоматизируемые составляющие с последующей оценкой уровня замещения человеческого труда;
- **экономико-статистическая экстраполяция,** основанная на оценке через систему метрик потенциального вклада внедрения LLM в организации Республики Беларусь, позволяющая спрогнозировать эффективность всей отрасли:
 - коэффициент автоматизации: доля запросов, обработанных без участия человека;
 - эффект высвобождения времени: сокращение длительности операционного цикла;
 - эквивалент полной занятости: расчетный объем человеческих ресурсов, замещаемый внедрением одной единицы LLM-решения;
- **сценарное моделирование рисков, где каждый дестабилизирующий фактор** (правовой, технологический, кадровый и т.д.) ранжирован по степени влияния развитие отрасли.

Принцип работы и анализ международного опыта внедрения LLM в деятельность организаций

Типовой цикл работы LLM-ассистента в компании представлен на *рис. 1*.

Первичная стадия «*Send Query*» связана с получением входящего обращения. В классической схеме это момент активации дорогих переменных издержек вследствие дороговизны рабочего времени персонала, так как любая информация требует ручной классификации и анализа.

Этап «*RAG System searches a database*» исключает необходимость самостоятельного изучения инструкций сотрудником. Технология автоматического поиска мгновенно извлекает нужные сведения из архивов, что приводит к замещению трудоемких операций капиталоемкими, а также снижается риск использования неактуальной информации (минимизация убытков от асимметрии данных) и кардинально сокращается период поиска, преобразуя «время ожидания» во «время полезного действия».

На этапе обработки «*LLM Brain icon processes data*» нейросеть синтезирует итоговое решение. Здесь происходит ключевое экономическое замещение: сложная умственная деятельность человека подменяется машинными вычислениями. При этом затраты на подготовку каждого последующего документа становятся ничтожно малыми.

Контрольный этап «*Human-in-the-Loop shield icon checks quality*» предусмотрен для наиболее ответственных направлений. Здесь специалист или защитные алгоритмы проводят верификацию

результата, что позволяет избежать имиджевых потерь и ошибок.

Финальная стадия «*Final output document delivered to user*» завершает процесс предоставления готового документа адресату. Автоматическая фиксация результата в базе данных ускоряет сервис, что напрямую влияет на удовлетворенность потребителя.

В настоящее время LLM-системы внедряются практически во все сферы деятельности человека.

Шведская финтех-компания Klarna Bank AB, которая предоставляет финансовые услуги в сети Интернет, активно использует AI-ассистента, который за первый месяц провел 2,3 млн диалогов, обработав около двух третей обращений в чате; среднее время решения сократилось с 11 до 2 мин., количество повторных обращений снизились на 25%, а совокупный эффект компания оценила как эквивалент работы 700 сотрудников поддержки [8]. Также отмечалось ожидание улучшения финансового результата (рост прибыли) на 40 млн долл. в 2024 г. за счет масштабирования ассистента и снижения затрат на обслуживание [8].

Американская транспортная компания C.H. Robinson до внедрения генеративного ИИ занималась обработкой входящих электронных версий тендерной заявки до 4 часов, после внедрения – около 90 сек. [9]. Компания сообщает о масштабе автоматизации: до 5500 заказов на перевозку в день обрабатываются за 90 сек.; около 2600 ценовых предложений в день формируются за 32 сек.; около 3 тыс. заявок на согласование слотов в день обрабатываются в пределах 60 сек. по более чем 26 тыс. локаций [9].



Рис. 1. Типовой цикл работы LLM-ассистента в организации

По сообщению Reuters со ссылкой на Bloomberg News, Microsoft оценила экономию от применения ИИ в своих контакт-центрах более чем в 500 млн долл. в 2024 г.; также сообщалось, что ИИ генерирует 35% кода в новых продуктах компании [10].

Один из крупнейших розничных и коммерческих банков Великобритании NatWest в пресс-релизе сообщил, что функциональность GenAI в цифровом ассистенте Soqa+ дала улучшение удовлетворенности клиентов на 150% и одновременно снизила долю случаев, когда требуется вмешательство сотрудника [11].

Британская телекоммуникационная компания BT Group отмечает, что в кейсе внедрения AI-ассистента Aimee приводятся следующие метрики: до 60 тыс. диалогов в неделю проходит через чат-бот, в то время как двумя годами ранее эта цифра была вдвое меньше; по клиентским сценариям показатели успешной автоматизации приближаются к 50%; использование канала растет на 51% от года к году [12].

Крупнейший австралийский Commonwealth Bank сообщил, что ИИ-ориентированная коммуникация в мобильном приложении помогла сократить время ожидания в колл-центре на 40% за последний финансовый год [13].

Австралийская телекоммуникационная компания Telstra отметила, что по итогам тестовых кейсов в 2023 г. 90% персонала, использовавшего инструмент краткого резюмирования истории клиента, сэкономили время; в результате повторных контактов стало 20% меньше. В другом пилоте более 80% участников отметили положительное влияние генеративного ИИ на взаимодействие с пользователями; первоначально решение тестировалось на 200 фронтлайн-сотрудниках [14].

Для понимания механизмов трансформации сервисных отраслей недостаточно констатации факта автоматизации. Необходимо формализовать процесс замещения живого труда технологическим фактором. В связи с этим предлагается задействовать модифицированную производственную функцию с постоянной эластичностью замещения, где выпуск сервисного продукта (Q) определяется как:

$$Q = A \times \left[\alpha \times (L_r + \beta \times LLM)^{\rho} + (1 - \alpha) \times L_c^{\rho} \right]^{\frac{1}{\rho}},$$

где A – коэффициент, отражающий уровень технологического прогресса и эффективности организации процессов в компании, который не зависит напрямую от объема затраченных ресурсов (труда или ИИ);

α – коэффициент, который показывает долю задач в отрасли, поддающихся алгоритмизации (в банках α выше, чем в творческих индустриях), безразмерный;

LLM – объем инвестиций в вычислительные мощности или количество активных ИИ-агентов, денежная единица;

L_r – затраты рутинного труда (фронт-офис, первая линия поддержки), денежная единица к единице времени;

L_c – когнитивный (не рутинный) труд экспертов, денежная единица к единице времени;

β – коэффициент технологического превосходства LLM в обработке структурированных данных, безразмерный;

ρ – параметр замещения, определяющий эластичность замещения (σ) персонала нейросетью, безразмерный.

Предложенная математическая модель демонстрирует, что высокая эластичность смены рутинных операций подтверждает гипотезу об эндогенном характере влияния ИИ на рост производительности.

Математически случай совершенного замещения факторов достигается при $\rho = 1$ (модель становится линейной), что соответствует полной автоматизации типовых операций. При $\rho \rightarrow 0$ модель стремится к функции Кобба – Дугласа, а при $\rho \rightarrow -\infty$ факторы становятся взаимодополняющими. Анализ параметра α показывает, что сервисный сектор (финансы, ритейл) обладает высокой чувствительностью к внедрению LLM в силу доминирования рутинных когнитивных операций. При этом чем выше параметр A за счет совершенствования качества менеджмента, скорости интеграции LLM в существующие CRM и ERP-системы и общей цифровой зрелости отрасли, тем быстрее каждый вложенный в ИИ рубль даст кратный эффект.

Белорусские кейсы внедрения LLM и близких NLP/диалоговых решений

В основу исследования заложен принцип количественно-качественного анализа, направленный на верификацию гипотезы о влиянии внедрения LLM и диалоговых AI-платформ на трансформацию операционной эффективности организаций. В работе данные технологии рассматриваются не как изолированное IT-решение, а как фундаментальный экономический фактор, способствующий сдвигу границы производственных возможностей.

Проведенный анализ источников [15–22] позволяет систематизировать экономические эффекты по ключевым отраслевым кластерам.

Финансовый сектор: переход к парадигме Intelligent Automation. Банковский сектор демонстрирует высокую эластичность операционных процессов по отношению к внедрению генеративных моделей:

- ЗАО «Альфа-Банк» реализует стратегию, где ИИ (RAG-архитектура) обеспечивает дивергенцию роста бизнеса и операционных затрат. Рост клиентской базы (+27% по сравнению с аналогичным периодом прошлого года) сопровождается удержанием лидерских позиций по NPS (44 процентных пункта), что свидетельствует об эффективности гибридных моделей обслуживания;
- ЗАО «Сбер Банк» подтверждает гипотезу о высокой мобильности технологий: миграция на платформу SaluteRPA с API GigaChat была реализована менее чем за месяц. Ключевой актив – способность алгоритмов к семантической саммаризации и извлечению сущностей из неструктурированных данных;
- ЗАО «МТБанк» фиксирует эффект масштаба через внедрение платформы Digital2Speech. Обработка 455 тыс. звонков с уровнем полной автоматизации порядка 9–10% свидетельствует о высвобождении значительного объема человеко-часов для задач высокой когнитивной сложности.

Результаты сценарного моделирования (рис. 2) базируются на экстраполяции коэффициентов NBER к верифицированным метрикам белорусских

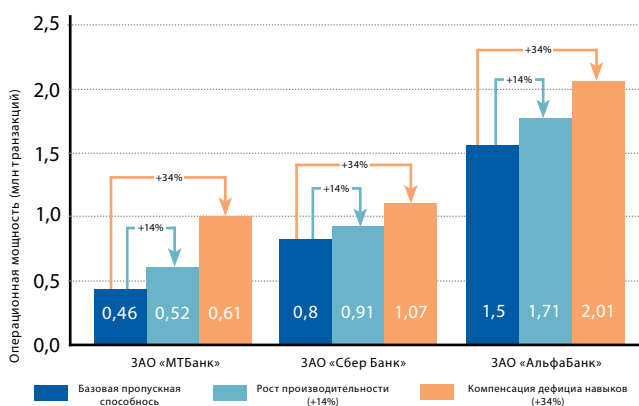


Рис. 2. Прогнозная модель масштабирования пропускной способности сервисных систем на основе коэффициентов эффективности внедрения LLM

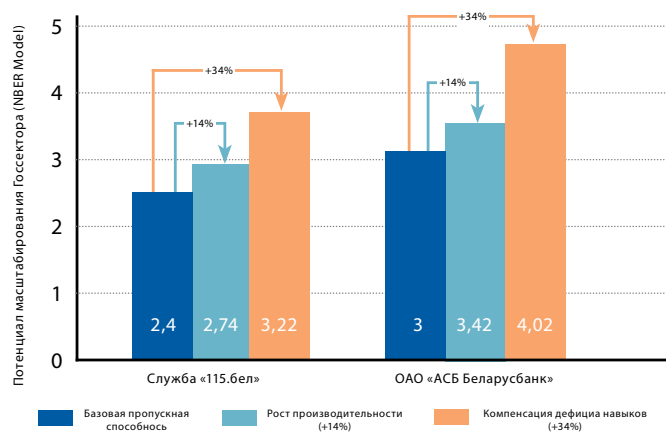


Рис. 3. Прогнозная модель масштабирования пропускной способности сервисных систем ОАО «АСБ Беларусбанк» и «115.бел» на основе коэффициентов эффективности внедрения LLM

банков. В расчетах использованы подтвержденные данные пилотного внедрения в ЗАО «МТБанк» (455 тыс. транзакций), модель реконструкции потока заявок ОАО «Сбер Банк» (уровень автоматизации >40%) и нормативная оценка пропускной способности ЗАО «Альфа-Банк» на основе базы в 1 млн активных клиентов. Моделирование демонстрирует, что интеграция LLM позволяет компенсировать дефицит квалифицированных кадров (+34%) и обеспечить чистый прирост производительности труда (+14%), трансформируя структуру операционных издержек без экстенсивного расширения штата.

Телекоммуникации и экосистемы: коммерциализация LLM. COOO «МТС» запустило интеллектуального помощника PomogAI, ориентированного на автоматизацию клиентской поддержки и создание интеллектуального контента. Сервис уже привлек более 1 тыс. активных пользователей с доминирующей долей текстовых запросов (+80%), а пользователи, в свою очередь, сгенерировали около 1 тыс. изображений через мультимодальные функции. Инструмент доступен массовой аудитории за фиксированную подписку, что демонстрирует коммерческую готовность LLM-решений к повседневному использованию и снижению операционных затрат без расширения контакт-центра.

Ритейл и E-commerce: сквозная автоматизация цепочки стоимости. В данном секторе зафиксирован синергетический эффект от внедрения ИИ на этапе операционного цикла.

К примеру, работа омниканальной платформы CraftTalk (интегратор – «НЬЮЛЭНД технолоджи»)

в ЗАО «Интернет-магазин Евроопт» подтверждает эффективность ИИ в управлении волатильностью спроса. Достигнутый уровень автоматизации составляет 30–85% в зависимости от типа запроса. Экономический эффект выражается в обеспечении круглосуточного цикла обслуживания (24/7) и сглаживании пиковых нагрузок без экстенсивного расширения штата операторов.

Сектор услуг, малый и средний бизнес: эластичность конверсии. Эмпирические данные проектов-победителей конкурса HostFly.by и кейсы интегратора JS Global демонстрируют прямую корреляцию между внедрением AI-агентов и коммерческими показателями:

- *проект AI Sapiens показывает рост конверсии до 50% при сокращении времени отклика до 15–30 сек.;*
- *кейс ADVAGA (BBRent) иллюстрирует возможность полного замещения линейного персонала: AI-бот сократил время обработки заявки на 65%, увеличив конверсию на 32%.*

Государственный сектор: масштабирование пропускной способности. ОАО «АСБ Беларусбанк» и единая диспетчерская служба «115.бел» эксплуатируют NLP-системы для обработки типовых обращений, при этом находятся на стадии активного внедрения LLM-решений. Сценарное моделирование с использованием коэффициентов NBER демонстрирует потенциал экстенсивного роста пропускной способности сервисных систем без увеличения штатной численности персонала, что указывает на расширение производственных возможностей (рис. 3).

Риск-ориентированные модели внедрения LLM и методика расчета совокупного экономического эффекта

Риски внедрения LLM в белорусских организациях во многом совпадают с международной практикой, но имеют и локальные особенности: ограниченный доступ к высокопроизводительным вычислениям и зарубежным облачным сервисам, высокие требования к защите информации (банковская тайна, хранение и обработка персональных данных), а также необходимость надежной работы в критичных для населения сервисах (банки, связь, ЖКХ, транспорт).

Ниже приведены наиболее часто встречающиеся в практике риски и меры их снижения (таблица),

сформированные с учетом международного стандарта NIST AI RMF 1.0 (Artificial Intelligence Risk Management Framework) и профилем для генеративного ИИ (NIST AI 600-1) [23].

Для нашей страны наиболее применима модель, где внедрение LLM опирается на уже действующие требования к защите персональных данных, информационной безопасности и отраслевому комплаенсу (банковская тайна, требования к критическим информационным системам), а также дополняется внутренними корпоративными политиками использования ИИ.

На уровне организаций это означает необходимость формализовать перечень допустимых кейсов, правила работы с данными, ответственность за решения, порядок тестирования и мониторинга, процедуры реагирования на инциденты и обучение персонала.

Заключение

Экономический анализ подтверждает, что в таких отраслях, как банковское дело, телекоммуникации и ритейл, большие языковые модели выступают в роли эндогенного катализатора производительности. Применение модифицированной оценки выпуска сервисного продукта позволило математически доказать, что современный интеллектуальный капитал способен эффективно замещать рутинные когнитивные операции, обеспечивая при этом нелинейный рост пропускной способности систем без привлечения дополнительных штатных единиц.

Результаты деятельности ведущих организаций Республики Беларусь демонстрируют высокую эластичность сервисных процессов к внедрению AI-решений. Установлено, что автоматизация типовых сценариев взаимодействия с потребителями достигает 85%, что сопровождается существенным сокращением временных издержек и повышением лояльности аудитории за счет мгновенности реакции.

Показано, что масштабное проникновение LLM в национальное экономическое пространство сопряжено с комплексом инфраструктурных, регуляторных и операционных барьеров. Устойчивое масштабирование технологии в Беларуси требует исключения угроз, связанных с информационной безопасностью и потенциальной деградацией качества ответов.

Предложенный алгоритм управления рисками на базе международных стандартов (NIST AI RMF) [24]

Таблица. Реестр рисков внедрения больших языковых моделей в организациях Республики Беларусь и меры по их минимизации

Риск	Как проявляется в условиях Республики Беларусь	Меры по минимизации
Инфраструктурно-ресурсные риски		
Доступность вычислительных ресурсов и вендорная зависимость	Дефицит GPU/ускорителей, ограничения на поставки и использование зарубежных облаков, риск резкого роста стоимости API	Гибридная архитектура (on-prem + локальные облака), резервные модели, план миграции, закупки/пулы вычислений, контрактные SLA

Математическая модель совокупных инфраструктурных издержек (C_{infra}) можно представить как функцию от способа развертывания:

$$C_{infra} = (P_{cloud} \times V \times R_{FX}) + (CapEx_{local} + OpEx_{local}),$$

где $P_{cloud} \times V$ – стоимость использования зарубежных API. В условиях Республики Беларусь этот параметр несет риск резкого роста стоимости или блокировки доступа, ден. ед. $\times$ число токенов (шт.);

R_{FX} – валютный коэффициент (риск девальвации национальной валюты, увеличение стоимости импортных облачных услуг);

$CapEx_{local}$ – капитальные затраты на закупку собственных GPU-серверов для локального развертывания, что необходимо для соблюдения требований банковской тайны и защиты данных, ден. ед.;

$OpEx_{local}$ – операционные расходы на обслуживание локальной фермы серверов и оплату электроэнергии для высокопроизводительных вычислений, ден. ед.

Информационно-безопасностные и регуляторные риски		
Утечки данных и нарушение конфиденциальности	Риск передачи клиентских данных во внешние сервисы; ошибки сотрудников при вводе конфиденциальной информации в чат	Классификация данных, запрет/фильтрация чувствительных данных, анонимизация данных, уходящих во внешние сервисы, локальное развертывание для критичных процессов, журналирование и DLP
Косвенная инъекция промптов	Риск, при котором злоумышленник размещает вредоносные инструкции на внешнем сайте, который LLM считывает через Интернет или RAG-систему, что заставляет ассистента выполнять несанкционированные действия (например, пересылать данные)	Пентест и red teaming, контроль входов/выходов, изоляция инструментов, управление привилегиями, рекомендации OWASP для LLM-приложений [24]
Чрезмерная агентность	Риск предоставления ИИ-ассистенту избыточных полномочий (доступ к API, удаление файлов, проведение транзакций) без промежуточного подтверждения человеком	Принцип минимальных привилегий: отдельные сервисные учетные записи, RBAC, строго ограниченные права, разделение сред (dev/test/prod), список разрешенных инструментов и команд (что агенту можно вызывать), запрет произвольных запросов, шаблоны действий

Для оценки рисков, связанных с утечкой данных или инъекцией промптов, целесообразно использовать следующую формулу:

$$ALE = SLE \times ARO,$$

где ALE (Annualized Loss Expectancy) – ожидаемые годовые потери, ден. ед./год; SLE (Single Loss Expectancy) – ожидаемый ущерб от одного успешного инцидента, ден. ед./инцидент; ARO (Annualized Rate of Occurrence) – ожидаемая годовая частота инцидентов, инцидентов/год.

В свою очередь, данные показатели имеют следующий математический вид:

$$SLE = AV \times EF,$$

где AV (Asset Value) – стоимость (ценность) актива, ден. ед.; EF (Exposure Factor) – доля потерь при реализации события ($0 \leq EF \leq 1$);

$$ARO = \frac{N_{incidents}}{T_{years}},$$

где $N_{incidents}$ – количество случившихся угроз или негативных событий (например, инцидент безопасности, технический сбой или критическая ошибка LLM), шт.;

T_{years} – длительность периода наблюдения, лет.

Регуляторный риск при внедрении LLM в финансовом секторе Республики Беларусь можно описать как сумму вероятностных санкций за несоблюдение нормативов (банковская тайна, защита данных и т.д.):

$$R_{reg} = \sum (P_i \times S_i) + C_{comp},$$

где P_i – вероятность нарушения i -го регуляторного требования (например, закона о персональных данных) ($0 \leq P_i \leq 1$); S_i – финансовая санкция (штраф/потери) при нарушении i , ден. ед.; C_{comp} – затраты на обеспечение соответствия (аудиты, разработка внутренних политик и т.д.), ден. ед. в год.

Утечка конфиденциальной информации может произойти через обучающие выборки для LLM, риск которой можно оценить следующей вероятностной моделью:

$$D_{risk} = V \times T \times I,$$

где V (Vulnerability) – вероятность того, что сотрудник введет чувствительные данные в публичный чат-бот ($0 \leq V \leq 1$);

T (Threat) – вероятность того, что эти данные будут извлечены злоумышленником или использованы моделью для ответа другому пользователю ($0 \leq T \leq 1$);

I (Impact) – стоимость потери данных (например, рыночная стоимость клиентской базы и т.д.), ден. ед.

Математическая эффективность комплекса мер по управлению рисками на основе NIST AI RMF [24] выражается через снижение совокупного риска:

$$Risk_{total} = (Risk_{base} - Risk_{mitigated}) + Cost_{protection},$$

где $Risk_{base}$ – исходный риск (например, при использовании зарубежных облачных LLM без фильтрации), ден. ед. за период;

$Risk_{mitigated}$ – величина риска, которую удалось снизить/нивелировать ($0 \leq Risk_{mitigated} \leq Risk_{base}$), ден. ед.;

$Cost_{protection}$ – прямые расходы на внедрение мер защиты (гибридная архитектура, DLP, «песочницы» и т.п.), ден. ед. за тот же период.

Операционно-технологические риски

Ошибки генерации (hallucinations) и качество ответов	Риск генерации уверенных, но ложных утверждений. В экономическом контексте это может привести к ошибочным финансовым прогнозам или неверному толкованию законодательства	Использование RAG-архитектуры на основе верифицированной базы знаний, шаблоны ответов, обязательная эскалация человеку в риск-сценариях, мониторинг качества, тестовые наборы, агент-ревьюер для проверки ответов
--	--	---

Математическая модель совокупного ущерба от операционно-технологических рисков строится как сумма вероятностных потерь от сбоев в работе модели, некорректной генерации данных и деградации системы со временем:

$$L_{op_tech} = L_{hallucination} + L_{degradation} + L_{recovery}$$

где $L_{hallucination}$ – ущерб от генерации ложных или «уверенных, но неверных» утверждений, ден. ед.;
 $L_{degradation}$ – потери из-за снижения качества ответов по мере изменения внешних данных или «отравления» модели, ден. ед.;
 $L_{recovery}$ – прямые затраты на восстановление работоспособности системы и исправление бизнес-данных, ден. ед.

Рассмотрим входящие в математическую модель параметры более детально.

Ущерб от «галлюцинаций» ($L_{hallucination}$) является наиболее критичным для рассматриваемых экономических сфер. Он рассчитывается как:

$$L_{hallucination} = N \times P_{err} \times (1 - P_{detect}) \times SLE_{avg},$$

где N – общее количество запросов, обрабатываемых LLM, шт.;

P_{err} – вероятность критической ошибки (галлюцинации), не выявленной системой фильтрации;

P_{detect} – вероятность того, что оператор или фильтр заметит ошибку до того, как она попадет клиенту;

SLE_{avg} – средний размер финансового убытка от одной неверной консультации (например, ошибочное одобрение льготного кредита), ден. ед.

Ущерб от деградации модели ($L_{degradation}$) рассчитывается как:

$$L_{degradation} = \int_{t_0}^{t_1} (E_{large} - E_{actual}(t)) dt + C_{unit},$$

где E_{large} – целевой уровень автоматизации; E_{actual} – фактический уровень автоматизации, снижающийся из-за неактуальности базы знаний (RAG);

C_{unit} – стоимость ручной обработки одного запроса сотрудником (стоимость замещения), ден. ед. на единицу времени.

Для комплексного анализа рисков интеграции LLM предлагается ввести базовую формулу совокупного ущерба (L_{total}), включив в нее компоненты нефинансовых и регуляторных потерь:

$$L_{total} = L_{direct} + L_{rep} + L_{reg},$$

где L_{direct} – прямые финансовые потери (ошибки транзакций, затраты на восстановление инфраструктуры), ден. ед.;

L_{rep} – репутационный ущерб, ден. ед.; L_{reg} – регуляторные и штрафные санкции, ден. ед.;

Для Республики Беларусь это включает штрафы за нарушение законодательства о персональных данных, например Закона №99-3 [25], и несоблюдение нормативов операционной надежности:

$$L_{reg} = \sum (S_i \times P_i) + C_{lic}$$

где S_i – размер штрафа, ден. ед.; P_i – вероятность наложения санкции, %; C_{lic} – стоимость риска отзыва лицензии или приостановки операций, ден. ед.

Социально-кадровые и репутационные риски

Правовые и комплаенс-риски	Неопределенность авторства и ответственности за контент; соблюдение требований по персональным данным и отраслевым ограничениям	Внутренние политики использования ИИ, маршруты согласования, маркировка AI-контента, хранение доказуемости (audit trail), обучение персонала
Кадровые и организационные риски	Недостаток специалистов по ML/LLM и инженеров по интеграции; сопротивление изменениям, «теневое» использование публичных чат-ботов	Центр компетенций, обучение пользователей, регламент внедрения, KPI по качеству и экономии, управление изменениями
Репутационные риски	Негативные ответы, неправильные рекомендации, непредсказуемые реакции ассистента в публичных каналах поддержки	Политики контента, безопасные шаблоны, ограничение тем, обязательная эскалация, контроль тональности, публичные дисклеймеры

Социально-кадровые риски связаны с изменением роли человека в производственном процессе и внутренней организационной культурой.

Математическую модель кадрового риска (R_{HR}) можно представить в следующем виде:

$$R_{HR} = (C_{train} + C_{recruit}) \times (1 + k_{recruit}),$$

где C_{train} и $C_{recruit}$ – затраты на обучение текущего персонала и найм новых экспертов, ден. ед.;

$k_{recruit}$ – коэффициент снижения производительности из-за организационного сопротивления изменениям.

Также стоит учитывать риски, связанные с внешним восприятием бренда при взаимодействии клиентов с LLM-системами (токсичность и некорректность ответов, снижение эмпатии вследствие падения лояльности клиентов и отток клиентов из-за утечек).

Модель ущерба деловой репутации (L_{rep}) можно оценить как:

$$L_{rep} = \Delta NPS \times LTV_{avg} \times N_{cust},$$

где ΔNPS – прогнозируемое снижение индекса лояльности, пункты NPS (NPS в диапазоне –100...+100); LTV_{avg} – средняя пожизненная ценность клиента в сервисном секторе экономики, ден. ед. к клиенту; N_{cust} – количество клиентов, затронутых негативным опытом взаимодействия с LLM-системами, чел.

В условиях высокой концентрации банковского сектора Республики Беларусь утечка данных через LLM-интерфейс может привести к потере доверия к цифровым каналам обслуживания в целом.

позволяет нивелировать негативные последствия и обеспечить технологическую независимость бизнеса.

На основании проведенных исследований видно, что в условиях текущей трансформации мировой хозяйственной системы большие языковые модели перестают быть объектом экспериментов, становясь базисным инструментом повышения конкурентоспособности и операционной продуктивности сервисного сектора Республики Беларусь. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. IDC's Worldwide AI and Generative AI Spending – Industry Outlook // <https://www.idc.com/resource-center/blog/ids-worldwide-ai-and-generative-ai-spending-industry-outlook/>.
2. Generative AI to Become a \$1.3 Trillion Market by 2032, Research Finds // <https://www.bloomberg.com/company/press/generative-ai-to-become-a-1-3-trillion-market-by-2032-research-finds/>.
3. The economic potential of generative AI: The next productivity frontier // <https://www.mckinsey.com/capabilities/tech-and-ai/our-insights/the-economic-potential-of-generative-ai-the-next-productivity-frontier>.
4. The state of AI in early 2024 // <https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/the-state-of-ai-2024>.
5. Brynjolfsson, E. Generative AI at Work // <https://www.nber.org/papers/w31161>.
6. Почти 3 млн обращений поступило в контакт-центр Беларусбанка за прошлый год // <https://belta.by/special/society/view/pochti-3-mln-obraschenij-postupilo-v-kontakt-tsentr-belarusbanka-za-proshlyj-god-699756-2025/>.
7. МТС: виртуальный консультант обработал 4 млн вопросов по телефону и 600 тыс в чатах // <https://www.mts.by/news/91225/>.
8. Klarna: Scaling customer support with an AI assistant // <https://openai.com/index/klarna/>.
9. C.H. Robinson Automates Freight Lifecycle with Generative AI (Press release) // <https://www.chrobinson.it/en-us/chrglobal/about-us/newsroom/press-releases/2024/generative-ai-for-freight-shipment-lifecycle/>.
10. Microsoft racks up over \$500 million in AI savings while slashing jobs, Bloomberg News reports // <https://www.reuters.com/business/microsoft-racks-up-over-500-million-ai-savings-while-slashing-jobs-bloomberg-2025-07-09/>.
11. NatWest & OpenAI collaborate to accelerate cutting-edge AI transformation // <https://www.natwestgroup.com/news-and-insights/news-room/press-releases/ai-and-data/2025/mar/natwest-open-ai-collaborate-to-accelerate-cutting-edge-ai-transf.html>.
12. BT Group leans on AI to transform customer service experience // <https://newsroom.bt.com/bt-group-leans-on-ai-to-transform-customer-service-experience/>.
13. Customer safety, convenience and recognition boosted by early implementation of GenAI // <https://www.commbank.com.au/articles/newsroom/2024/11/reimagining-banking-nov24.html>.
14. Telstra scales up AI adoption following promising pilots of generative AI solutions // <https://www.telstra.com.au/aboutus/media/media-releases/telstra-scales-up-ai-adoption>.
15. Будущее наступило: IT-гуру Альфы рассказали, что уже делает искусственный интеллект для клиентов // <https://myfin.by/article/banki/stali-izvestny-finansovye-pokazateli-alfa-banka-smotrim-pribyl-i-rentabelnost-37312>.

■ **Summary.** The paper presents an analysis of the transformation of national business under the influence of Large Language Models (LLMs), which act as an internal catalyst for labor intensification in the service sector of the economy of the Republic of Belarus. Based on a synthesis of system analysis and economic-mathematical modeling, the concept of a production function with constant elasticity of substitution has been adapted to assess the potential for displacing routine operations with intelligent agents. A high determination between the integration of LLM solutions and operational productivity is empirically confirmed. It has been established that in the conditions of the Belarusian market, the implementation of large language models allows minimizing the time for processing client data from several hours to one and a half minutes. Quantitative assessment demonstrates the possibility of substituting labor resources comparable in scale to the activities of hundreds of full-time specialists. Original models for calculating risks from LLM implementation have been formulated, taking into account not only direct benefits but also probabilistic distributions of damage from specific cyber risks. The findings can be used by top management during the transition to AI-oriented management models under conditions of limited access to hardware capacities and strict requirements of the national regulator.

■ **Keywords:** Generative Intelligence, economic effect, productivity, Republic of Belarus.

■ <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2026-03-36-44>

16. СберБанк (Беларусь) внедрил платформу SaluteRPA для роботизации бизнес-процессов // <https://www.sber-bank.by/new/business-process-10042025>.
17. Проект: МТБанк (Минский транзитный банк) – BSS Digital2Speech // [https://www.tadviser.ru/index.php/Проект:МТБанк_\(Минский_транзитный_банк\)_ \(BSS_Digital2Speech\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Проект:МТБанк_(Минский_транзитный_банк)_ (BSS_Digital2Speech)).
18. МТС представила ИИ-помощника ПомогAI // <https://tech.onliner.by/2025/10/21/mts-predstavila-ii-pomoshhnika-pomogai>.
19. Евроторг внедрил интеллектуального чат-бота в свои онлайн-сервисы // <https://belretail.by/news/evrotorg-vnedril-intellektualnogo-chat-bota-v-svoi-onlayn-servisyi>.
20. ИИ меняет белорусский бизнес: результаты конкурса «Искусственный интеллект в деле» // <https://www.hostfly.by/about/news/ii-menyat-belorusskiy-biznes-rezultaty-konkursa-iskusstvennyy-intellekt-v-dele-ot-hostfly-by/>.
21. Кейс: ИИ-регулирование. Вебинары для сотрудников [Электронный ресурс] // <https://belarus.revera.legal/proekty/451-kejs-ii-regulirovanie-vebinaryi-dlya-sotrudnikov/>.
22. Контакт-центр 115 за сутки обрабатывает 6,5 тыс. звонков // <https://www.belta.by/society/view/kontakt-tsentr-115-za-sutki-obrabatyvaet-65-tys-zvonkov-538647-2022/>.
23. Artificial Intelligence Risk Management Framework (AI RMF 1.0) // <https://www.nist.gov/publications/artificial-intelligence-risk-management-framework-ai-rmf-10>.
24. OWASP Top 10 for Large Language Model Applications // <https://owasp.org/www-project-top-10-for-large-language-model-applications/>.
25. О защите персональных данных: Закон Респ. Беларусь, 07.05.2021 г., №99-3 / Эталон-Online // <https://etalonline.by/document/?regnum=h12100099>.

Статья поступила в редакцию
29.12.2025 г.

Лин-инструменты и эффективность процессов в вагоностроении



Эдуард Кондратьев,
профессор кафедры
«Менеджмент» Пензенского
государственного
университета архитектуры
и строительства, доктор
экономических наук



Николай Гудз,
директор по развитию
ООО «Ассоциация
национальных систем
управления»

Вагоностроение — стратегическая отрасль промышленности, обеспечивающая железнодорожный транспорт подвижным составом. На долю железных дорог в Российской Федерации приходится основной объем грузовых перевозок, что предопределяет высокие требования к техническому состоянию вагонного парка и устойчивости работы предприятий. Стоит заметить, что обычно они не только выпускают новые вагоны, но и обслуживают «бывшие в употреблении» — осуществляют их сервис, ремонт и мойку. В управлении компании «Российские железные дороги» находится около 100 предприятий, включая 6 вагоноремонтных заводов со штатом сотрудников порядка 3,5 тыс. человек на каждом. Таким образом, масштаб и распределение мощностей производства представляют собой сложную систему планирования и управления загрузкой.

На определенном отрезке времени РЖД столкнулись с резким увеличением объема заказов на окраску вагонов и их подготовку к ремонту. При этом производство работало практически на пределе, а кадровый дефицит квалифицированного персонала сильно усугублял ситуацию. Существенная часть операций выполнялась субподрядчиками, арендовавшими площади заказчика, что дополнительно ослож-

няло координацию производственных процессов и контроль качества. В этих условиях необходимо было найти решения, позволяющие увеличить объемы выполнения работ без существенных капитальных вложений и при ограниченных трудовых ресурсах. Этот период совпал с началом внедрения инструментов бережливого производства в России, которое воспринималось промышленностью с высо-

кой степенью осторожности. Тем не менее в качестве пилотной площадки для апробации новых подходов был выбран Воронежский вагоноремонтный завод. Главная задача состояла в том, чтобы запустить новую систему планирования работ и загрузки мощностей, основанную на использовании таких базовых лин-инструментов, как стандартизированная работа, диаграмма Ямазуми, визуализирующая

временные циклы в производстве, выравнивание загрузки и нагрузки (хейдзунка).

Для предприятий РЖД важно было достичь 100%-го выполнения всех заказов, ежемесячных планов производства с одновременным увеличением пропускной способности и производительности, распространить опыт на все структурные подразделения, а также на остальные вагоноремонтные заводы.

Координировали деятельность директора по производству и организации производственной системы. Заметим, что в проекте активное участие принимали линейные работники, что способствовало принятию и дальнейшему применению инструмента «стандартизированная работа».

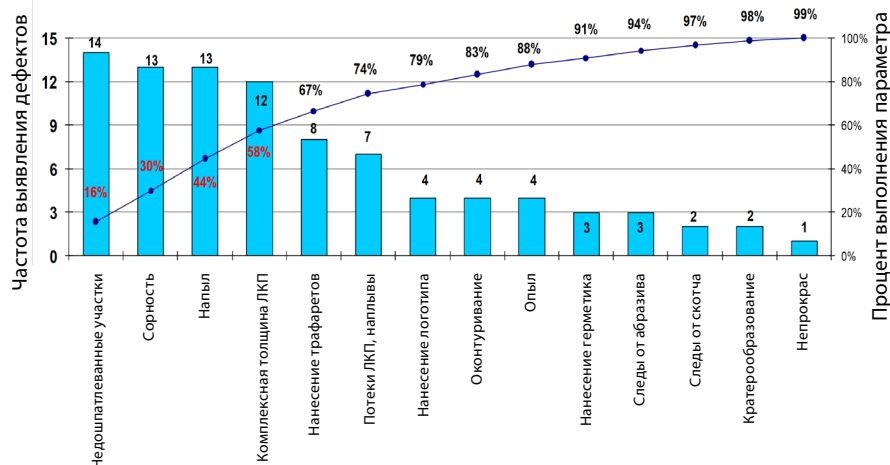


Рис. 1. Диаграмма Парето по основным производственным переделам

Вначале была собрана сводная технологическая карта по всем материалам и типам ремонтов с пошаговым отображением техпроцесса. Проведены замеры

трудозатрат персонала по всем технологическим операциям на основе методики стандартизированной работы для машиностроительной отрасли. Параллельно были проанализированы данные по качеству и основным отклонениям, что впоследствии дало возможность более точно и рационально формировать сменно-суточные задания.

Активно использовались элементы методологии диагностики SPS (Smart production system) [1]. Построенная диаграмма Парето по основным производственным переделам позволила открыть несколько проектов по устранению корневых проблем, влияющих на вариабельность процесса (рис. 1). Широко применялись такие формы работы со сложными проблемами, как штурм-прорыв, SWIP (программа недельных улучшений), методика «5 почему» (инструмент поиска коренной причины проблемы или сбоя). При этом средний цикл отработки выявленных потерь составил неделю полноценной загрузки группы из 4–6 человек.

На основе сводной технологической карты и с учетом экспериментов, проведенных в ходе решения проблем, был предло-

№	Наименование операции (по типам обработки вагонов)	Трудоемкость операции		
		Человеко-часы	Люди	Время
1	Маневровые работы	1,0	2	0,5
2	Монтаж защитных щитов	3,0	2	1,5
3	Дробеструйная очистка кузова (автоматический режим Карло Банфи)	5,0	2	2,5
4	Дробеструйная очистка труднодоступных мест и днища (ручной режим)	2,0	2	1,0
5	Демонтаж защитных щитов	2,0	2	1,0
6	Обдувка	2,0	2	1,0
...	...	...	...	...
29	Разметка маскировки Ral 7004	4,0	2	2,0
30	Окраска бортов эмалью Ral 7012 в 1 проход	3,0	2	1,5
31	Демонтаж маскировки (частичный)	1,0	2	0,5
32	Нанесение бортовых знаков и надписей	4,0	2	2,0
33	Маскирование борта перед окраской подвагонки	2,0	2	1,0
34	Окраска подвагонного оборудования	2,0	2	1,0
35	Демонтаж маскировки (полный)	1,0	2	0,5
36	Разведение лакокрасочных материалов, промывка оборудования 2м х 0,4 х 6 раз	5,6	2	2,8
ИТОГО		184,2	18,89	51,0
Среднемесячный цикл прохождения вагона в производстве				2,43
Общее количество операций				36
Цикл прохождения вагонов по производству с учетом потерь на сушку материалов				2,90

Рис. 2. Фрагмент стандартного сменно-суточного задания

жен шаблон сменно-суточного задания (ССЗ), в котором оптимальным образом учитывались особенности типов операций и снабжения материалами (рис. 2). Ориентиром стало максимальное снижение вариабельности длительности выполнения работ, которое впоследствии позволило бы повысить достоверность планирования и результативность (отношение факта к плану).

Задача по контролю исполнения и планированию ССЗ на следующую смену была возложена на сменных мастеров. Вспомогательным инструментом стандартизированной работы стали стенды производственного анализа [2]. Они позволили организовать прозрачный и оперативный контроль соблюдения ССЗ (еженедельный) и времени такта (ежемесячный) на производственных линиях.

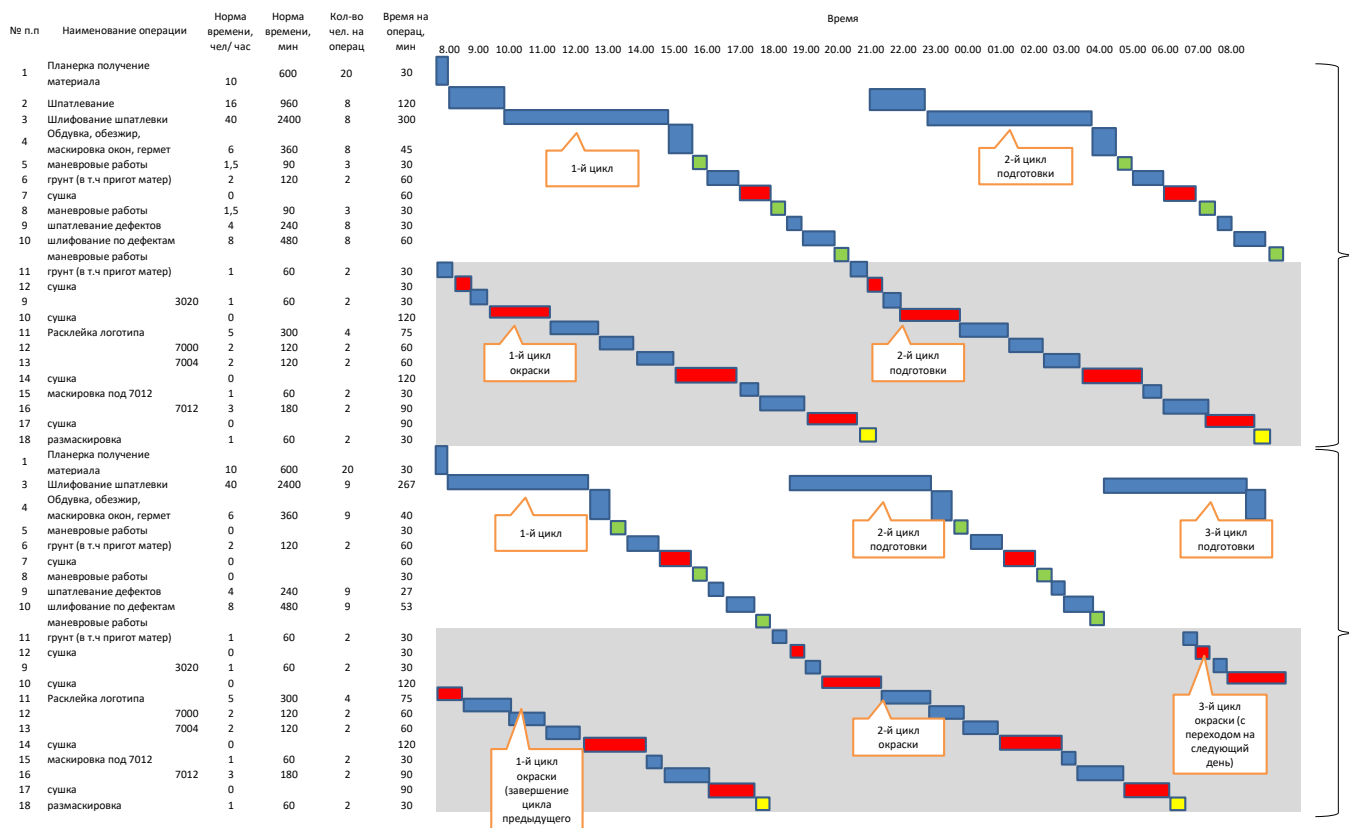
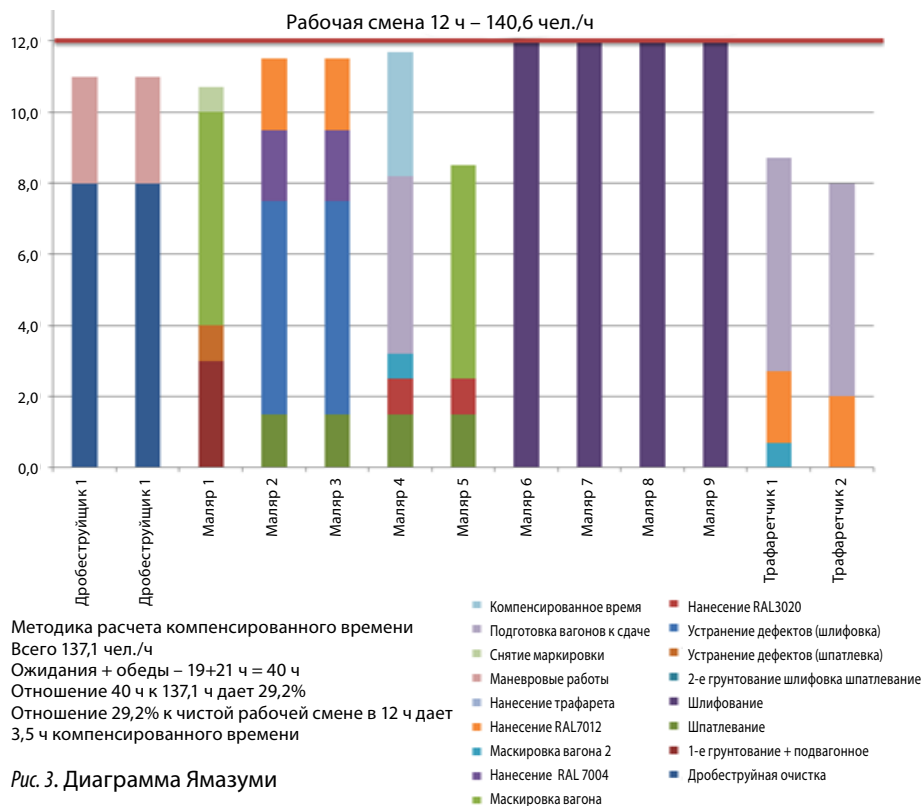


Рис. 4. Сетевой график для планирования работ

Действуя таким образом, рабочей команде за короткий период удалось собрать реальную информацию по каждому стандартному технологическому циклу, а затем провести балансировку загрузки операторов. В случае, когда нагрузка по какому-то виду работ была выше времени такта, она распределялась между сотрудниками, а на экране производственного анализа вывешивалась экспериментальная диаграмма Ямазуми (рис. 3).

На основе сбалансированной загрузки были сформированы проектно-расчетные сетевые графики с визуализацией узких мест (рис. 4), благодаря которым команда выявила недостатки производственных мощностей.

По инициативе директора по производству новые территориальная и организационная схемы процесса были апробированы в формате деловой игры (рис. 5). Эффект масштаба подтвердился в результате игровых манипуляций со временем такта, сырьем, материалами и деталями.

После отработки функциональности модели был запущен

пилотный проект в рамках действующего производства, для чего были спроектированы и реализованы новые планировки производственных участков, рассчитаны параметры мощностей рабочих мест и их пропускная способность. Все это позволило расшить «узкие места» в организации рабочего пространства, а также оптимально распределить площади и мощности между сотрудниками предприятия и аутсорсинговых компаний.

Время непосредственной реализации проекта составило 3 дня. В целом от момента задумки до окончания реализации ушло 2 месяца. В проекте приняли участие 18 сотрудников, среди которых 2 руководителя высшего уровня. Их присутствие позволило развернуть проект без проволочек на согласования и буквально мгновенно направлять необходимые организационные ресурсы на решение наиболее важных проблем. В результате рост производительности труда по пилотному участку составил 138% (66 вагонов против 48). Это позволило перевести про-

блему резкого повышения количества заказов на окраску и подготовку вагонов к ремонту в оперативное технологическое русло. Все работы были проведены без привлечения дополнительных сотрудников и с минимальными затратами.

Практика показала, что, во-первых, любое производство имеет скрытый потенциал для улучшений, а ключ к нему – талантливые и заинтересованные сотрудники. Во-вторых, чем больше персонала вовлечено в диагностику и изучение ситуации, тем точнее будут данные, выше заинтересованность и легче пройдут дальнейшие преобразования. В третьих, стандартизированная работа вкупе с регулярными сменно-суточными заданиями (ССЗ) и непрерывным производственным анализом – базовые управленческие инструменты, которые позволяют повысить достоверность планирования, отчетности, что в свою очередь, сказывается на точности взаимодействия и увеличении производительности. Диаграмма Ямазуми также является необходимым инструментом для балансирования работ по стандартизированным заданиям в режиме реального времени. И, наконец, сложные задачи по апробации манипуляций со временем такта, сырьем, материалами и деталями и установления нового порядка хода дел лучше всего решаются с помощью деловой игры. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кондратьев Э.В., Гудз Н.А. Разумная производственная система (SPS): как ее спроектировать и построить // Проблемы теории и практики управления. 2017. №10. С. 92–105.
2. Развитие бережливых производственных систем в России: синергия возможностей: коллективная монография / под ред. Э.В. Кондратьева. – М., 2022.



Рис. 5. Деловая игра

Национальные стратегии развития искусственного интеллекта

Аннотация. Раскрывается содержание понятия «искусственный интеллект», его связь с инновационным и цифровым предпринимательством. Рассмотрены национальные стратегии развития ИИ в разных странах, в том числе и в государствах постсоветского пространства. Констатируется, что необходимость анализа таких долгосрочных планов действий связана с потребностью обеспечения как социально-экономических и инновационных процессов, так и национальной безопасности. Особое внимание уделено основным положениям Государственной программы «Цифровая Беларусь» на 2026–2030 гг. Обосновывается целесообразность активизации разработки и принятия национальной стратегии развития искусственного интеллекта и согласования ее положений с отраслевыми программами.

Ключевые слова: искусственный интеллект, национальная стратегия, национальная безопасность, отраслевые программы.

Для цитирования: Мальгина И. Национальные стратегии развития искусственного интеллекта // Наука и инновации. 2026. №3. С. 49–54. <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2026-03-49-54>



Ирина Мальгина,
доцент кафедры государственной
экономической политики Института
государственной службы Академии
управления при Президенте
Республики Беларусь, кандидат
экономических наук, доцент,
irina_malgina@list.ru

Развитие искусственного интеллекта — одно из ключевых направлений инновационного и цифрового прогресса большинства стран. Экономист Б.Ю. Халлыев [и др.] утверждает, что этот термин «возник сравнительно недавно, однако уже сейчас практически невозможно представить себе мир без него» [1]. Исторические процессы, начавшиеся в середине XX в., несомненно, несут определенные изменения в культуре общения и вопросах взаимодействия людей в рамках автоматизации, роботизации и компьютеризации.

Российский исследователь С.А. Ефимова отмечает, что «искусственный интеллект меняет отношение людей к машинам, их взаимодействие друг с другом. Сейчас современные машины способны справляться с некоторыми задачами лучше, чем люди, что сулит большое будущее для нашего общества» [2]. При этом в становлении ИИ активную роль играет малое и среднее предпринимательство (МСП), представители которого часто являются разработчиками и исполнителями данного направления в различных сферах жизни государства и общества. Поэтому многие национальные стратегии развития ИИ включают различные мероприятия в отношении таких субъектов хозяйствования. Одним из негативных моментов является поглощение стартапов и молодых компаний транснациональными корпорациями во избежание появления конкурента и, конечно, для укрепления собственной конкурентоспособности и лидерства в определенных сегментах рынка. Как справедливо подчеркивают авторы Д.А. Алферьев и А.Е. Кремин, «большая доля патентов в сфере технологий искусственного интеллекта принадлежит транснациональным компаниям. При этом многие из них являются лидерами в области информационных технологий и находятся на территории США, Японии, Кореи и Китая» [4]. Так, российские ученые Е.З. Глазунова и А.В. Черная констатируют, что предприниматели крупнейших компаний активно вкладывают средства в технологии глубокого обучения, интеграционные технологии, прикладной искусственный интеллект и когнитивные данные для увеличения экономических и социальных выгод [3].

Рассматривая непосредственно предпринимательскую деятельность, экономисты С.Л. Сазанова и Н.Н. Карманов утверждают, что «применение искусственного интеллекта позволит сократить транзакционные и трансформационные издержки, повысить эффективность как предпринимательской деятельности, так и социальных программ государства, а значит увеличит темп экономического роста, что, в свою очередь, повысит доходы граждан – важный показатель эффективности государственной экономической политики» [5].

В то же время при всем позитивном и оптимистичном настроении общества в отношении ИИ возникают правовые, этические и другие вопросы его использования. Математики В.С. Шмагин и М.А. Маслова предупреждают, что «нужно создать систему ограничения для суперкомпьютера, которая не позволит каким-либо образом навредить человечеству. На данный момент вкладываются огромные деньги в разработку безопасного ИИ, будем надеяться, что они пойдут во благо всего человечества» [6].

Целью исследования является анализ зарубежного опыта в части направлений национальных стратегий развития ИИ для возможной адаптации в Беларуси.

Искусственному интеллекту посвящено множество публикаций, однако, как показал анализ, единого устоявшегося определения нет (табл. 1). Вероятно, это связано с различным пониманием машинного обучения, интеллекта как такового и других, возможно, философских и технических воззрений различных авторов.

С нашей точки зрения, наиболее всеобъемлющим является определение, выдвинутое

Н.В. Корбут, среди официальных документов – стратегия Узбекистана.

Необходимость рассмотрения и анализа различных стратегий развития ИИ связана с потребностью обеспечения как социально-экономических и инновационных процессов, так и национальной безопасности. И если в первом случае формирование ИИ нацелено на сельское хозяйство, «умные» города, транспорт и другие векторы, включая социальную направленность (например, здравоохранение, фармакология), то в сфере национальной безопасности это военная робототехника, БПЛА и др. Так, Исследовательская служба Конгресса США констатирует, что «искусственный интеллект – это быстро растущая область технологий с потенциально значительными последствиями для национальной безопасности» [16].

Причем затраты на роботизированную боевую технику неуклонно возрастают. Например, по данным консалтинговой компании Boston Consulting Group, в период 2000–2015 гг. мировые расходы на ее производство (только на беспилотные транспортные средства) утроились – с 2,4 до 7,5 млрд долл. [20]. По информации Mordor Intelligence, объем мирового рынка военных роботов оценивался в 23,31 млрд долл. в 2025 г. и, как ожидается, достигнет 36,93 млрд долл. к 2030 г. при среднегодовом темпе роста 9,64% [21]. Непосредственно в оборонных министерствах и ведомствах различных стран создаются специализированные подразделения по использованию ИИ. Так, в США был открыт Главный офис по цифровому и искусственному интеллекту Министерства обороны, который в 2024 г. запустил платформу взаимодействующих

Автор / Документ	Год	Содержание
Авторы		
Абдулатипова М.А. Камилова Р.Ш. [7]	2013	Область информатики, изучающая интеллектуальные возможности с помощью вычислительных устройств
Литвинов Д.О. [8]	2016	Область информатики, которая изучает интеллектуальные возможности с помощью вычислительных устройств, а также создания интеллектуальных машин, в том числе и интеллектуальных компьютерных программ
Плотников Д. В. Вахнин А.В. [9]	2019	Способность цифрового компьютера или управляемого компьютером робота выполнять задачи, которые решают разумные существа
Матюшок В.М. Красавина В.А. Матюшок С.В. [10]	2020	Комплекс родственных систем и технологий, развивающихся качественно и стремительно проникающих в самые различные сферы человеческой деятельности: фондовые рынки, маркетинг и интеллектуальный анализ данных, управление финансами и кредитными рисками, промышленность, робототехнику, управление человеческими ресурсами, рекрутинг, военное дело, медицину, музыку, издательское дело и т.д.
Шмагин В.С. Маслова М.А. [6]	2020	Совокупность методов и инструментов решения различных сложных прикладных задач, использующих принципы и подходы, которые соответствуют размышляющему над их решением человеку или процессам, протекающим в данном мире, в живой или неживой природе
Гельдиев Б.А. [и др.] [11]	2023	Система, которая способна воспринимать свою среду и принимать меры, чтобы максимизировать шансы на успешное достижение своих целей, а также интерпретировать и анализировать данные таким образом, чтобы они обучались и адаптировались по мере развития
Гиреева Ф.М. Точиева Л.К. [12]	2023	Теория и разработка компьютерных систем, способных выполнять задачи, которые исторически требовали человеческого интеллекта, такие как распознавание речи, принятие решений и идентификация закономерностей
Казахецян Г.О. [13]	2025	Технология, обеспечивающая способность машины решать те задачи, которые в обычных условиях требуют активного применения человеческого разума
Сатлыков К. [14]	2025	Интеллект, демонстрируемый машинами, в частности компьютерными системами
Корбут Н.В. [15]	2026	Система, имитирующая когнитивные функции человека, включая обучение, анализ данных и принятие решений на основе алгоритмов машинного обучения
Официальные документы		
Закон о национальной обороне США на 2019 финансовый год [16]	2019	Любая искусственная система, которая выполняет задачи в изменяющихся и непредсказуемых обстоятельствах без значительного человеческого контроля или которая может учиться на опыте и повышать производительность при воздействии наборов данных
Стратегия развития искусственного интеллекта в Республике Таджикистан на период до 2040 г. [17]	2022	Система или компьютерное оборудование, которые способны имитировать интеллектуальные и аналитические способности человека для выполнения определенных задач
О проведении эксперимента по установлению специального регулирования в целях создания необходимых условий для разработки и внедрения технологий искусственного интеллекта в субъекте Российской Федерации – городе федерального значения Москве и внесении изменений в ст. 6 и 10 Федерального закона «О персональных данных» от 24.04.2020 г. №123-ФЗ [18]	2024	Комплекс технологических решений, позволяющий имитировать когнитивные функции человека (включая поиск решений без заранее заданного алгоритма) и получать при выполнении конкретных задач результаты, сопоставимые с результатами интеллектуальной деятельности человека или превосходящие их. Комплекс технологических решений включает в себя информационно-коммуникационную инфраструктуру, программное обеспечение (в том числе такое, в котором используются методы машинного обучения), процессы и сервисы по обработке данных и поиску решений
Стратегия развития технологий искусственного интеллекта до 2030 г. Узбекистана [19]	2024	Совокупность технологических решений, которые позволяют имитировать знания и навыки человека (включая самостоятельное обучение и поиск решений) и получать результаты, сопоставимые с результатами интеллектуальной деятельности человека при выполнении конкретных задач

Таблица 1. Содержание понятия «искусственный интеллект»

Примечание: разработано автором на основе [7–19]

репозитории открытых данных и государственных приложений. Ее цель – ускорить развитие аналитики и внедрение технологий искусственного интеллекта в структуре ведомства. По сути, это система, которая описывает, как закупать и внедрять программное обеспечение и IT-решения максимально быстро и эффективно. Они должны соответствовать 3 основным критериям:

- *минимизировать время между выявлением проблемы и оценкой потенциальных решений в производстве с реальными пользователями и данными;*
- *предоставлять четкие проверенные решения для масштабирования;*
- *формулировать требования по соответствию приобретаемых разработок самым передовым международным стандартам.*

Анализ национальных стратегий развития ИИ разных стран свидетельствует о том, что они во многом схожи. Рассматривая пространство Европейского союза и СНГ, можно отметить следующее. В июне 2024 г. законодатели ЕС подписали Закон об искусственном интеллекте, устанавливающий общие рамки для использования и поставки систем ИИ [22]. В апреле 2023 г. постановлением Межпарламентской Ассамблеи СНГ от 14.04.2023 г. №55-23 приняты Рекомендации по нормативному регулированию использования искусственного интеллекта, включая этические стандарты для исследований и разработок [23], а весной 2025 г. в Содружестве одобрен проект модельного Закона «О технологиях искусственного интеллекта» (табл. 2) [24].

С нашей точки зрения, наибольший интерес представляют документы Китая и Германии.

Рассматривая страны постсоветского пространства, можно отметить, что в России Национальная стратегия развития искусственного интеллекта принята Указом Президента РФ от 10.10.2019 г. №490 и рассчитана до 2030 г. [30], в Таджикистане в 2022 г. утверждена Стратегия развития искусственного интеллекта до 2040 г. [17], в Казахстане в 2024 г. – Концепция развития искусственного интеллекта на 2024–2029 гг. [31], в Узбекистане – Стратегия развития технологий искусственного интеллекта до 2030 г. [19], а в Азербайджане в 2025 г. – Стратегия «Искусственный интеллект Азербайджанской Республики на 2025–2028 гг.» [32]. Таким образом,

данная сфера стала одним из приоритетных направлений в большинстве государств региона.

В то же время задачи по развитию ИИ в разных странах различны. В одних делается упор на стартапы, в других – на государственно-частное партнерство (табл. 3).

Данные, приведенные в таблице, свидетельствуют о том, что основными задачами национальных стратегий являются создание и расширение цифровой инфраструктуры, поддержка организаций – разработчиков ИИ и формирование этических норм в отношении ИИ. В нашей стране такой документ пока не принят. Так, в Концеп-

ции правовой политики Республики Беларусь отмечается, что в сферах гражданского, экономического (хозяйственного) законодательства предстоит урегулировать вопросы его применения [33]. Декрет Президента «О развитии цифровой экономики» устанавливает резидентам Парка высоких технологий право на осуществление в установленном порядке деятельности в области ИИ [34]. Госпрограмма «Беларусь интеллектуальная» предполагает «полноформатное внедрение цифровых технологий, образующих технологическое ядро интеллектуальной экономики», одним из трех компонентов которого является «программное обеспечение, основанное на системах искусственного интеллекта и предполагающее машинное обучение» [35].

В республике действует 12 стандартов на беспилотные транспортные средства с элементами ИИ, разрабатываются нормативы на системы менеджмента в данной сфере [36]. В ноябре 2025 г. создан технический комитет по стандартизации «Цифровое развитие и связь» (ТК ВУ 41) [37].

В Государственной программе «Цифровая Беларусь» на 2026–2030 гг. отмечается, что у нас выработаны компетенции в области ИИ, в основном в медицине, биотехнологиях и фармакологии. В рамках подпрограммы 1 «Экономика данных» планируется реализовать мероприятия по формированию национальной платформы управления жизненным циклом ИИ-моделей с созданием отечественного программного обеспечения для запуска больших языковых моделей (LLM) без обращения к зарубежным серверам, а также инструментов информационного взаимодействия ГИС с такой платформой; системы сбора, обезличивания, хранения, управления и

Страна	Год	Основные направления
Великобритания [25]	2021	Инвестирование в долгосрочные потребности экосистемы ИИ Обеспечение пользы ИИ для всех секторов и регионов Эффективное управление ИИ
Бразилия [26]	2021	Внесение вклада в разработку этических принципов создания и использования ответственного ИИ Содействие инвестициям, поддерживаемым исследованиями и разработками в области ИИ Устранение барьеров на пути инноваций в области ИИ Подготовка и обучение специалистов для экосистемы ИИ Стимулирование инноваций и развитие бразильского ИИ в международной среде Содействие созданию среды сотрудничества между государственными и частными структурами, промышленностью и исследовательскими центрами для развития ИИ
Чили [27]	2019	Расширение возможности граждан в разработке и применении инструментов ИИ и поощрение их участия в обсуждении их правовых, этических, социальных и экономических последствий Разработка факторов, способствующих становлению ИИ, которые охватывают развитие человеческого капитала, технологической инфраструктуры и доступности данных Содействие использованию и развитию ИИ, охватывающему исследования, разработки, инновации и предпринимательство на основе систем ИИ Обсуждение и достижение консенсуса по вопросам этики, стандартов, кибербезопасности и регулирования между частным и государственным секторами для разработки и использования ИИ, ориентированного на человека
Германия [28]	2018	Глобальное лидерство Социальная польза Этичная интеграция
Китай [29]	2017	Формирование законов, правил и этических норм, связанных с разработкой ИИ Принятие стандарта технологии ИИ и системы интеллектуальной собственности Установление системы регулирования и оценки безопасности ИИ Улучшение подготовки кадров в области ИИ Проведение масштабных мероприятий по популяризации ИИ

Таблица 2. Основные положения отдельных национальных стратегий по развитию искусственного интеллекта

Примечание: разработано автором на основе [25–29]

Страна	Основные задачи
Россия [30]	Повышение доступности инфраструктуры, необходимой для развития технологий искусственного интеллекта Поддержка организаций – разработчиков технологий искусственного интеллекта Поддержка научных исследований и разработок в целях обеспечения опережающего развития искусственного интеллекта Повышение уровня компетенций в области искусственного интеллекта и информированности граждан о данных технологиях Стимулирование внедрения ИИ в отраслях экономики и социальной сферы Обязательное внедрение доверенных технологий искусственного интеллекта в тех областях его использования, в которых может быть нанесен ущерб безопасности Российской Федерации Создание комплексной системы нормативно-правового регулирования общественных отношений, связанных с развитием и использованием ИИ, обеспечение безопасности применения таких технологий Укрепление международного сотрудничества в области использования технологий искусственного интеллекта
Казахстан [31]	Расширение доступа к данным Повышение качества данных Разработка руководящих принципов и регламентов по управлению данными Обогащение озера данных Smart data ukimet и создание тренировочных датасетов Создание суперкомпьютера, центра обработки данных, национальной платформы искусственного интеллекта Подготовка специализированных кадров, прогнозирование потребности в них Обучение и повышение осведомленности о технологиях ИИ среди населения Укрепление цифровых навыков Поддержка талантов и стартапов Финансирование научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок в области искусственного интеллекта Создание большой языковой модели казахского языка (KazLLM) Разработка нормативных правовых актов, регулирующих правоотношения в сфере искусственного интеллекта Этические нормы и недопущение дискриминации Национальная система стандартизации и оценка соответствия Создание отраслевого совета по развитию искусственного интеллекта
Германия [28]	Улучшение доступа к данным (с защитой прав) и расширение цифровой инфраструктуры (оптоволоконно) Интеграция искусственного интеллекта в образование, профессиональную подготовку и привлечение глобальных специалистов в области ИИ Участие в широком общественном диалоге, разработка этических стандартов и адаптация правовых рамок
Узбекистан [19]	Формирование нормативно-правовой базы, направленной на развитие технологий искусственного интеллекта, совершенствование стандартов и укрепление международного сотрудничества в данной сфере Создание технической инфраструктуры для обработки данных и запуска проектов, основанных на искусственном интеллекте, реализация приоритетных проектов в данном направлении в социальной сфере и отраслях экономики Повышение знаний и навыков населения в области применения технологий ИИ, укрепление кадрового потенциала
Азербайджан [32]	Развитие и совершенствование управления искусственным интеллектом Управление информацией и улучшение инфраструктуры Развитие талантов и навыков в области искусственного интеллекта Создание благоприятной деловой среды
Таджикистан [17]	Формирование правовой базы для использования искусственного интеллекта в условиях Республики Таджикистан Определение путей использования искусственного интеллекта в приоритетных сферах страны Подготовка квалифицированных кадров в области ИИ Содействие реализации стратегии посредством государственно-частного, научного и общественного сотрудничества Повышение грамотности использования искусственного интеллекта Повышение качества телекоммуникационных услуг Создание надежных баз данных Обеспечение широкого доступа населения к различным услугам на основе принципов надежности, прозрачности, равноправия и упрощения Стимулирование процессов государственного управления, обслуживания и контроля в регионах Полное внедрение электронного правительства в органах государственного управления Широкое использование искусственного интеллекта в процессе промышленного, сельскохозяйственного производства и в различных инфраструктурах Подготовка нормативных правовых актов и конкретизация понятия искусственного интеллекта в условиях Республики Таджикистан Разработка механизма согласования Стратегии и проектов ИИ с отраслевыми стратегиями и программами развития Создание правовых условий для доступа к информации, собираемой государственными органами Формирование благоприятных условий для компаний, инвестирующих в сферу развития искусственного интеллекта Установление правовых и этических рамок использования ИИ

Таблица 3. Основные задачи ИИ согласно национальным стратегиям развития искусственного интеллекта постсоветских стран

Примечание: разработано автором на основе [17, 19, 28, 30–32]

использования данных для обучения и настройки ИИ-моделей; национального корпуса данных (датасетов) и языковых технологий для обеспечения корректной работы LLM, их адаптации к отраслевым и государственным задачам, в том числе по основанию библиотек типовых агентов [38]. Государственной программой инновационного развития на 2026–2030 гг. также поставлены задачи в этом направлении [39].

Однако, по нашему мнению, законодательные акты носят фрагментарный характер, практически ни в одном программном документе не обозначено использование потенциала МСП в разработке ИИ. В связи с этим представляется целесообразным ускорить подготовку и принятие национальной стратегии, согласовать ее положения с отраслевыми программами, активизировать создание и модернизацию технической инфраструктуры для обработки данных и запуска проектов, основанных на искусственном интеллекте.

Все это принесет несомненную пользу развитию ИИ в Республике Беларусь и будет способствовать выполнению Государственной программы «Цифровая Беларусь» на 2026–2030 гг. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. История развития искусственного интеллекта / Б.Ю. Халлыев, М.И. Джелалова, А.Д. Худайбердыева, Т.Т. Атаджанова // Символ науки. 2024. №5-1-3. С. 127–129.
2. Ефимова С.А. Развитие искусственного интеллекта / С.А. Ефимова // Цифровая наука. 2020. №6. С. 49–58.
3. Глазунова Е.З. Тенденции развития искусственного интеллекта в бизнесе / Е.З. Глазунова, А.В. Черная // Прикладные экономические исследования. 2022. №4. С. 6–10.
4. Алферьев Д.А. Развитие искусственного интеллекта в современной экономике / Д.А. Алферьев, А.Е. Кремин // Human Progress. 2020. Т.6, №1. С. 2.

■ **Summary.** This article examines national strategies for the development of artificial intelligence. The link between artificial intelligence and innovative and digital development, as well as entrepreneurship, is identified. The concept of «artificial intelligence» and the main directions of national strategies for its development are discussed. It is noted that there is no single established definition. It is stated that the need to consider and analyze various strategies for the development of artificial intelligence is related to the need to ensure both socioeconomic and innovative processes, as well as national security. Particular attention is paid to the principles and objectives of the national strategies under consideration in the post-Soviet countries. The article examines the main provisions of the State Program «Digital Belarus» for 2026–2030. The article substantiates the advisability of intensifying the development and adoption of the National Strategy for the Development of Artificial Intelligence and aligning its provisions with industry programs.

■ **Keywords:** artificial intelligence, national strategy, national security, industry programs.

■ <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2026-03-49-54>

5. Сазанова С.Л. Потенциал искусственного интеллекта в предпринимательской деятельности / С.Л. Сазанова, Н.Н. Карманов // Путеводитель предпринимателя. 2024. Т.17, №3. С. 11–18.
6. Шмагин В.С. Обзор и анализ развития искусственного интеллекта / В.С. Шмагин, М.А. Маслова // Научный результат. Информационные технологии. 2020. Т. 5, №4. Р. 3–8.
7. Абдулатипова М.А. Искусственный интеллект / М.А. Абдулатипова, Р.Ш. Камилова // Международный научно-исследовательский журнал. 2013. №5-3 (12). С. 108–108.
8. Литвинов Д.О. Искусственный интеллект / Д.О. Литвинов // Теория и практика современной науки. 2016. №2 (8). С. 264–266.
9. Плотников Д.В. Готовность общества к развитию искусственного интеллекта / Д.В. Плотников, А.В. Вахнин // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2019. Т. 3. С. 714–716.
10. Матюшок В.М. Мировой рынок систем и технологий искусственного интеллекта: становление и тенденции развития / В.М. Матюшок, В.А. Красавина, С.В. Матюшок // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. 2020. Т. 28, №3. С. 505–521.
11. Искусственный интеллект / Б.А. Гельдиев, О.К. Хатджиева, О.Х. Куллыева, С. Байрамова // Символ науки. 2023. №11-1-2. С. 32–33.
12. Гиреева Ф.М. Искусственный интеллект / Ф.М. Гиреева, Л.К. Точиева // Символ науки. 2023. №12-2. С. 38–40.
13. Казахецян Г.О. Перспективы развития искусственного интеллекта в юриспруденции / Г.О. Казахецян // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2025. №2-3. С. 184–187.
14. Сатлыков К. Искусственный интеллект // <https://cyberleninka.ru/article/n/iskusstvennyy-intellekt-6>.
15. Корбут Н.В. Противоправное использование искусственного интеллекта: уголовно-правовая оценка // Universum: экономика и юриспруденция. 2026. Т. 1, №1 (135). С. 58–60.
16. Artificial Intelligence and National Security / Congressional Research Service // <https://sgp.fas.org/crs/natsec/R45178.pdf>.
17. Стратегия развития искусственного интеллекта в Республике Таджикистан на период до 2040 г. // http://www.portali-huquqi.tj/publicadliya/view_qonunhoview.php?showdetail=&asosi_id=26592.
18. О проведении эксперимента по установлению специального регулирования в целях создания необходимых условий для разработки и внедрения технологий искусственного интеллекта в субъекте Российской Федерации – городе федерального значения Москве и внесении изменений в ст. 6 и 10 Федерального закона «О персональных данных» от 24.04.2020 г. №123-ФЗ (последняя редакция) // https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_351127/.
19. Об утверждении стратегии развития технологий искусственного интеллекта до 2030 года / Государственное учреждение «Национальный правовой информационный центр «Адолат» при Министерстве юстиции Республики Узбекистан» // <https://lex.uz/ru/docs/7158606>.
20. Sander A. BCG Perspectives: The Rise of Robotics / A. Sander, W. Meldon // https://www.bcgperspectives.com/content/articles/business_unit_strategy_innovation_rise_of_robotics/.
21. Анализ размера и доли рынка военных роботов – тенденции роста и прогнозы (2025–2030) / Mordor Intelligence // <https://www.mordor-intelligence.com/ru/industry-reports/military-robot-market>.
22. Artificial intelligence act / European Parliament // [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI\(2021\)698792](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2021)698792).
23. Этические нормы, внедрение в экономику, безопасность: парламентарии СНГ одобрили закон об ИИ // <https://pravo.by/novosti/obshchestvenno-politicheskie-i-v-oblasti-prava/2025/mart/87837>.
24. В сфере науки и образования / Межпарламентская Ассамблея государств – участников Содружества Независимых Государств // https://iacis.ru/deyatelnost/modelnoe_zakonotvorchestvo/ppmz_v_sng_na_20232025_gg/VII_v_sfere_nauki_i_obrazovaniya.
25. National AI Strategy / Office for Artificial Intelligence // https://assets.publishing.service.gov.uk/media/614db4d1e90e077a2cbdf3c4/National_AI_Strategy_-_PDF_version.pdf.
26. Estratégia Brasileira de Inteligência Artificial / Serviços e Informações do Brasil // https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/transformacaodigital/arquivos/inteligenciaartificial/ebia-documento_referencia_4-979_2021.pdf.
27. Política nacional de inteligencia artificial / MinisterioDeCiencia // https://www.minciencia.gob.cl/uploads/filer_public/bc/38/bc389daf-4514-4306-867c-760ae7686e2c/documento_politica_ia_digital_.pdf (date of access: 09.03.2025).
28. Federal Government's Artificial Intelligence Strategy // https://www.bmfr.bund.de/EN/Research/EmergingTechnologies/ArtificialIntelligence/artificialintelligence_node.html.
29. Next Generation Artificial Intelligence Development Plan // <http://fi.china-embassy.gov.cn/eng/kxjs/201710/P020210628714286134479.pdf>.
30. О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации: Указ Президента РФ от 10.10.2019 г. № 490: в ред. Указа Президента РФ от 15.02.2024 г. №124 // <http://www.kremlin.ru/acts/bank/44731>.
31. Об утверждении Концепции развития искусственного интеллекта на 2024– 2029 гг.: постановление Правительства Республики Казахстан от 24.07.2024 г. №592 // <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2400000592>.
32. Стратегия «Искусственный интеллект Азербайджанской Республики на 2025–2028 гг.» // https://www.trend.az/media/2025/03/19/suni_intellekt.pdf?ts=1742375760.
33. О Концепции правовой политики Республики Беларусь: Указ Президента Республики Беларусь от 28.06.2023 г. №196 / Национальный правовой интернет-портал Республики Беларусь // <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=P32300196>.
34. О развитии цифровой экономики: Декрет Президента Республики Беларусь от 21.12.2017 г. №8: в ред. от 18.03.2021 г. №1 // Пресс-служба Президента Республики Беларусь // <https://president.gov.by/ru/documents/dekret-8-ot-21-dekabrya-2017-g-17716>.
35. Стратегия «Наука и технологии: 2018–2040»: постановление Президиума Национальной академии наук Беларуси от 26.02.2018 г. №17 / Национальная академия наук Беларуси // https://nasb.gov.by/congress2/strategy_2018-2040.pdf.
36. Стандартизация искусственного интеллекта / Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь // <https://gosstandart.gov.by/standartizatsiya-iskusstvennogo-intellekta>.
37. Стандартизация искусственного интеллекта / Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь // <https://www.gosstandart.gov.by/v-belarusi-sozdan-novyy-tehnicheskii-komitet-po-standartizatsii-tk-by-41>.
38. О Государственной программе «Цифровая Беларусь» на 2026–2030 гг.: постановление Совета Министров Республики Беларусь от 30.12.2025 г. №793 // Нац. реестр правовых актов Республики Беларусь. – Минск, 2026.
39. О Государственной программе инновационного развития Республики Беларусь на 2026–2030 гг.: постановление Совета Министров Республики Беларусь от 21.12.2025 г. №448 // Нац. реестр правовых актов Республики Беларусь. – Минск, 2026.

Статья поступила в редакцию
12.10.2025 г.

Трансфер технологий и «зеленые» промышленно-логистические партнерства в рамках инициативы «Пояс и путь»

УДК 330.341.1 : 502.131.1 (510+746)



Цюй Цзиньтун,
соискатель Института
экономики Национальной
академии наук Беларуси,
генеральный директор
Китайско-белорусского
инновационного
центра промышленных
технологий;
qujintong@gmail.com

Аннотация. В статье рассматриваются особенности формирования «зеленых» промышленно-логистических партнерств на примере Китайско-Белорусского индустриального парка «Великий камень». Особое внимание уделено экологической концепции его развития, предполагающей строгие природоохранные ограничения и интеграцию принципов циркулярной экономики, а также институциональным гарантиям и технологическому партнерству. Проанализирована деятельность Китайско-Белорусского инновационного центра промышленных технологий (КБИЦ) как платформы трансфера знаний, инкубации инноваций и углубления двустороннего научно-технического сотрудничества. Подчеркивается необходимость адаптации китайских подходов к национальным условиям Беларуси для повышения эффективности внедрения научных разработок в практику.

Ключевые слова: трансфер технологий, «зеленая» экономика, промышленно-логистические партнерства, инициатива «Пояс и путь», Китай, Беларусь, индустриальный парк «Великий камень», инновационный центр.

Для цитирования: Цюй Цзиньтун. Трансфер технологий и «зеленые» промышленно-логистические партнерства в рамках инициативы «Пояс и путь» // Наука и инновации. 2026. №3. С. 55–58.

<https://doi.org/10.29235/1818-9857-2026-03-55-58>

Инициатива «Пояс и путь», предложенная в КНР в 2013 г., трансформировала глобальную архитектуру экономического взаимодействия, создав условия для углубления сотрудничества в промышленной, транспортной и экологической сферах. Одним из наиболее значимых проектов, демонстрирующих интеграцию индустриального и «зеленого» направлений, стал Китайско-Белорусский индустриальный парк «Великий камень» – уникальный образец стратегического партнерства, интегрирующий производственно-логистические функции, инновационные механизмы и экологические стандарты устойчивого роста. Экологический и инновационно-технологический векторы развития парка проявляются в строгих природоохранных

ограничениях: более 40% территории отведено под зеленые зоны, обязательна экологическая экспертиза проектов; внедрены системы энергоэффективного строительства, современные очистные сооружения и комплексный мониторинг качества воздуха, воды и почв. Это позволяет минимизировать антропогенное воздействие и интегрировать парк в уникальный природный ландшафт, включающий заказники «Волмянский» и «Маяк», а также Петровичское водохранилище. Предпринятые меры формируют основу для трансформации парка в экопромышленный кластер нового поколения, функционирующий на принципах циркулярной экономики. При этом Концепция индустриального парка «Великий камень» предполагает комплексное

развитие территории с созданием нового современного международного экогорода. В рамках данного подхода планируется организация интегрированной производственной, административной, транспортной, социальной и образовательной инфраструктуры с широким применением «умных» технологий для управления городским хозяйством, решений «зеленой» энергетики, систем утилизации и повторного использования ресурсов. Таким образом, парк выступает не только индустриально-логистическим узлом, но и модельной площадкой для «зеленого» роста, где природоохранные технологии интегрированы в долгосрочную стратегию.

Инновационно-технологический вектор. Одним из ключевых направлений деятельности

«Великого камня» стало инициированное Гуандунской академией наук Китая и Национальной академией наук Беларуси образование технологической инкубационной платформы. Она воплотила модель устойчивого развития, основанную на последовательной цепочке «идентификация технологий – исследование рынка – трансфер технологий – инкубация». Такой формат обеспечивает трансформацию научно-технических достижений в практические разработки и формирует институционально закреплённую экосистему инновационного взаимодействия. Модель, предложенная Академией наук провинции Гуандун Китая и реализованная в условиях индустриального парка, будет выступать ориентиром для расширения научно-технического сотрудничества как между Китаем и Беларусью, так и для других стран в рамках инициативы «Пояс и путь» [1], содействовать раскрытию потенциала парка как платформы для масштабирования передовых технологий и институциональных инноваций в международном формате.

18-й съезд КПК (2012 г.) обозначил стратегию инновационного пути с китайской спецификой, закрепив курс на ускоренное масштабирование научно-технических достижений. В последующее десятилетие были реализованы законодательные и институциональные реформы, направленные на стимулирование научных работ, инкубацию технологий и их интеграцию в промышленное производство.

Особое место в этой системе заняло создание научно-исследовательских институтов нового типа, ориентированных на трансформацию знаний в прикладные разработки. Учреждение в 2015 г. Академии наук провинции Гуандун стало результатом

масштабной институциональной реформы, нацеленной на консолидацию научных структур и выстраивание новой инновационной парадигмы. Объединив ряд ранее разрозненных учреждений прикладного и фундаментального профиля (включая Научно-исследовательский институт промышленных технологий, аналитический центр и испытательные лаборатории), академия провинции сосредоточила усилия на формировании интегрированной экосистемы трансфера технологий и инкубации инноваций [2].

Стратегическая модель развития обозначена формулой «Одно ядро – Один пояс – Один регион» и имеет четкую пространственную и функциональную направленность.

«Одно ядро» – дельта Жемчужной реки (Гуанчжоу, Шэньчжэнь и др.), где концентрируются высокотехнологичные кластеры и формируется международный научно-технический хаб. Здесь инновации тесно связаны с промышленным производством и обеспечивают глобальную конкурентоспособность региона.

«Один пояс» – прибрежная зона, ориентированная на логистику, транспорт и сопряжение с транснациональными коридорами. Он выполняет роль инфраструктурного каркаса для экспорта технологий и ускоренной интеграции в мировые цепочки стоимости.

«Один регион» – северная зона, где технологическая модернизация дополняется задачами охраны окружающей среды и производства «зеленой» продукции, формируя баланс между индустриальным ростом и устойчивым развитием.

Ключевая особенность модели заключается в глубокой институциональной интеграции науки, промышленности и финансовых инструментов. Исследовательские

институты нового типа действуют в корпоративной форме, управляются командами профессиональных технологических менеджеров и активно используют венчурное финансирование. Это обеспечивает гибкость и рыночную ориентацию, что выгодно отличает их от традиционных государственных НИИ.

Для Беларуси опыт Гуандуна имеет двойное методологическое значение. Во-первых, модель пространственно-функционального развития была частично адаптирована при создании Китайско-Белорусского инновационного центра промышленных технологий в индустриальном парке «Великий камень», выступающего связующим звеном между наукой и бизнесом и реализующего трехзвенную модель: идентификация технологий и исследование рынка → трансфер технологий → инкубация и коммерциализация.

Во-вторых, интеграция экологического региона в деятельность структуры подчеркивает, что в Китае инновации рассматриваются не только как драйвер роста, но и как фактор экологической устойчивости. Это напрямую соотносится с концепцией «Великого камня» как гринпарка и открывает возможности для внедрения модели циркулярной экономики на базе индустриального кластера.

Однако этому препятствует ряд ограничений:

- **асимметрия ресурсов и кадров:** в то время как Гуандун располагает мощными финансовыми и институциональными возможностями, Беларусь остается более зависимой от внешнего трансфера технологий;
- **недостаточно выражена локализация белорусских предприятий в проектах КБИЦ,** что снижает

мультипликативный эффект для национальной экономики;

- **сохранение рисков институциональной несбалансированности**, поскольку инновационная система республики менее гибка и менее связана с венчурным капиталом, чем китайская.

Таким образом, модель Гуан-дуна представляет собой универсальный эталон экосистемы технологической инкубации, в котором сочетаются элементы индустриальной политики, финансовых механизмов и экологической стратегии. Для Беларуси этот опыт открывает возможности для укрепления статуса индустриального парка «Великий камень» как международного узла трансфера технологий и «зеленых» инноваций. Однако для достижения дол-

госрочного эффекта требуется адаптация китайских подходов к национальным условиям, усиление локальных НИОКР и расширение участия белорусских предприятий в совместных проектах.

Созданный в 2020 г. КБИЦ – 65-й резидент парка «Великий камень», основными направлениями деятельности которого являются: согласование технологического спроса и предложения между двумя странами; организация визитов и научных обменов; сопровождение инкубации и коммерциализации научных достижений; разработка совместных прикладных проектов; развитие торговли научно-технической продукцией; совместная подготовка инновационных кадров в области технологий [3]. Центр становится платформой, устраняющей

барьеры в трансграничном трансфере технологий и демонстрирующей возможности экосистемы научно-технической инкубации в рамках инициативы «Пояс и путь», выступает не только как канал трансфера китайского опыта, но и как самостоятельный драйвер «зеленого» сотрудничества.

На основе проведенного SWOT-анализа установлен вклад КБИЦ в развитие «Великого камня» (инновационность, технологический трансфер, научная кооперация, кадровый и образовательный потенциал), а также выявлены слабые стороны деятельности, связанные главным образом с асимметрией участия (доминированием китайской стороны в инвестициях и технологиях, недостаточной загрузкой центра проектами белорусской стороны и ограниченной коммерциализацией национальных НИОКР). Перспективными направлениями роста представляются расширение экспортных и инновационных ниш, участие в международных экологических альянсах и формирование циркулярных производственных цепочек. Основные угрозы носят геополитический институциональный характер: санкции, конкуренция с другими парками и технологическая зависимость (таблица).

Таким образом, трансфер технологий и формирование «зеленых» промышленно-логистических партнерств в рамках инициативы «Пояс и путь» представляют собой взаимосвязанные направления, определяющие стратегическую значимость парка «Великий камень». С одной стороны, деятельность Китайско-Белорусского инновационного центра промышленных технологий обеспечивает институционализированный механизм передачи знаний и технологий по схеме «идентификация –

Сильные стороны	Слабые стороны
Выгодное географическое положение в коридоре «Китай – ЕС» Институциональные гарантии (межгосударственные соглашения, налоговые и таможенные льготы) Экологическая концепция развития: 40% территории – «зеленые» зоны, обязательная экологическая экспертиза Современная мультимодальная логистическая инфраструктура (аэропорт, автомагистраль М1, ж/д) Создание Китайско-Белорусского инновационного центра промышленных технологий как платформы трансфера и инкубации технологий Доступ к квалифицированной рабочей силе и научным кадрам Беларуси	Зависимость от ограниченного числа крупных инвесторов Недостаточная интеграция с национальными промышленными кластерами Беларуси Ограниченные внутренние НИОКР в области «зеленых» технологий, высокая зависимость от внешнего трансфера Недостаток полноценных систем публичной экологической отчетности (не все показатели CO₂, энергоэффективности и переработки публикуются) Недостаточная загрузка КБИЦ проектами на белорусской стороне, риски асимметрии в распределении ресурсов и кадров Ограниченная вовлеченность белорусских малых и средних предприятий в инновационные проекты центра
Возможности	Угрозы
Рост глобального спроса на «зеленые» технологии и продукцию с низким углеродным следом Расширение деятельности КБИЦ: новые совместные лаборатории, стартапы и проекты в области «зеленой» энергетики, экотехнологий и биотеха Привлечение «зеленого» финансирования (АИП, китайские банки, BRIGC) и создание совместных фондов поддержки инноваций Формирование экосистемы «Великий камень» как узлового центра трансфера технологий в регионе Восточной Европы Использование КБИЦ как демонстрационной площадки для двусторонней научно-технической дипломатии в рамках инициативы «Пояс и путь»	Геополитические риски, санкционные ограничения и возможное снижение притока иностранных инвестиций Усиление международной конкуренции со стороны других индустриальных парков инициативы BRI Риски ослабления экологических требований в условиях экономического давления Технологическая зависимость от внешних партнеров, уязвимость к ограничениям на доступ к оборудованию и ПО Недостаточная институционализация статуса КБИЦ может ограничить его долгосрочную устойчивость в условиях внешних вызовов

Таблица. Результаты SWOT-анализа развития индустриального парка «Великий камень» и деятельности Китайско-Белорусского инновационного центра

трансфер – инкубация», создавая условия для появления совместных разработок в области биотехнологий, «зеленой» энергетики, экологически чистых материалов и цифровой логистики. С другой стороны, экологическая концепция парка, включающая природоохранные ограничения, энергосберегающие технологии и современные мультимодальные транспортные узлы, позволяет образовывать низкоуглеродные производственно-логистические цепочки, интегрированные в региональные и глобальные рынки.

Ключевая особенность модели «Великого камня» заключается в том, что трансфер технологий и «зеленые» логистические решения выступают не изолированными друг от друга, а взаимно усиливающими элементами инновационной экосистемы [4, 5]. Инновационные разработки, инкубируемые в рамках КБИЦ, получают практическое воплощение в «зеленых» цепочках поставок, а экологические стандарты стимулируют спрос на новые технологии. Такая интеграция придает проекту характер реперной точки инициативы «Пояс и путь», где промышленное, научно-техническое и экологическое измерения соединяются в единую стратегию устойчивого роста.

С целью повышения вклада белорусской науки в трансфер технологий, по нашему мнению, необходимо:

- **усиление локализации НИОКР:** расширение участия национальных исследовательских институтов и университетов в проектах КБИЦ;
- **углубление реформ НИИ:** совершенствование механизмов трансфера технологий, организация целостной системы стимулирования

■ **Summary.** The article examines the development of green industrial and logistics partnerships within the Belt and Road Initiative, using the China-Belarus Industrial Park «Great Stone» as a case study. Special emphasis is placed on the park's eco-logical concept, which includes strict environmental restrictions and the integration of circular economy principles. The paper analyzes the role of the China-Belarus Industrial Technology Innovation Center as a platform for knowledge transfer, in-novation incubation, and the deepening of bilateral scientific and technological cooperation. Based on a SWOT analysis, the study identifies institutional guarantees, ecological orientation, and technological collaboration as the key factors of the park's sustainable development. The article highlights the importance of adapting Chinese approaches to Belarusian conditions to enhance the effectiveness of technology transfer and the development of green production and logistics chains.

■ **Keywords:** technology transfer, green economy, industrial and logistics partnerships, Belt and Road Initiative, China, Belarus, Great Stone Industrial Park, innovation center.

■ <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2026-03-55-58>

деятельности ученых, ускорение практического внедрения научных результатов;

- **развитие сектора МСП:** включение малых и средних предприятий в инновационные цепочки парка, что позволит образовать более устойчивую и диверсифицированную экосистему;
- **создание совместного фонда зеленых инвестиций:** формирование белорусско-китайского механизма финансирования проектов в области возобновляемой энергетики, циркулярной экономики и цифровой логистики;
- **институционализация экологических стандартов:** закрепление на национальном уровне требований по экологической отчетности и мониторингу резидентов индустриального парка, что повысит его международную репутацию;
- **укрепление дипломатического измерения:** использование «Великого камня» как площадки для продвижения Беларуси в международных экологических альянсах и сетях «зеленой» дипломатии в рамках инициативы «Пояс и путь».

В перспективе успешная адаптация китайских подходов к нацио-

нальным условиям республики и реализация указанных шагов способны превратить «Великий камень» в модельный экопромышленный кластер Евразии. Он может выступить как демонстрационная площадка для трансграничного сотрудничества в сфере «зеленых» технологий и устойчивой логистики, формируя новый стандарт международных индустриальных парков XXI в. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Платформа для передовых проектов. Зачем Беларусь и Китай создали инновационный центр промышленных технологий // <https://belta.by/society/view/platforma-dlja-peredovyh-proektov-zachem-belarus-i-kitaj-sozdali-innovatsionnyj-tsentr-promyshlennyh-720360-2025/>.
2. 伴随着1978年改革开放的春风, 广东省科学院诞生。// 单位简介 // URL: <https://www.gdas.gd.cn/>.
3. Авсюк А.А. Концептуальные основы формирования модели экопромышленного парка на базе Китайско-Белорусского индустриального парка «Великий камень» / А.А. Авсюк // Институт экономики НАН Беларуси. – Минск, 2025.
4. Китайско-Белорусский инновационный центр промышленных технологий стал резидентом «Великого камня» // <https://industrialpark.by/novosti/2020/kitajsko-belorusskij-innovatsionnyj-tsentr-promyshlennyh-tehnologij-stal-rezidentom-velikogo-kamnya/>.
5. Гао Юань. Теоретические основы развития Китайско-Белорусского индустриального парка «Великий камень» как центра инновационного, регионального роста и международной конкурентоспособности / Гао Юань // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сэрыя гуманітарных навук. 2021. Т. 66, №4. С. 498–507. Doi.org/10.29235/2524-2369-2021-66-4-498-507.

Статья поступила в редакцию
01.10.2025 г.



Анатолий Зинченко,
заведующий отраслевой
лабораторией молекулярных
био- и нанотехнологий
Института микробиологии НАН
Беларуси, член-корреспондент



Александр Шепшелев,
директор Института
микробиологии
НАН Беларуси,
кандидат технических
наук, доцент



Елена Болотник,
заместитель директора по
научной и инновационной
работе Института
микробиологии НАН Беларуси,
кандидат биологических наук

Молекулярные био- и нанотехнологии *на службе человека*

Новый проект журнала «Наука и инновации» – «Точка конвергенции» – ориентирован на системное освещение деятельности отраслевых лабораторий, созданных в наукоемких и высокотехнологичных секторах экономики для ускоренного выхода инновационной продукции на рынок. По состоянию на 01.07.2025 г. в Республике Беларусь зарегистрировано 96 отраслевых лабораторий, из которых в системе Министерства образования – 33, НАН Беларуси – 23, Минпрома – 20, Минздрава – 6, Минсельхозпрода – 4, Минстройархитектуры – 3, Минсвязи и Минтранса по 2, Минприроды, Госстандарта и концерна «Беллегпром» по 1. Такая институциональная представленность подчеркивает масштабность работ и многогранный характер исследований, где отраслевые лаборатории выступают связующим звеном между фундаментальной и прикладной наукой и реальным сектором экономики и ориентированы на практический результат.

В число приоритетных направлений научной и научно-технической деятельности Института микробиологии НАН Беларуси входят селекция и генно-инженерное конструирование штаммов – продуцентов практически ценных соединений, создание микробных биотехнологий для медицины, промышленности и сельского хозяйства. Практическое внедрение разработок способствует решению проблем импортозамещения и вносит весомый вклад в инновационное развитие страны, обеспечение технологического суверенитета. Для трансфера достижений в области молекулярной биологии в практику и повышения эффективности работ в 2023 г. в институте образована отраслевая лаборатория молекулярных био- и нанотехнологий. Здесь ученые изучают возможности замены химических и физических процессов при получении разнообразных полезных продуктов на биологические, а именно:

- с использованием генно-инженерной техники конструируют рекомбинантные микроорганизмы – суперпродуценты белковых продуктов (ферментов и антигенов) различного назначения;
- разрабатывают ферментативные технологии фармацевтически перспективных нуклеозидов и нуклеотидов, иммуностимуляторов различной химической природы, кандидатных мРНК-вакцин.

Еще в 1989 г. тогдашняя лаборатория компонентов нуклеиновых кислот впервые в мире приступила к системному изучению субстратной специфичности ферментов нуклеинового обмена микроорганизмов в отношении широкого спектра природных и модифицированных соединений нуклеиновой природы – нуклеозидов, нуклеотидов и азотистых оснований.

На основе установленных закономерностей трансформации нуклеиновых кислот и их компонентов ферментами микроорганизмов разработана схема комплексной химико-ферментативной переработки ДНК и РНК в ряд ценных биологически активных соединений (рис. 1).

Наиболее важные результаты работы

Направления исследований лаборатории связаны с нарастающей потребностью в получении новых и совершенствовании существующих технологий синтеза противоопухолевых и противовирусных модифицированных нуклеозидов, соединение элементов которых химическими способами затруднено или невозможно. Так, совместно с сотрудниками лаборатории химии нуклеотидов и полинуклеотидов Института биоорганической химии НАН Беларуси разработан оригинальный химико-ферментативный подход к выработке модифицированных нуклеозидов и нуклеотидов из упомянутой категории. В 2004 г. цикл работ по химико-энзиматической модификации компонентов нуклеиновых кислот и созданию химико-энзиматических технологий получения противовирусных и противоопухолевых лекарственных средств, выполненный сотрудниками Института микробиологии НАН Беларуси совместно с ИБОХ НАН Беларуси и УП «Белмедпрепараты», удостоен Государственной премии Республики Беларусь в области науки и техники.

Со временем эта работа привела к организации на базе НПП «ХимФармСинтез» ИБОХ НАН Беларуси химико-ферментативного производства отечественных лекарственных препаратов «Лейкладин» и «Флударабел» для лечения лейкозов и препарата «Лейковир» для терапии рассеянного склероза.

Выполнена работа, вошедшая в топ-10 результатов деятельности ученых НАН Беларуси в области фундаментальных и прикладных исследований за 2020 г., по созданию рекомбинантных штаммов бактерий – продуцентов человеческого белка аннексина А5 в единстве с аденозин-деградирующими ферментами. Белок аннексин А5 обладает повышенным сродством к фосфатидилсерину (фосфолипиду, выстилающему поверхность раковых клеток), что делает его перспективным для использования в качестве таргетного транспортера.

Как известно, большинство раковых опухолей характеризуются повышенной выработкой аденозина, который угнетает противоопухолевый иммунитет человека. Пуридиннуклеозидфосфорилаза (ПНФаза) катализирует реакцию расщепления аденозина



Рис. 1. Схема комплексной трансформации нуклеиновых кислот ферментами микроорганизмов

до аденина, при этом микроокружение опухоли освобождается от аденозиновой блокады, что приводит к активизации противоопухолевого иммунитета самого онкологического больного. В результате адресной доставки белок связывается с молекулярной мишенью – фосфатидилсерином раковых клеток, не затрагивая здоровые клетки хозяина. Соединение аннексина А5 и ПНФазы в единой молекуле (рис. 2) претендует на звание действующего вещества нового класса противоопухолевых препаратов, стимулирующих собственный иммунитет пациента. Потенциально оно может использоваться в пролекарственной терапии онкологических заболеваний. Для получения человеческого аннексина А5, слитого с пуриннуклеозидфосфорилазой *E. coli*, с использованием методов генной инженерии создан особый рекомбинантный штамм-продуцент.

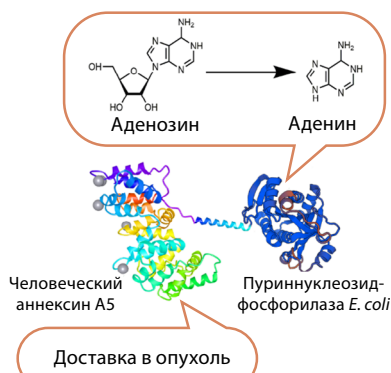


Рис. 2. Предполагаемый химизм действия противоопухолевого химерного белка «Аннексин-ПНФаза»

В экспериментах, проведенных совместно с сотрудниками Института радиобиологии НАН Беларуси, показано, что при введении мышам – опухоленосителям асцитной карциномы Эрлиха препарата «Аннексин-ПНФаза» показатель торможения солидной опухоли составил около 50%.

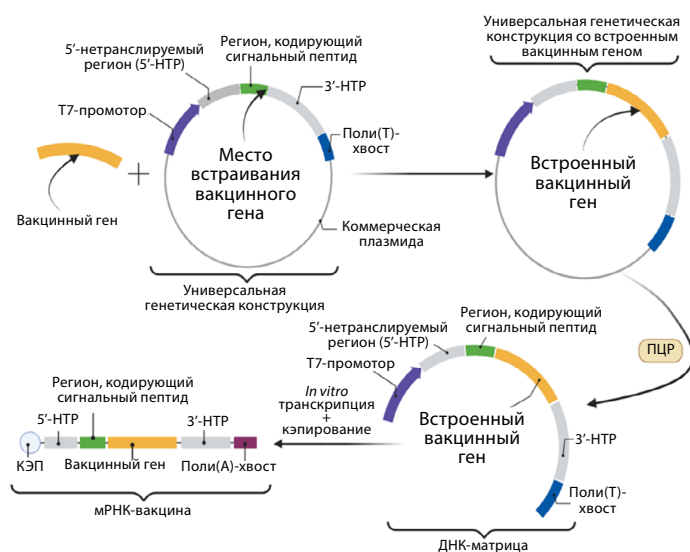


Рис. 3. Схема получения экспериментального образца кандидатной мРНК-вакцины против коронавируса SARS-CoV-2

В рамках подпрограммы «Микробные биотехнологии-2» ГПНИ «Биотехнологии-2» на 2021–2025 гг. разработан наноразмерный прототип мРНК-вакцины против омикронного штамма SARS-CoV-2. Для этого был сконструирован и запатентован рекомбинантный штамм бактерии *Escherichia coli* – носитель универсальной генетической конфигурации, кодирующий основные структурные элементы, необходимые для осуществления процесса трансляции мРНК в клетках человека и животных. Также создан штамм *E. coli* – носитель универсальной генетической конструкции со встроенным геном, кодирующим иммуногенный (RBD) участок S-белка штамма омикрон. С использованием этого ДНК-вектора в качестве матрицы *in vitro* был получен РНК-транскрипт, содержащий RBD-участок S-белка штамма и все структурно-функциональные составляющие, необходимые для трансляции мРНК в животных клетках (рис. 3).

Впервые полученная мРНК была присоединена к наночастицам природного полимера хитозана и продемонстрировано ее пролонгированное высвобождение из комплекса в окружающую среду.

Глобальное распространение ожирения и сахарного диабета в последние несколько десятков лет привело к повышенному интересу исследователей по всему миру и к разработке безопасных и низкокалорийных натуральных подсластителей с приятными вкусовыми свойствами. Среди таких продуктов значительное внимание привлекают белки со сладким вкусом. Сотрудниками лаборатории в рамках подпрограммы «Микробные биотехнологии» ГПНИ «Биотехнологии» на 2016–2020 гг. разработана и запатентована технология бесклеточного синтеза браззеина – чрезвычайно сладкого растительного белка – для использования в качестве сахарозаменителя нового поколения.

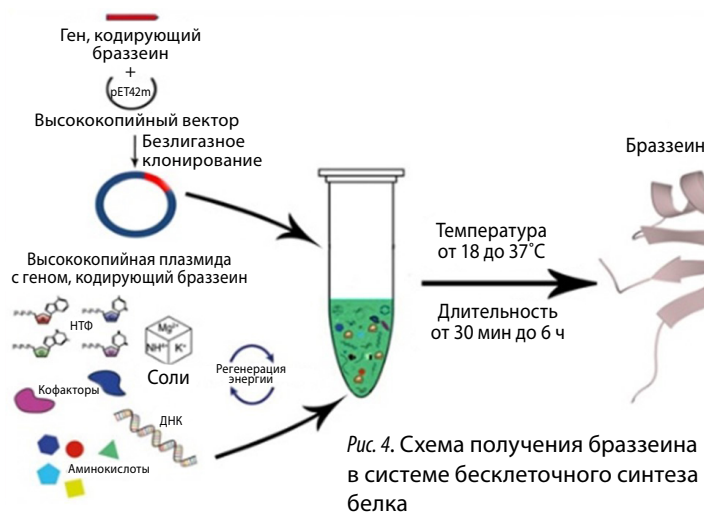
Белок браззеин состоит из 54 аминокислот, присутствует в плодах некоторых африканских деревьев и имеет длинную историю потребления в пищу приматами. В отличие от других подсластителей и сахарозаменителей, этот белок абсолютно безвреден, имеет практически нулевую калорийность и по своим вкусовым качествам максимально приближен к обычному свекловичному сахару, но слаще его в тысячи раз. В лаборатории впервые в мире браззеин получен инновационным способом – путем бесклеточного биосинтеза с использованием экспрессии мутантного гена браззеина (рис. 4). Согласно разработанной технологии, волуметрический выход целевого продукта за 7-часовой процесс достигает 2,0 мг/мл реакционной смеси, что значительно превышает такой показатель у процессов-аналогов.

Кроме сладкого вкуса, превышающего сладость обычной сахарозы в 20 тыс. раз, браззеин обладает антиоксидантной, противовоспалительной и антиаллергической активностями и поэтому может быть задействован не только в качестве сахарозаменителя нового поколения, но и для производства фармакологических средств.

Выполнена НИР по созданию высокоактивного генно-инженерного штамма для получения вакцин нового поколения с потенциально усиленной иммуногенностью, вошедшая в топ-10 результатов деятельности ученых НАН Беларуси в области фундаментальных и прикладных исследований за 2022 г.

В частности, с использованием генно-инженерной техники разработан штамм бактерий – суперпродуцент фермента диаденилатциклазы с активностью, превышающей таковую у известных аналогов. С помощью этого фермента синтезирован в 1 стадию труднодоступный усилитель вакцин последнего поколения – циклический динуклеотид цикло-диАМФ, обычно получаемый путем многостадийного химического синтеза.

Неожиданной особенностью созданного штамма оказалась его способность синтезировать каталитически активный фермент не в свободном виде, а в форме водонерастворимых так называемых телец включения. Такие тельца легко выделяются из клеточного лизата простым центрифугированием, но самое главное – такую, по сути дела, иммобилизованную форму фермента можно использовать многократно. В целом, это открывает возможность для кардинального усиления иммуногенности разрабатываемых интраназальных мРНК-вакцин против SARS-CoV-2 и других респираторных вирусов человека и животных.



Актуальные проекты сегодняшнего дня

Лаборатория в рамках Программы отдельных проектов НАН Беларуси завершает двухлетнюю разработку опытно-промышленной технологии получения модифицированного нуклеозида – 6-тио-2'-дезоксигуанозина (6ТДГ).

По литературным данным, он обладает необычным механизмом противоопухолевого действия, не похожим на все известные, проявляемые модифицированными нуклеозидами. Этот нуклеозид-антиметаболит под видом обычного 2'-дезоксигуанозина способен включаться в так называемые теломерные (находящиеся на концах хромосом) участки только опухолевых клеток. Структура теломер при этом настолько изменяется, что это «вынуждает» клетку совершить генетически запрограммированное самоубийство – апоптоз.

Указанная особенность 6ТДГ прогнозирует возможность его использования в качестве уникального противоопухолевого лекарственного средства, обладающего исключительно высокой избирательностью по отношению к раковым клеткам и низкой токсичностью для нормальных тканей.

Следует отметить, что в 2016 г. сотрудники лаборатории впервые синтезировали новый нуклеозид из тимидина (dThd) и 6-тиогуанина (6ТГ) с помощью двух самостоятельно получаемых рекомбинантных ферментов – тимидинфосфорилазы (ТФазы) и пуриннуклеозидфосфорилазы (ПНФазы).

В рамках международного проекта, финансируемого БРФФИ, – «Ферментативное получение новых фосфолипидных производных противовирусных нуклеозидов и сравнительная оценка их биологической активности» – осуществляется поиск новых эффективных противовирусных соединений. В ходе выполнения этих исследований впервые с помощью ранее разработанного препарата бактериальной фосфолипазы D *Streptomyces netropsis* синтезированы и переданы на доклинические испытания турецким соисполнителям новые фосфолипидные производные известных противовирусных модифицированных нуклеозидов – ламивудина, телбивудина и энтекавира. Также с помощью бактериальной фосфолипазы D синтезирован новый липидный дигексаноилфосфатидильный аналог противоопухолевого нуклеозида 6ТДГ (рис. 5). Доклинические испытания, проведенные зарубежными партнерами

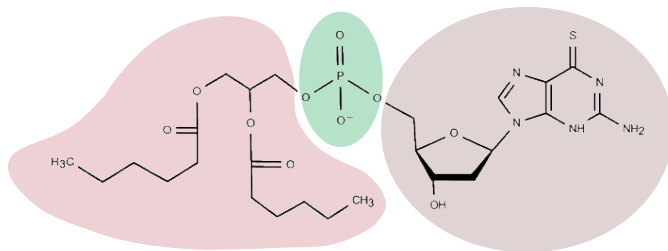


Рис. 5. Структура молекулы нового фосфатидильного аналога 6ТДГ

на линии клеток колоректального рака человека (HT29), позволили охарактеризовать новый аналог как многообещающее пролекарство с двойным эффектом, выражающимся, с одной стороны, в избирательном уничтожении раковых клеток, а с другой – в активации хозяйского противоракового иммунитета.

В рамках подпрограммы «Микробные биотехнологии-2» ГПНИ «Биотехнологии-2» на 2021–2025 гг. завершена работа по конструированию и изучению первого в Республике Беларусь штамма бактерий *Escherichia coli*, продуцирующего фосфолипазу A1 *Serratia marcescens* – фермента, имеющего перспективу применения в пищевой промышленности при ректификации растительных масел и производстве сыра.

Уже доказано, что ферментативная очистка (дегуммирование) растительных масел, проводимая с участием фосфолипаз, имеет ряд преимуществ в сравнении с традиционными процессами. Обработка сырого масла ферментами намного экологичнее, проводится в мягких условиях, требует гораздо меньшего объема воды и кислот, а также снижает количество отходов. Ферментативное дегуммирование также позволяет добиться более высокой степени очистки масла. Кроме того, ферменты могут использоваться повторно, что повышает выход продукта и снижает эксплуатационные затраты. Поэтому включение в процесс фосфолипаз в масличной промышленности представляется привлекательной альтернативой традиционной методике.

Участие в решении глобальных проблем

Лаборатория определяет для себя ряд стратегических задач, направленных на решение глобальных проблем, включая борьбу с онкологическими и инфекционными заболеваниями, минимизацию загрязнения окружающей среды, преодоление дефицита белка, а также антибиотикостойкости патогенов.

С учетом имеющихся данных клинических испытаний и мирового опыта борьбы с онкологическими недугами наиболее эффективным на сегодняшний день представляется сочетание нескольких подходов (рис. 6):

- химиотерапия пациента с помощью тимо-модифицированного нуклеозида, обладающего потенциальной активностью против 85–90% видов онкологических заболеваний;
- введение специального химерного белка Аннексин-ПНФаза, «снимающего тормоз» с собственного противоопухолевого иммунитета больного;
- внутриопухолевая инъекция особой смеси вакцинных адъювантов, превращающих любую опухоль в вакцину против самой себя.

Для реализации указанных подходов сотрудниками лаборатории разработана и запатентована технология получения противоопухолевого нуклеозида 6ТДГ с уникально широким спектром действия; создан и запатентован штамм-продуцент особого нацеленного на опухоли человеческого химерного белка Аннексин-ПНФаза; высказана (Зинченко и др., 2018), но еще не проверена экспериментально идея о составе препарата для противоопухолевой *in situ*-вакцинации.

Также представляется целесообразным проверить высказанную в литературе идею превращения рака из пугающего всех смертельного недуга в обычное хроническое заболевание. Для этого необходимо подавить процесс образования метастазов – истинных виновников летальных исходов в подавляющем большинстве случаев. В научной литературе уже описаны (и в лаборатории их тоже могут получать) соединения, которые ингибируют т.н. стволовые клетки опухоли, ответственные за бессмертие и метастазирование раковых опухолей.

Для борьбы с загрязнением окружающей среды в лаборатории начато создание рекомбинантных

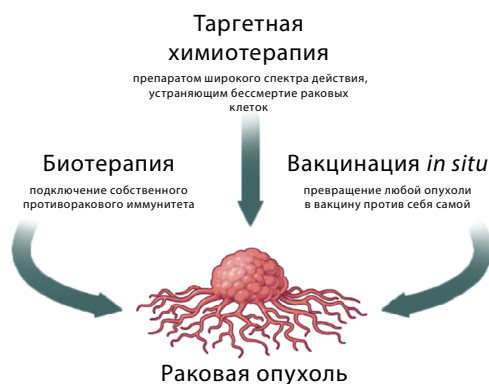


Рис. 6. Предлагаемые подходы к терапии рака

штаммов микроорганизмов, продуцирующих особый фермент – полиэтилентерефталат-гидролазу *Piscinibacter sakaiensis*. Этот фермент способен вызывать биodeградацию бутылочного и упаковочного пластика (полиэтилентерефталата), наиболее устойчивого к разложению в окружающей среде.

Решение проблемы дефицита белка может быть отчасти достигнуто с помощью применения рекомбинантных ферментов. Большое количество куриных перьев (которые на 80–85% состоят из полноценного по аминокислотному составу белка-кератина) сжигается, закапывается в землю или перерабатывается (частично) в слабо усвояемую животными перьевую муку. В лаборатории в рамках диссертационного исследования создан и запатентован бактериальный штамм, продуцирующий кератиназу, способную гидролизовать перо птицы в легко усвояемый белковый гидролизат кормового назначения. К сожалению, получаемый рекомбинантный фермент пока демонстрирует недостаточную эффективность при гидролизе пера. Необходим продуцент (и он начал разрабатываться) фермента-помощника, ослабляющего третичную структуру кератина за счет восстановления его многочисленных S-S-связей.

Для относительно быстрого создания вакцин против вновь появляющихся возбудителей инфекционных заболеваний целесообразно использовать вышеописанный штамм-продуцент универсальной генетической конструкции.

В качестве действенной защиты от респираторных вирусов рационально использовать индуктор интерферона. Как известно, система защиты организма позвоночных предусматривает синтез (в ответ на обнаружение патогенов в своем организме) особых белков-интерферонов, которые индуцируют множество различных механизмов защиты, приводящих в большинстве случаев к элиминации внедрившихся инфекционных патогенов. В этой связи представляется логичным вместо самого интерферона использовать его природный индуктор, в частности получаемый в лаборатории цикло-ди-АМФ. Введение его в организм человека или животного должно имитировать инфекционную атаку и приводить к быстрому включению эволюционно сформированной системы универсальной защиты от всех без исключения инфекционных патогенов, в том числе и еще не известных.

Бесконтрольное и порой избыточное применение антибиотиков в медицине, сельском хозяйстве и пищевой промышленности привело к возникновению глобальной проблемы – образованию патогенных микроорганизмов, проявляющих устойчи-

вость к антибиотикам (лекарственным препаратам), причем даже последнего поколения.

Из анализа литературы просматривается ряд еще относительно малоизученных подходов к решению этой проблемы, среди которых использование:

- бактериофагов;
- металлических (Cu, La, Ag, Zn и др.) или полимерных наночастиц;
- антимикробных пептидов;
- недавно обнаруженных хищных бактерий.

Все эти подходы основаны на механизмах антибактериального действия, отличных от тех, которые свойственны применяемым сегодня антибиотикам, что должно затруднить формирование соответствующей устойчивости.

Что касается нанобиотехнологического подхода, в отраслевой лаборатории молекулярных био- и нанотехнологий проводятся работы по получению и изучению наноматериалов, осуществлен синтез наночастиц меди, железа, лантана, цинка, MgAl-слоистых двойных гидроксидов, хитозана и других соединений.

Перспективы развития лаборатории

Коллектив ученых постоянно работает над развитием человеческого потенциала и актуализацией направлений научных исследований (например, во время пандемии COVID-19 были начаты исследования по созданию прототипов современных ДНК- и РНК-вакцин, а также их усилителей – адъювантов). Представляется, что и в будущем лаборатория продолжит следовать этим традициям и вносить весомый вклад в развитие отечественной науки и решение важных социально-экономических проблем.

Высококвалифицированные кадры – основа успешной научной деятельности. Поэтому привлечение талантливых и «горящих» наукой молодых ученых, сохранение и продвижение вперед сформировавшейся научной школы – безусловно, важнейшая составляющая инновационного прогресса.

Поскольку биологические исследования в современном мире во многом зависят от наличия высокотехнологичного оборудования, необходимо дальнейшее укрепление материально-технической базы лаборатории и Института микробиологии НАН Беларуси в целом. Конечно, очень важна поддержка государства – как на этапе финансирования научно-исследовательских проектов, так и для последующего внедрения полученных результатов в реальный сектор экономики. ■

Региональные технологические платформы как инструмент обеспечения биологической безопасности

Новые гибридные внешние риски, связанные в том числе с биологическим фактором, – серьезный вызов для отдельных государств и мирового сообщества в целом. В обновленной Концепции национальной безопасности Республики Беларусь отмечается, что пристальное внимание должно быть уделено постоянному мониторингу заноса и распространения инфекционных и паразитарных заболеваний человека, равно как и прогнозированию возможного появления новых, редких, ранее не встречавшихся или вновь возвращающихся на территорию страны болезней [1].



Александр Орешнев,
доцент кафедры экономики и
информационных технологий Витебской
государственной академии ветеринарной
медицины, кандидат экономических наук

Проблему еще более актуализировала пандемия корона-вирусной инфекции, которая в то же время стимулировала развитие биотехнологий. Обеспечение биобезопасности было отнесено к приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности [2]. На основе

разработок в области биологии, медицины, техники уже создаются новые продукты (лекарственные средства, биомедицинские клеточные препараты, медицинские изделия и др.), формирующие будущий ландшафт отдельных секторов и отраслей биоэкономики.

Существенный вклад в реализацию отечественных наукоемких методов борьбы с инфекционными заболеваниями в острый пандемийный период 2020–2021 гг. внесли Республиканский научно-практический кластер геномных исследований (Институт генетики и цитологии НАН Беларуси), Центр экспериментальной и прикладной вирусологии и Центр иммунологии и аллергологии (Институт биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси). Организациями – участниками академических кластеров было проведено полное геномное секвенирование вируса, разработан метод

прогнозирования тяжести течения и неблагоприятного исхода COVID-19, применены пулированные донорские мезенхимальные стволовые клетки в комбинированном лечении тяжелых форм инфекции, использованы способности Т-лимфоцитов и дендритных клеток стимулировать иммунитет против вирусных и микробных антител и др.

Ключевую роль в подготовке страны к новым глобальным вызовам играет накопление знаний, которые в условиях адаптации к ограниченной доступности импортных технологий призваны обеспечить формирование технологического суверенитета [3, 4]. Следует также подчеркнуть, что системообразующая роль инноваций в развитии интеграционных процессов в сфере науки, образования и производства невозможна без совершенствования предпринимательской культуры и формирования слоя инновационно

активных людей (ученых, разработчиков, изобретателей, рационализаторов), для которых внедрение новшеств и предпринимательство – профессиональные компетенции. Лауреат Нобелевской премии по экономике 2006 г. Э. Фелпс в своей работе «Массовое процветание. Как низовые инновации стали источником рабочих мест, новых возможностей и изменений» отмечает: «Двигателем современных экономик были новые идеи широкого класса деловых людей, в большинстве своем безвестных, – изобретателей, предпринимателей, финансистов, продавцов и пользователей, испытывающих новые продукты» [5].

В то же время приходится констатировать, что недостаток коммуникаций ведет к дефициту прорывных креативных инициатив, рождающихся на стыке интересов государства, науки и бизнеса, к нехватке людей с должной мерой необходимых навыков и полномочий, к ограниченности площадок для обсуждения, экспертизы и апробации проектных решений.

В современной практике для реализации идей прогресса и обновления используется широкий спектр механизмов. Идет процесс накопления и овладения опытом работы в условиях системной координации усилий и ресурсов. Мобилизации возможностей инициаторов и участников исследований будут способствовать актуальные в мировой экономике инструменты комплексного управления научной и инновационной деятельностью. К ним можно отнести, в частности, технологические платформы, которые все чаще рассматриваются в качестве формата, позволяющего вне зависимости от отраслевой и корпоративной принадлежности объединить

ресурсы на стратегически важных направлениях модернизации страны и регионов, интенсифицировать кооперацию и координацию субъектов инновационной системы [6, 7]. Вместе с тем в концепциях кластерных программ они пока еще редко рассматриваются в качестве эффективного метода.

Главная цель создания таких платформ – разработка с их помощью перспективных технологий, а сам инструмент позиционирован как специфический коммуникационный (между властью, наукой и бизнесом), а не финансовый, необходимый для активизации сотрудничества и согласования интересов акторов инновационной системы. Его смысл – в построении площадки, на которой ключевые игроки могли бы встречаться, обсуждать пути научно-технологического развития конкретного сектора экономики, а также стратегические программы научных исследований на основе всестороннего анализа потребностей производства и общества.

Такая площадка выполняет следующие задачи:

- *поддерживает разработку и реализацию ключевых технологий, жизненно важных для ответа на экономические и социальные вызовы;*
- *помогает конкретизировать видение и стратегический план для разработки и внедрения этих технологий;*
- *способствует увеличению частных инвестиций в исследования путем приближения их тематики к промышленной сфере и расширения рынков для инновационных продуктов.*

В научной литературе дается следующее определение технологическим платформам: «это

коммуникационный инструмент, направленный на активизацию усилий по созданию перспективных коммерческих технологий, новых продуктов (услуг), на привлечение дополнительных ресурсов для проведения исследований и разработок на основе участия всех заинтересованных сторон (бизнеса, науки, государства, гражданского общества), совершенствование нормативно-правовой базы в области научно-технологического и инновационного развития» [8]. Необходимым условием выделения указанного инструмента в качестве самостоятельной институциональной единицы выступает его стержень – макротехнологии.

Технологические платформы вводятся в действие в тех областях, где масштабы и техническая сложность задач требуют, чтобы все заинтересованные стороны объединили свои усилия в рамках полной цепочки – от научных исследований до выхода на рынок. При этом каждый из участников такого сотрудничества, привнося свой вклад в совместный проект, достигает желаемых целей: государство стремится реализовать значимые научно-технические и инновационные программы развития страны, бизнес – снизить риски и сроки окупаемости инвестиций.

Будучи открытой системой по своей природе, платформа состоит из множества взаимосвязанных (по принципу «тройной спирали» [9]) элементов: «организаций-гибридов», таких как институты развития, предпринимательские университеты, малые инновационные предприятия (МИП) и стартап-компании, исследовательские корпорации и др.; каналы обмена – интерфейсы, обеспечивающие обмен и получение информации, капитала,

людей, знаний, опыта; участники-акторы – предпринимательские ассоциации, деловые объединения, союзы и др.

Значение технологической платформы заключается в следующем:

- *множество потенциальных участников и косвенных бенефициаров смогут обсудить перспективы технологической модернизации и форм партнерства;*
- *деловые круги получают шанс акцентировать свои интересы в разработке и внедрении новых технологий, в подготовке кадров, согласовать требования к важнейшим базовым технологиям;*
- *появится возможность начать междисциплинарные исследования для разработки преспективных технологий; прояснить существующие научно-технологические компетенции, устранить ведомственные барьеры между научными организациями.*

Технологические платформы выполняют ряд функций: не только информационно-коммуникационную (знакомство участников между собой, обмен информацией, рабочие контакты, соблюдение консенсуса мнений по различным вопросам инновационной деятельности), но и стимулирующую (мотивирование к более интенсивной работе в данном направлении), интегрирующую (объединение для реализации совместных инновационных проектов), транслирующую (передача государству предложений по инновационной политике, устранение различных барьеров для инноваций, формирование механизмов реализации новых решений).

Среди преимуществ данной формы сотрудничества выде-

ляют такие, как целевая ориентация науки на потребности бизнеса; наличие органа, обеспечивающего поддержку взаимодействия; возможность привлекать максимальный круг экспертов; выработка согласованного видения будущего; создание коммуникационной площадки и научно-производственных цепочек, обеспечивающих полный цикл разработки и производства продукции [10].

На этапе перехода к новым постиндустриальным условиям это позволяет осваивать систему прогнозирования, определения возможностей развития, новых подходов к регламентации и частно-государственному партнерству, управлению, основанному на переговорах, согласовании интересов участников, сложных сетевых взаимодействиях.

Концепция региональных технологических платформ (РТП) основана на эндогенном подходе, при котором инкубация наукоемкого бизнеса и трансфер технологий опираются на местные источники, что, в свою очередь, позволит обеспечить независимость от санкционного давления недружественных государств.

В региональных технологических платформах часто наблюдаются те же явления, что и в кластерах: активная кооперация участников, обмен передовыми разработками, итеративная модернизация, интеграция производственных процессов, оптимизация операционной деятельности, диверсификация работы с поставщиками. Те и другие должны взаимодействовать с государственными ведомствами, реализующими инновационные программы, а также работать с отечественными и зарубежными институтами развития и другими организаци-

ями поддержки науки и бизнеса. Тем не менее их взаимосвязь не столь очевидна. В отличие от технологических платформ кластеры существуют дольше. Уже традиционно считается, что они выступают средствами повышения конкурентоспособности территорий, помогают установлению конструктивных взаимоотношений между предприятиями, научно-исследовательскими, образовательными, финансовыми учреждениями, расположенными, как правило, в больших городах. Как и другие типы локализованных сетей, кластеры могут охватывать широкий круг независимых агентов разного профиля, которые взаимодействуют друг с другом в режиме непрерывных согласований, опираясь на сетевые платформы или иные институты поддержки коллаборации. Вследствие полученного кластерного опыта бизнес лучше понимает преимущества коммуникаций и согласования действий, что, в свою очередь, может оказать положительное влияние на качество его работы в техплатформах.

В данном контексте целесообразно использовать российский опыт формирования и реализации проектов технологических платформ, деятельность которых направлена на стимулирование НИОКР, выполняемых организациями и предприятиями региональных кластеров. Примеры «встроенных» в медицинские кластеры платформ – «Современные биотехнологии» (Калужская область, кластер фармацевтики, биотехнологий и биомедицины), «Биоиндустрия и биоресурсы (БиоТех2030)» (Московская область, биотехнологический инновационный территориальный кластер), «Медицина будущего» (Алтайский край, биофармацевтический кластер).

Реализация идеи РТП в Беларуси

В нашей стране в качестве региона, где возможна апробация модели технологической платформы в биоиндустрии, выступает Витебская область. Именно здесь в 2023 г. был создан научно-образовательный кластер «Медицина и фармацевтика – инновационные проекты», ключевой задачей которого стало содействие расширению и развитию сегмента инновационной экономики на основе эффективной кооперации и интеграции участников региональной инновационной системы (рисунки).

Проведенный SWOT-анализ позволяет сделать вывод о том, что Витебская область может рассматриваться в качестве перспективной площадки для разработки технологий быстрого создания диагностических средств и организации биофармацевтического производства медицинских вакцин против особо опасных инфекций (таблица).

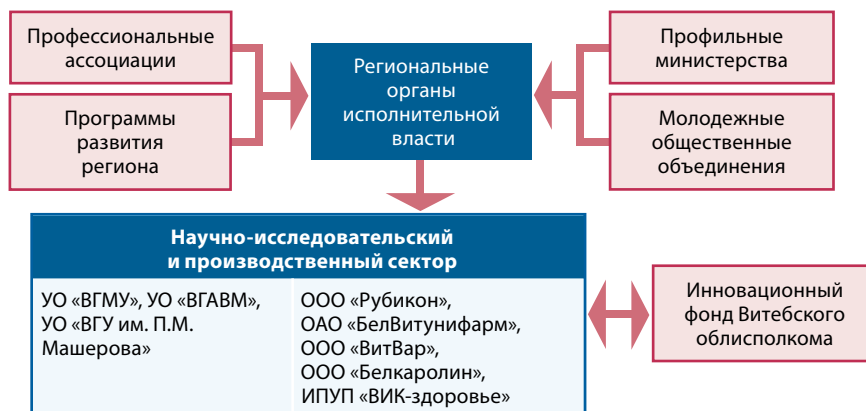


Рисунок. Взаимодействие субъектов РТП в кластерном пространстве «Медицина и фармацевтика – инновационные проекты». Источник: авторская разработка

В регионе функционирует ряд крупных предприятий микробиологической и фармацевтической отрасли. Так, ОАО «БелВитунифарм», которое позиционирует себя как лидер индустрии биотехнологий, развивает сотрудничество с китайским холдингом Sinopharm Animal Health Corporation Limited и компанией Tofflon, крупнейшим мировым производителем оборудования и комплексных решений для фармацевтической и биотехнологи-

ческой промышленности. В ближайшей перспективе на базе витебского акционерного общества намереваются запустить крупный биотехнологический кластер, где будут сосредоточены технологии по выпуску биотехнологических медицинских и ветеринарных препаратов, что немаловажно в условиях, когда белорусский рынок по-прежнему зависит от европейских лекарств и субстанций. В него войдут все подразделения «БелВитунифарма», корпоративный научно-исследовательский центр «НИИ «БиоФарм», а также специализированная площадка для выпуска биотехнологических средств на основе моноклональных антител.

ООО «Рубикон» располагает современной производственной базой с технологическим оборудованием ведущих мировых фирм (Bosch, Fette, Huttlin, Marchesini, Cosmec, Dibir, Bonapace, Comas), собственной лабораторией, подготовленным и организованным коллективом специалистов.

В ООО «СИВитал» налажен промышленный выпуск тест-систем для обнаружения РНК коронавируса штамма SARS-CoV-2 в биологических субстратах методом ПЦР с обратной транскрип-

Сильные стороны (S)	Слабые стороны (W)
Наличие на территории базирования профильных образовательных и исследовательских организаций Подготовка кадров по специальности «производство биотехнологической продукции» на уровне среднего специального образования Ориентация производства на внешний рынок Развитая инфраструктура поддержки научно-исследовательской деятельности (два научно-технологических парка и др.)	Отсутствие финансовых ресурсов для инвестиций Отсутствие квалифицированных кадров для развития биотехнологического предпринимательства Высокая зависимость от импортных субстанций
Возможности (O)	Угрозы (T)
Повышение производственного потенциала предприятий биотехнологической промышленности Улучшение качества среды ведения бизнеса Реализация запланированных инвестиционных проектов по производству медицинских вакцин Развитие кооперационно-технологического сотрудничества с КНР и достигнутые договоренности с Кубой в сфере фармацевтики и биотехнологий	Усиление конкуренции на основных рынках Финансовые, в том числе валютные риски Экологические риски

Таблица. Матрица SWOT-анализа создания противовирусных препаратов и медицинских вакцин в Витебской области

Источник: авторская разработка

цией в реальном времени (прилагается набор реагентов для одновременного выделения ДНК и РНК из биологического материала методом преципитации). Реализация тест-систем осуществляется в учреждения Российской Федерации и стран дальнего зарубежья (ОАЭ, Иран, Уганда и др.).

На территории области кроме биофармацевтических предприятий имеются и профильные образовательные и исследовательские организации: Витебский государственный медицинский университет, Витебская государственная академия ветеринарной медицины, НИИ прикладной ветеринарной медицины и биотехнологии. В феврале 2026 г. состоялся первый выпуск по специальности «производство биотехнологической продукции» с присвоением квалификации «техник-биотехнолог», открытой в Витебском государственном индустриальном колледже на уровне среднего специального образования и пользующейся большой популярностью. Набор по ней (в количестве 28 абитуриентов) продолжился уже во второй раз в 2025 г.

В регионе существует соответствующая инфраструктура, в том числе бизнес-субъекты, которые обеспечивают кооперационные связи: действуют 7 центров поддержки предпринимательства, 3 инкубатора малого предпринимательства, 2 научно-технологических парка (в ВГТУ и ПГУ), центр трансфера медицинских и фармацевтических технологий УО «Витебский государственный медицинский университет».

Формирование технологических платформ позволит региону решить ряд задач, таких как:

- *объединение усилий органов государственного управления,*

бизнеса, науки и образования для инновационного развития;

- *выявление приоритетов научно-технологического развития, консультирование государственных организаций и учреждений специалистами;*
- *продвижение программ финансовой и грантовой поддержки исследований (в том числе и биотехнологических) на уровне области;*
- *поддержка изысканий в области наук о жизни, формирование среднесрочных и долгосрочных программ выполнения НИОКР, нацеленных на решение проблем биологической безопасности;*
- *совершенствование образовательных программ по специальностям, связанным с биотехнологической индустрией;*
- *мобилизация возможностей производственных, научных и образовательных учреж-*

дений региона в соответствии с приоритетными направлениями научных исследований и разработок;

- *сотрудничество с ведущими профильными организациями науки и бизнеса, привлечение ведущих международных специалистов;*
- *совершенствование нормативной правовой, экономической, информационной и организационной базы для функционирования кластеров и др.*

Основными эффектами от создания в биофармацевтике технологических платформ как региональной экосистемы инноваций должны стать очевидные конкурентные преимущества. В их числе – выход на внутренний и внешний рынок высокотехнологичных инноваций, создание новых рабочих мест на современных производствах, рост бюджетных поступлений за счет увеличения добавленной стоимости продукции. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Об утверждении Концепции национальной безопасности Республики Беларусь: Решение Всебелорусского народного собрания от 25.04.2024 г. №5 // Национальный правовой интернет-портал Республики Беларусь // pravo.by/document/?qid=12551&p0=P924v0005.
2. О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2026–2030 гг.: Указ Президента Республики Беларусь от 01.04.2025 г. №135 // Национальный правовой интернет-портал Республики Беларусь // pravo.by/document/?qid=12551&p0=P32500135.
3. Гусаков В.Г. Академическая наука Беларуси: векторы развития в условиях пандемии // Наука и инновации. 2021. №12. С. 5–9.
4. Гурский В.Л. Импортзамещающая индустриализация экономики Беларуси: предпосылки и перспективы / В.Л. Гурский // Наука и инновации. 2023. №1. С. 12–18.
5. Фелпс Э. Массовое процветание: как мировые инновации стали источником рабочих мест, новых возможностей и изменений. – М., 2015.
6. Кохно П.А. Технологические платформы кластерного развития / П.А. Кохно, А.А. Артемьев, Ю.И. Енин. – Тверь, 2019.
7. Пилипук А. Формирование институциональных кластерных платформ продовольственной системы ЕАЭС / А. Пилипук, Е. Гусаков, Ф. Субоч // Аграрная экономика. 2017. №2. С. 8–15.
8. Региональные технологические платформы как инструмент инновационного развития территории / В.В. Куимов [и др.]. – М.: Красноярск, 2022.
9. Дежина И.Г. Государство, наука и бизнес в инновационной системе России / И.Г. Дежина, В.В. Киселева. – М., 2008.
10. Галимулина Ф.Ф. Технологические платформы как способ минимизации институциональных ловушек // Экономический вестник Республики Татарстан. 2014. №2. С. 54–58.



В новом проекте журнала «Наука и инновации» "ОТКРЫВАЯ СЕБЯ" мы хотим представить женщин-ученых одновременно как исследователей, управленцев и просто женщин. Показать их работу в науке без идеализации и возвышенности, отступив от жанра «вдохновляющих историй успеха», постоянную занятость в сложных, многоуровневых экспериментах, в которых сталкиваются ожидания и реальность. Нам важно понять, какие нагрузки выдерживают исследовательницы, где проходит граница между профессиональными амбициями и личной жизнью, что поддерживает их, когда гипотезы рушатся, а внешняя среда в лучшем случае нейтральна. Потому что наука – это не только результаты. Это процесс. Жизнь женщины в науке – это испытание на прочность, преодоление ограничений и верность себе.

Ученый, мать, жена: МИССИЯ ВЫПОЛНИМА?



Ирина Полоз,
ведущий научный сотрудник Института жилищно-коммунального хозяйства НАН Беларуси, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры «Промышленный дизайн и упаковка» факультета технологий управления и гуманитаризации БНТУ

Фото Дарьи Евменчик

Каждый, кто занимается наукой всерьез, знает, что это не череда озарений, а бесконечный процесс проверки реальности и себя на прочность. Особенно если ты женщина и за твоими плечами не только лабораторный журнал и планы лекций, но и расписание троих детей, школьные собрания, детский сад и внезапно выпавшее свободное воскресенье, которое хочется провести не за диссертацией, а, скажем, в тире.

Меня часто спрашивают: «Как ты все успеваешь?» Честный ответ: никак. Я просто живу в режиме многозадачности, где дедлайн по проекту соседствует с режимом дня трехлетней дочери Евы, а подготовка к международной конференции – с проверкой уроков у старших сыновей. В 2025 году я сделала шаг, который может показаться безумным при моем графике: поступила в докторантуру МГЭИ им. А.Д. Сахарова по специальности «Экология». Это не просто новые карьерные устремления, это, скорее, поиск новой себя. Возможность доказать, что женщина может быть не только источником заботы, но и генератором идей, и что тишина в библиотеке и детский смех – это не две разные Вселенные, а одна жизнь: моя.

Поля, отходы и поиск себя

Я из тех людей, кто подходит к выбору пути основательно. Когда поступала в 1999 году в Белорусскую государственную сельскохозяйственную

академию, то точно знала, куда иду. Выбор пал на агроэкологический факультет, специальность «Агрохимия, почвоведение и защита растений». Мне было интересно понять, как живет земля, по которой мы ходим, чем дышат растения, какие процессы определяют жизнь агроэкосистем. Это была осознанная любовь к полям, к корням, ко всему живому.

В науку я пришла сразу после окончания вуза, еще в 2005 году, когда поступила в аспирантуру Института мелиорации. С тех пор многое изменилось. Я защитила кандидатскую в 2012-м, будучи беременной вторым сыном. Буквально вышла с защиты и через несколько дней уехала в роддом. Тогда это казалось пределом выносливости, той самой вершиной, покорив которую, можно выдохнуть. Теперь, оглядываясь назад, я поняла, что это была всего лишь разминка, а настоящий марафон только начинался.

Сегодня я кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, и моя жизнь разделена между двумя мирами. В Белорусском национальном техническом университете на кафедре «Промышленный дизайн и упаковка» я читаю студентам лекции, провожу занятия с магистрантами на английском языке. Здесь мы с коллегами растим новое поколение инженеров и дизайнеров, которые будут думать об экологии упаковки еще на стадии ее создания. А в Институте жилищно-коммунального хозяйства НАН Беларуси я ведущий научный сотрудник. Здесь, в лабораториях и тиши кабинетов, я провожу исследования, пишу научные отчеты, от которых зависит, чем завтра будут дышать наши города.

Мои научные интересы давно вышли за пределы полей и севооборотов. Казалось бы, от защиты растений до защиты планеты от отходов – огромная дистанция, но для меня это оказался естественный переход. Агрономия научила видеть систему: почва, растение, удобрение, климат – все взаимосвязано. Экология отходов работает по тем же законам: здесь тоже нельзя рассматривать один элемент в отрыве от других.

Модель поведения: между провалом и признанием

Сейчас я занимаюсь тем, что горожане предпочитают не замечать – упаковкой, отходами, их переработкой и тем самым «углеродным следом», который мы все оставляем после себя. Твердые коммунальные отходы, парниковые газы, биоразлагаемые материалы – это грубо, материально и совсем не романтично, но именно здесь сегодня



Фото Дарьи Евменчик

решается будущее нашей планеты. И, если честно, в этом есть своя поэзия: превращать мусор в ресурс, искать способы дышать чище, думать о том, что останется после нас.

И вот тут возникает парадокс. Я вроде бы кандидат наук, доцент, автор более 100 публикаций, руководитель заданий государственных программ, участвую в пресс-конференциях и круглых столах с международными экспертами, но как только сажусь писать докторскую диссертацию, в голову закрадывается знакомое многим женщинам-ученым чувство: «А достаточно ли я компетентна? А вдруг я занимаю не свое место?».

Неудачи в науке редко бывают драматичными, как взрыв в лаборатории, чаще всего это тихое «гипотеза не подтвердилась». Я вкладываю месяцы в проект, пишу отчеты, согласовываю их, а потом данные говорят мне: «Этот материал не разлагается так быстро, как ты надеялась». И я сижу в кабинете института, смотрю на графики и понимаю, что нужно признать свою неправоту и начинать заново. Умение признавать ошибки – это, пожалуй, главный навык, который воспитывает наука, и он же – побочный эффект профессии, потому что публичное признание требует мужества.

Когда рушится гипотеза или не подтверждаются расчеты, я разрешаю себе взять короткую паузу. Могу пойти в тир и выпустить там эмоции – каждый выстрел гасит разочарование. Могу долго танцевать, выключая голову, а потом вернуться к данным и начать разбирать их заново. Неудача в науке – это не точка, это запятая, просто сигнал, что где-то нужно свернуть, пойти иным путем.

Граница на замке? И где она, эта граница?

Где проходит граница между работой и частной жизнью? Ее нет. Мои сыновья Никита и Глеб выросли на том, что мама постоянно занята. Но они видели и другое: мама может увлеченно рассказывать про биоразлагаемую упаковку, мама ездит на Фестиваль науки, модерировать работу секции на международных конференциях, маму можно увидеть по телевизору. И, кажется, для них это стало нормой жизни, потому что наука в их картине мира – не школьный предмет, а часть реальности, часть маминой работы.

Сейчас, с появлением дочери Евы, баланс сместился снова. Трехлетнему ребенку все равно, дедлайн ли у тебя по проекту или заседание Межведомственной рабочей группы. Ей нужна мама здесь и сейчас. И я учусь выкраивать это «здесь и сейчас» из плотного графика преподавания в БНТУ, научного руководства в Институте ЖКХ и подготовки к докторантуре.

Дефицит времени – главный побочный эффект профессии, я постоянно в цейтноте. Повышенная тревожность становится фоновым состоянием: не забыла ли подать заявку на конкурс, вовремя ли ответила на запрос из министерства, все ли в порядке с отчетностью у моих студентов. С годами приходит и обостренное чувство справедливости: я слишком хорошо знаю цену каждому своему результату, чтобы относиться к нему небрежно или позволять другим его обесценивать.

Но наука – это не только испытание на прочность, есть у нее и «плюшки». Во-первых, это привычка

сомневаться. В мире, где так много манипуляций и готовых ответов, сомнение – это роскошь. Я учу студентов не верить на слово, проверять факты, искать первоисточники. Это интеллектуальная сфера, которая дисциплинирует и меня саму.

Во-вторых, умение жить в неопределенности. Наука – это про «мы пока не знаем, но попробуем выяснить», это полная противоположность бытовому комфорту. И такое состояние становится привычным. Я перестаю паниковать, когда рушатся планы, а ищу другие пути и понимаю, что выход есть всегда, просто он не там, где я ожидала.

Тылы и фарватеры: откуда берутся силы

А где брать энергию, когда кажется, что силы на исходе? У меня есть несколько спасательных кругов.

Первый и самый главный – это моя семья. Но она у нас устроена непросто. Мой муж – моряк, а это значит, что он уходит в рейс на четыре месяца, и на это время я превращаюсь в «генерала на поле боя», который в одиночку командует парадом. Я остаюсь одна с тремя детьми, работой в двух учреждениях, докторантурой и бытом, который никто не отменял. Иногда вечером, когда все спят, а непрочитанные письма горят красным, хочется лечь и не вставать. Но я встаю, потому что понимаю: он там в море несет свою вахту, а я здесь несу свою. И эта вахта не про «успеть все», она про выносливость, про умение ждать и верить, что мои усилия как маяк: освещают путь и ему, и детям.

А дети – это мое главное вдохновение и моя гордость. Старший сын Никита теперь мой коллега



в прямом смысле слова. В 2025 году он поступил в БНТУ на приборостроительный факультет. Я до сих пор помню тот сентябрьский день, когда мы вместе вошли в главный корпус – я на лекцию, а он на свою первую пару. Мы выросли до статуса «преподаватель и студент одного университета». Иногда встречаемся в коридорах, перебрасываемся парой фраз, и в эти моменты я чувствую такую гордость, которую не даст ни одна научная степень. Он выбрал техническое образование, пойдет своим путем, но он рядом. Он видит изнутри, чем живет его мама, и, кажется, начинает понимать цену этой жизни.

Второй сын Глеб – настоящий огонь, он нашел себя в спринте и теперь целиком поглощен легкой атлетикой и короткими дистанциями, где скорость решает все. И вот тут начинается самое интересное. Когда он выходит на старт, мое сердце замирает точно так же, как перед защитой важного проекта. Я сижу на трибуне, вцепившись в сиденье, и ловлю каждое его движение. Секунды решают все. В спринте нет времени на раскачку, там нужно выложиться сразу, на пределе возможностей. Я смотрю, как он разгоняется, и думаю: «Боже, как же это похоже на нашу жизнь». Мы тоже всегда на короткой дистанции и всегда на пределе. И когда он приходит к финишу – первый, второй, пусть даже третий, я знаю, что он сделал все, что мог. И я учусь у него этому: не бояться дистанции, какой бы короткой или длинной она ни была. Мы переживаем каждое его соревнование как семейный праздник. Победы Глеба – это наши общие победы. И когда он стоит на пьедестале, я чувствую, что все мои бессонные ночи над проектами того стоят, потому что главный мой проект – это они, мои дети.

Но главная моя мотивация – это трехлетняя Ева, та самая маленькая фея, ради которой хочется сделать мир чище, чтобы она росла не среди полигонов отходов и продуктов разложения, а дышала свежим воздухом. Ради нее я готова двигать горы, писать диссертации и менять стратегии по обращению с отходами, потому что это не абстрактная экология, это ее будущее.

Второй источник энергии – это движение. Мое хобби – танцы, стрельба и спорт. Это момент, когда мозг, уставший от цифр, коэффициентов эмиссии и нормативных правовых актов, просто отключается. В танце или на огневом рубеже я существую в чистом моменте «здесь и сейчас». Выстрел – и нет ни отходов, ни парниковых газов, ни дедлайнов, только я и мишень. Это лучшее лекарство от выгорания.

Третий источник – это, как ни странно, сами результаты. Нет, не в виде дипломов и грамот, а когда

я вижу, что мои рекомендации вошли в важный документ, когда студент приносит победу на конкурсе или на международном семинаре эксперты кивают в ответ на мой доклад про декарбонизацию. И вот тогда я четко понимаю, что это работает и я не просто «занимаюсь наукой», а меняю реальность вокруг.

Сейчас я в начале долгого пути – докторантуры. Это поиск новой себя, новой научной идентичности. Будет ли трудно? Безусловно. Будут ли моменты отчаяния? Конечно. Но наука, как и жизнь, – это процесс, и я в нем действующее лицо. А значит, спринт продолжается. ■

Правила жизни

Если бы мне нужно было сформулировать свой кодекс, выжимку из этих лет, я бы сказала так:

- **Не врать себе.** Если гипотеза провалилась – признай это. Если устала – признай это. Если хочешь в докторантуру в 40+ с тремя детьми – признай, что будет трудно, и иди.
- **Искать свою «экологическую нишу».** В науке, как и в природе, важно найти то место, где ты будешь полезна и где сможешь реализовать свой потенциал. Свою нишу я нашла, она на стыке экологии и образования.
- **Не стирать границы, а договариваться с ними.** Я давно поняла, что невозможно разорваться на части, но можно выстроить систему правил. Можно договориться с семьей о тихом часе для работы, с начальником – о гибком графике, с собой – о том, что воскресенье принадлежит только нам.
- **Сохранять способность удивляться.** Наука – это бесконечное открытие мира. И если ты перестаешь удивляться тому, как разлагается (или не разлагается) пластик, или тому, как студенты мыслят на английском, пора что-то менять.
- **Смотреть, как бегут твои дети.** Смотреть на своих детей и учиться у них скорости, напору и умению падать и вставать. Я точно знаю, что все, что я делаю, – ради них и их победы: это и есть моя главная награда.



Вольга Юшкевіч,
намеснік акадэміка-сакратара
Аддзялення гуманітарных навук
і мастацтваў НАН Беларусі,
кандыдат філалагічных навук

3 творчым імпэтам

Пісаць пра сябе заўсёды складана, бо чалавек не можа абстрагавацца, паглядзець на падзеі збоку, таму часта аўтабіяграфічныя матэрыялы ператвараюцца або ў справаздачу з сухім пералічэннем фактаў, або ў споведзь, залішне падрабязную і эмацыйную.

Я нарадзілася ў Віцебску, цудоўным горадзе на беразе Заходняй Дзвіны, які часцей асацыюецца з выдатнымі мастакамі, напрыклад прадстаўнікамі Віцебскай школы жывапісу, і культурнымі мерапрыемствамі, такімі як «Славянскі базар». Самыя дасведчаныя згадаюць, што адсюль, магчыма, паходзіў Казімір Семяновіч і менавіта ў Віцебску вучыўся Васіль Быкаў.

Я хацела быць вучоным з дзяцінства, а вось выбар навуковага напрамку стаў, хутчэй, выпадковасцю: у дзевяностыя гады была папулярнай ідэя профільнага навучання пачынаючы з пачатковай школы, таму бацькі запісалі мяне ў беларуска-англійскі клас. Вывучэнне роднай мовы на паглыбленым узроўні доўжылася ўсё 11 гадоў, за што я вельмі ўдзячна сваім настаўнікам – Журавай Раісе Іванаўне (майму класнаму кіраўніку) і Крупко Ліліі Сцяпанаўне. Разам з імі мы прайшлі ўсе этапы школьных прадметных алімпіяд, захаваўшы творчы імпэт і любоў да абранай справы.

Пазней авалоданне спецыяльнасцю прадоўжылася на філалагічным факультэце Беларускага дзяржаўнага ўніверсітэта. Гэта былі вельмі цікавыя і плённыя гады, насычаныя вучобай, новымі знаёмствамі і творчымі мерапрыемствамі. З дзяўчатамі, якімі мы вучыліся і жылі ў адным пакоі інтэрната, мы сябруем і дагэтуль. Я з радасцю ўспамінаю майго першага навуковага кіраўніка – Зінаіду Іванаўну Бадзевіч, дзякуючы якой пачаўся мой шлях у навуку праз удзел у конкурсах навуковых прац і студэнцкіх канферэнцыях. Менавіта яна параіла мне прадоўжыць навучанне ў аспірантуры Інстытута мовазнаўства імя Якуба Коласа Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, куды я і паступіла ў 2006 г.

Дырэктарам інстытута ў той час быў Аляксандр Аляксандравіч Лукашанец, пад чым кіраўніцтвам 15 кастрычніка 2010 г. я паспяхова абараніла дысер-



тацыю «Суфіксоіды ў сістэме сродкаў беларускага словаўтварэння: статус і функцыянальная характарыстыка», у якой абгрунтавала існаванне марфем пераходнага тыпу (афіксоідаў), правяла сістэмнае даследаванне суфіксоідаў беларускай мовы з улікам іх паходжання, вызначыла іх семантычную і структурную спецыфіку, а таксама ўстанавіла асаблівасці функцыянавання сучасных суфіксоідных вытворных і іх стылістычныя магчымасці.

Інстытут мовазнаўства імя Якуба Коласа – калектыў выдатных прафесіяналаў, адзіная ў нашай краіне навукова-даследчая ўстанова, якая забяспечвае правядзенне сістэмных даследаванняў у галіне беларускага мовазнаўства, што з'яўляюцца асновай вучэбнай і даведачнай літаратуры для ўсіх узроўняў адукацыі ў нашай краіне, у значнай ступені вызначаюць развіццё ўсёй айчынай лінгвістычнай навукі і садзейнічаюць яе прэстыжу ў свеце.

Семантыка працы

Падчас вучобы я атрымлівала стыпендыю Прэзідэнта Рэспублікі Беларусь для аспірантаў і грант НАН Беларусі на выкананне навукова-даследчай работы «Афіксоіды ў сістэме сродкаў беларускага словаўтварэння». Пасля заканчэння аспірантуры пра-

цавала ў аддзеле беларуска-рускіх моўных сувязей інстытута. Гэты час запомніўся першым вопытам працы ў межах дзяржаўнай праграмы фундаментальных даследаванняў у складзе вялікага калектыву. Калегі сапраўды зацікаўленыя ў выніках сваёй дзейнасці, здольныя гадзінамі працаваць над адпаведнымі раздзеламі, вывяраючы кожнае слова, літару і знак прыпынку, пры гэтым не губляючы аптымізм і пачуццё гумару. Я ганаруся тым, што прымала ўдзел у распрацоўцы планавых тэм аддзела, якія завяршыліся выданнем «Русско-белорусского системного семантического словаря». Аўтарскі калектыў слоўніка быў удастоены Міждзяржаўнай прэміі «Звезды Содружества» (галоўнай гуманітарнай прэміі СНД) за 2023 г. у намінацыі «За выбітны ўклад і дасягненні ў галіне навукі і адукацыі».

Хачу расказаць пра яго падрабязней, бо, як усе ведаюць, у нашай краіне дзве дзяржаўныя мовы, таму навуковыя пошукі супастаўляльнага плану надзвычай актуальныя. Слоўнік працягвае серыю падрыхтаваных раней калектывам аддзела манаграфічных сістэмных кампаратыўных даследаванняў сучасных рускай і беларускай моў на розных узроўнях, пачатак якой быў закладзены яшчэ ў 1990 г.



«Русско-белорусский системный семантический словарь» уяўляе сабой двухмоўны су-пастаўляльны слоўнік, у якім паказаны міжмоўныя суадносіны рускіх і беларускіх лексічных адпаведнікаў, што ўваходзяць на падставе агульнай семантычнай прыметы ў лексіка-семантычныя палі эмоцый, колеру, гучу, маўлення, перамяшчэння ў прастору, руху без перамяшчэння, надвор'я і геаграфічнага ландшафту (гэты раздзел разам з Наталляй Валянцінаўнай Лаўрыновіч рыхтавала я), якія ўяўляюць сабой найважнейшыя жыццёвыя сферы чалавека. Такі падыход дазваляе атрымаць дакладныя вынікі лексічнага ўзроўню мовы, а таксама скласці ўяўленне пра арганізацыю асобных фрагментаў нацыянальнай моўнай карціны свету, што асабліва важна ў эпоху глабалізацыі.

Практычная вартасць слоўніка заключаецца ў непасрэднай арыентацыі на патрэбы двухмоўнай лексікаграфіі. Ён можа з'явіцца перадумовай для ўдасканалення традыцыйных перакладных слоўнікаў і распрацоўкі супастаўляльных лексікаграфічных прац. Даследаванне лексікі як сістэмы дае магчымасць найбольш адэкватна апісаць структуру значэння ў адзінстве ўсіх яго кампанентаў, глыбока пранікнуць у семантыку слова, удасканаліць дэфініцыі ў тлумачальных слоўніках і ўдакладніць эквівалентную частку двухмоўнага слоўніка.

Вывучэнне суадносных лексіка-семантычных палёў знайшло працяг у распрацоўках маёй аспіранткі, якая зараз рыхтуе кандыдацкую дысертацыю па гэтай тэме.

Спецыфіка дзейнасці аддзела беларуска-рускіх моўных сувязей палягае ў тым, што кожная новая

планавая тэма прадугледжвае правядзенне даследаванняў на пэўным моўным узроўні (словаўтваральным, лексічным і г.д.), таму атрымліваецца, што кожны раз вучоныя адкрываюць для сябе новую сферу, у якой трэба дасягнуць відавочных вынікаў на працягу пяці гадоў, гэта прымушае пастаянна развівацца, сачыць за актуальнымі навуковымі вынікамі ў славянскай лінгвістыцы, імкнуцца стаць спецыялістам шырокай эрудыцыі.

Такі вопыт падрыхтоўкі аналітычных матэрыялаў аказаўся запатрабаваным падчас працы ў Аддзяленні гуманітарных навук і мастацтваў НАН Беларусі, дзе я спачатку была вучоным сакратаром, а зараз – намеснік акадэміка-сакратара. Аддзяленне – гэта другі дом, месца, куды я з радасцю прыходжу кожны дзень. Галоўнай задачай Аддзялення з'яўляецца вывучэнне, захаванне і папулярызацыя духоўна-культурнай спадчыны беларускага народа, а таксама выпрацоўка навукова абгрунтаваных рэкамендацый для мінімізацыі негатывных тэндэнцый, пошук новых ідэй для паспяховага сацыяльна-эканамічнага развіцця і захавання гуманітарнай бяспекі беларускага грамадства.

Калектыў Аддзялення на чале з акадэмікам-сакратаром акадэмікам Аляксандрам Аляксандравічам Каваленем – гэта сям'я аднадумцаў, сапраўдных вучоных і таленавітых арганізатараў навукі, дзе кожны ўсведамляе пастаўленыя задачы і імкнецца выканаць іх аптымальным спосабам. Праца ў Аддзяленні вымагае вялікай адказнасці перад калегамі за ўсе прынятыя рашэнні і падрыхтаваныя матэрыялы, яна дае неацэнны арганізатарскі і камунікатыўны вопыт. Кожны дзень патрэбна паглыбляць свае веды ў розных гуманітарных навуках – у тым ліку гісторыі, эканоміцы, сацыялогіі і інш.

Часам даволі складана заставацца вытрыманай і аб'ектыўнай у сітуацыі, калі планы імкліва змяняюцца. Яшчэ я перфекцыяністка, таму, з аднаго боку, вельмі патрабавальная да сябе, а з другога – свае памылкі заўсёды ўсведамляю і падрабязна аналізую, каб пазбегнуць іх у далейшым. У якасці станоўчых рыс характару магу назваць працавітасць і здольнасць да навучання. Мне сапраўды цікава ўсё, што звязана з навукай, не толькі гуманітарнай. Я з павагай стаўлюся да людзей і заўсёды імкнуся падтрымаць нашу моладзь: традыцыйна ўваходжу ў склад журы ўсіх моладзевых конкурсаў і навукова-практычных мерапрыемстваў, якія праводзяцца ў Аддзяленні. Бо пераемнасць пакаленняў у навуцы надзвычай важная: у любой дзейнасці мы абавязаны на працу папярэднікаў, імкнёмся наблізіцца да іх, у той жа час моладзь трэба накіроўваць, дапамагчы паверыць у сябе і рэалізаваць творчыя планы.



З любімым кіраўніком

Фота Дар'я Емешчык



Хатнія клопаты

Не здраджваць сабе

Кажуць, што паспяховы чалавек адрозніваецца ад непаспяховага пачуццём удзячнасці. Таму я сапраўды ўдзячная ўсім настаўнікам, калегам, сваёй сям'і, сябрам за падтрымку, якую я адчуваю кожны дзень. Самае складанае – заставацца чалавекам і не здраджваць сабе.

Я схлусу, калі скажу, што сумяшчаць выхаванне траіх дзяцей і навуковую дзейнасць лёгка. Калі я абараняла дысертацыю, старэйшаму сыну было восем месяцаў, менавіта муж узяў на сябе асноўныя клопаты пра дзіця на той час, каб я магла падрыхтаваць неабходныя матэрыялы і завяршыць гэты этап. Зараз з дзецьмі дапамагае мама.

Нягледзячы на тое, што часу заўсёды не хапае, сям'я дае ўнутраны спакой і любоў. Дзяцей нельга выхаваць толькі правільнымі словамі, для іх важныя ўчынкі, найперш адносіны паміж бацькамі. Гэта вялікая адказнасць, але і вялікае шчасце – бачыць, якімі разумнымі і таленавітымі растуць мае сыны. Яны даюць мне стымул рухацца наперад: ад атрымання правоў на кіраванне аўтамабілем да ведання моладзевых трэндаў у сацыяльных сетках. Нам не бывае сумна разам, заўсёды ёсць што абмеркаваць.

Дома часта шумна: дзеці расказваюць пра свае справы, пытаюцца, як выканаць хатняе заданне, сярэдні сын грае на музычным інструменце, а малодшы гуляе ў актыўныя гульні, і гэта ўсё адбываецца адначасова.

Таму ў штодзённых клопатах важна знайсці час для заняткаў, якія па-сапраўднаму захапляюць і служаць крыніцай натхнення. Як усе філолагі, я люблю чытаць, разам з сям'ёй падарожнічаць, наведваць музеі, тэатры і выставы. ■

Правілы жыцця

Адкажу словамі класікаў:

- **«Пачынаецца ўсё з любові...»** (Яўгенія Янішчыц): патрэбна любіць людзей, з якімі ты працуеш, сваіх родных, сябе і тую справу, якой ты займаешся. Нельга дасягнуць поспеху ў тым, да чаго не ляжыць душа.
- **«Кожны чалавек – гэта цэлы свет»** (Кузьма Чорны): кожны з нас, у тым ліку маленькія дзеці – асоба з багатым унутраным светам, эмоцыямі, думкамі і здольнасцямі. Задача бацькоў і кіраўнікоў – не перайначыць іншых, а стварыць каманду аднадумцаў, асяроддзе, якое падтрымлівае, у якім могуць раскрыцца таленты; пры гэтым важна адразу пазначыць межы дазволенага.
- **«Чалавек памірае, калі страчвае здольнасць захапляцца жыццём»** (Максім Танк): сапраўднае жыццё заключаецца ў пастаянным пазнанні свету, эмацыйнай адкрытасці і захаванні цікаўнасці да ўсяго навакольнага, навука прадугледжвае неспатольную прагу ведаў, новых адкрыццяў, без гэтага немагчыма развіццё чалавека і грамадства.
- **«Усё пакінуць след навінна...»** (Пятрусь Броўка): абавіраючыся на дасягнутае, важна звярнуцца да рэфлексіі, асэнсаваць зробленае, бо кожны з нас хоча пакінуць пра сябе добрую памяць, каб дзеці маглі ганарыцца бацькамі і браць з іх прыклад.
- **«Рабі нечаканае, рабі, як не бывае, рабі, як не робіць ніхто, – і тады пераможаш»** (Уладзімір Караткевіч): ключавое слова тут рабі. У жыцці заўсёды знойдуцца людзі, якія будуць ставіць пад сумненне твае ідэі. Важна верыць у сябе, свае сілы і працягваць ісці ўласным шляхам, нягледзячы на цяжкасці і перашкоды.

Компьютерная идентификация молекул-кандидатов в лекарственные препараты против туберкулеза



Анна Гончар,
младший научный сотрудник
Объединенного института
проблем информатики НАН
Беларуси; hanna.hanchar@gmail.com



Константин Фурс,
младший научный
сотрудник ОИПИ НАН
Беларуси



Александр Тузи́ков,
заведующий лабораторией
математической кибернетики
ОИПИ НАН Беларуси,
член-корреспондент



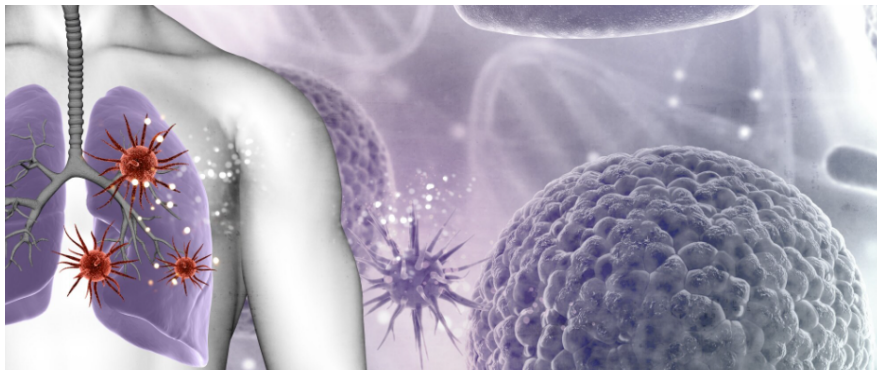
Александр Андрианов,
главный научный сотрудник
Института биоорганической
химии НАН Беларуси, доктор
химических наук, профессор

Аннотация. Проведен виртуальный скрининг библиотеки биологически активных соединений, направленный на идентификацию малых молекул, способных ингибировать каталитическую активность еноил-ацил-переноса́щий белок-редуктазы (InhA) микобактерии туберкулеза (МБТ) – одного из ключевых ферментов, участвующих в биосинтезе миколовых кислот клеточной стенки МБТ. С этой целью использован комплексный вычислительный подход к перепрофилированию лекарств, включающий высокопроизводительный докинг фермента InhA с соединениями из молекулярной библиотеки, содержащей одобренные FDA препараты и исследуемые кандидаты в лекарственные средства, молекулярную динамику комплексов лиганд/InhA-NAD⁺, отбор наиболее перспективных соединений и экспериментальное определение их минимальной ингибирующей концентрации МИК₉₀. В результате обнаружено соединение-лидер, которое показало значение МИК₉₀, равное 62,5 мкМ, против вакцинного штамма *Mycobacterium bovis* BCG и МБТ, что позволяет рассматривать его в качестве базовой структуры для разработки новых противотуберкулезных молекул.

Ключевые слова: микобактерия туберкулеза, виртуальный скрининг, перепрофилирование лекарств, ингибиторы, фермент InhA, противотуберкулезные препараты.

Для цитирования: Гончар А., Фурс К., Тузи́ков А., Андрианов А. Компьютерная идентификация молекул-кандидатов в лекарственные препараты против туберкулеза // Наука и инновации. 2026. №3. С. 78–83.

<https://doi.org/10.29235/1818-9857-2026-03-78-83>



Несмотря на то, что в результате многолетних интенсивных исследований научное сообщество достигло значительного прогресса в создании эффективных препаратов для лечения туберкулеза (ТБ), статистика по заболеваемости и смертности от этого тяжелого инфекционного заболевания по-прежнему остается тревожной. Так, согласно данным Всемирной организации здравоохранения, в 2023 г. около 10,8 млн чел. заболели туберкулезом, более 1,25 млн – умерли от него [1].

Лечение ТБ затрудняется из-за появления и быстрого распространения новых штаммов микобактерии туберкулеза (МБТ), проявляющих множественную и широкую лекарственную устойчивость. Поэтому существует острая потребность в новых терапевтических средствах, эффективных как против лекарственно-чувствительных, так и лекарственно-устойчивых штаммов МБТ.

Анализ используемых в клинике препаратов для лечения ТБ и находящихся в разработке современных ингибиторов критически важных молекулярных мишеней МБТ показывает, что современные химиотерапевтические стратегии, как правило, сосредоточены на создании лекарств, нацеленных на репликацию ДНК, синтез белков, биосинтез клеточной стенки, энергетический метаболизм и протеолиз МБТ [2]. Среди них особое внимание следует уделить белку InhA, одному из ключевых ферментов пути FAS-II [3–5]. Еноил-ацил-переносящий белок (АПБ)-редуктаза (InhA) представляет собой фермент, участвующий в биосинтезе жирных, в основном мико-

ловых, кислот клеточной стенки МБТ [6]. Этот белок катализирует восстановление транс-двойной связи, соединяющей карбонильную группу промежуточного продукта, ковалентно связанного с АПБ в пути FAS-II [7]. Препарат первой линии для терапии туберкулеза изониазид (INH) является наиболее известным ингибитором InhA [8] – пролекарством, которое активируется каталазой-пероксидазой KatG с образованием аддукта INH-NAD⁺, способного связываться с активным центром фермента [9], что приводит к нарушению синтеза миколовых кислот [10]. В связи с тем, что INH – терапевтический агент, резистентность к которому могут вызывать не только мутации в гене InhA, но и в KatG, предпринимаются многочисленные попытки разработать прямые ингибиторы InhA, не требующие фазы активации [11].

Один из вариантов решения этой проблемы – перепрофилирование лекарственных средств, под которым понимается процесс определения новых терапевтических показаний для биологически активных соединений, зарегистрированных ранее для применения в клинике или находящихся на этапах доклинических и клинических испытаний. Это рассматривается как эффективная стратегия в открытии или разработке препаратов с новыми механизмами действия. Так как профили безопасности таких соединений хорошо документированы, такой подход, сочетающий в себе структурный дизайн лекарств с методами виртуального скрининга и молекулярного моделирования, может существенно облегчить и ускорить процесс обнаружения соединений с клиническим потенциалом с целью их перепрофилирования для лече-

ния пациентов с другими тяжелыми заболеваниями.

В данном исследовании для идентификации потенциальных ингибиторов фермента InhA прямого действия использован комплексный вычислительный подход к перепрофилированию лекарств, с помощью которого проведены следующие этапы:

- молекулярный докинг фермента InhA с биологически активными молекулами, собранными в виртуальную библиотеку, содержащую одобренные Управлением по контролю качества пищевых продуктов и лекарственных средств США (FDA) препараты и исследуемые в настоящее время кандидаты в лекарственные средства;
- оценка аффинности связывания комплексов лиганд/InhA с использованием классической оценочной функции и двух функций машинного обучения с последующим расчетом экспоненциального консенсусного ранга (ECR) для каждого соединения и отбором молекул с лучшими значениями ECR;
- анализ молекулярной динамики комплексов лиганд/InhA и их молекулярно-динамических траекторий, расчет свободной энергии связывания молекул с терапевтической мишенью и отбор соединений, перспективных для биомедицинского тестирования;
- экспериментальное определение минимальной ингибирующей концентрации МИК₉₀ для этих соединений, выполненное под руководством профессора Л. Лю в ключевой лаборатории медицинской молекулярной вирусологии при Университете Фудань (Шанхай, КНР).

Материалы и методы

Формирование виртуальной библиотеки биологически активных соединений. Учитывались следующие критерии: свободный академический доступ к данным, наличие структур соединений в формате файлов химических данных SDF (Structure Data File) (<https://www.fda.gov/media/151718/download>), активная поддержка баз данных и наличие информации о возможности синтеза и покупки молекулы. В соответствии с этим были выбраны следующие базы данных со свободным доступом:

- *DrugBank* с подробной информацией о более чем 10 тыс. лекарств (<https://go.drugbank.com/>) [12];
- *ZINC15*, включающая несколько сотен миллионов коммерчески доступных соединений для виртуального скрининга потенциальных лекарств (<https://zinc.docking.org/>) [13];
- *Selleck Chemicals*, содержащая более 120 тыс. ингибиторов, используемых в исследованиях сигнальных путей клеток (<https://www.selleckchem.com/>).

При сборке молекулярной библиотеки из приведенных баз были отобраны и загружены в формате SDF химические соединения, находящиеся на стадиях лабораторных исследований, клинических испытаний или применения в медицинской практике. В результате собранная виртуальная библиотека включала 28 260 соединений, потенциальную активность которых по отношению к белку InhA МБТ оценивали методами молекулярного докинга и молекулярной динамики.

Молекулярный докинг и расчеты значений ECR. Молекуляр-

ный докинг проводили с помощью программы AutoDock Vina [14] в приближении жесткого рецептора и гибких лигандов. Структуру белка InhA выделяли из его комплекса с ингибитором InhA Inh_468 (N-(3-хлор-2-метилфенил)-1-циклогексил-5-оксопирролидин-3-карбоксамид) (PDB ID: 4TZT) [15]. Ячейка для докинга включала субстрат-связывающий сайт InhA с коферментом NAD⁺ и имела следующие параметры: $\Delta X=22,92 \text{ \AA}$, $\Delta Y=15,74 \text{ \AA}$, $\Delta Z=15,94 \text{ \AA}$ с центром при $X=40,62 \text{ \AA}$, $Y=51,97 \text{ \AA}$, $Z=59,73 \text{ \AA}$. Значение параметра охвата конформационного пространства, определяющего широту поиска, было установлено равным 100 [14].

Показатели свободной энергии связывания комплексов лиганд/InhA-NAD⁺ рассчитывали с помощью классической оценочной функции AutoDock Vina [14] и двух функций машинного обучения RF-Score-4 [16] и NNScore 2.0 (<https://git.durrantlab.pitt.edu/jdurrant/nnscore2>) [17]. Затем вычисляли ранги соединений согласно значениям каждой оценочной функции и из этих данных для каждого лиганда определяли значение ECR по следующей формуле [18]:

$$ECR = \sum_{sf} \frac{1}{\sigma_{sf}} * \exp \left\{ -\frac{rank_{sf}}{\sigma_{sf}} \right\}$$

где $rank_{sf}$ – ранг соединения согласно оценочной функции sf , σ_{sf} – параметр, контролирующий влияние оценочной функции sf на результаты консенсусного отбора (при расчетах ECR значение σ_{sf} для всех рассматриваемых оценочных функций задавали равным 10, предполагая, что их вклады в суммарную величину ECR одинаковы).

В результате консенсусного ранжирования были отобраны 23 соединения с наивысшим рей-

тингом, комплексы которых с InhA-NAD⁺ исследовали методами молекулярной динамики (МД) для выявления наиболее перспективных кандидатов в лекарственные препараты, способных блокировать каталитическую активность фермента.

Молекулярная динамика. Классическую МД комплексов лиганд/InhA-NAD⁺ в воде выполняли в программном пакете Amber18 с применением силовых полей Amber ff14SB (белок) и GAFF (лиганды и NAD⁺) [19]. Для задания парциальных зарядов атомов (модель AM1-BCC) использовали модуль Antechamber программного пакета AmberTools19 [19]. Атомы водорода добавляли с помощью программы reduce данного пакета. Комплексы помещали в коробку с формой усеченного октаэдра, заполняли растворителем (модель воды TIP3P [20]) и добавляли ионы Na⁺ и Cl⁻ до значения ионной силы, равного 0,15 М.

После подготовки системы атомы основной цепи белка фиксировали с помощью дополнительного гармонического потенциала с силовой константой 2,0 ккал/моль/Å² и с помощью модуля Sander программного пакета AmberTools19 проводили уравнивание системы в четыре последовательных этапа: 1) минимизация энергии с применением 500 шагов алгоритма наискорейшего спуска, за которыми следовали 500 шагов метода сопряженных градиентов; 2) нагревание системы от 0 К до 300 К в течение 50 пс в ансамбле NVT (при постоянном числе частиц, объеме и температуре) с использованием термостата Ланжевена с частотой столкновений 2,0 пс⁻¹; 3) выравнивание давления в течение 50 пс при давлении P=1,0 атм. в ансамбле NPT (при постоянном числе частиц, давлении и температуре) с задей-

ствованием баростата Берендсена с характерным временем 1,0 пс; 4) снятие ограничений и повторное уравнивание в течение 0,5 нс при температуре 300 К и постоянном давлении. После достижения равновесия проводили молекулярную динамику в течение 200 нс в ансамбле NPT при температуре $T=300$ К и давлении $P=1,0$ атм. Связи с участием атомов водорода ограничивали с помощью алгоритма SHAKE [21] для достижения шага интегрирования 2 фс. Электростатические взаимодействия на больших расстояниях рассчитывали с помощью алгоритма Эвальда (PME) [22]. Максимальное расстояние, на котором учитывали электростатические взаимодействия, задавали равным 8,0 Å.

Значения энтальпийной составляющей свободной энергии связывания рассчитывали в пакете AmberTools19 [19] методом MM/GBSA [23]. Для определения полярной составляющей энергии сольватации использовали обобщенную модель Борна с ионной силой 0,15 М. Неполярные компоненты свободной энергии гидратации вычисляли на основе расчетов площади поверхности, доступной растворителю [19]. Энтропийную компоненту свободной энергии Гиббса рассчитывали с применением программного модуля Nmode пакета AmberTools19 [19]. Анализ МД траекторий выполняли с помощью программного модуля CPPTRAJ пакета AmberTools19 для последних 150 комплексов, разделенных временным интервалом 1 нс [19]. В качестве положительного контроля в расчетах использовали два мощных ингибитора InhA прямого действия Genz10850 [24] и Inh_468 [15] со значениями концентрации полумаксимального ингибирования IC_{50} , равными 0,16 мкМ и 23,12 мкМ соответственно.

Результаты и обсуждение

Анализ данных молекулярного моделирования позволил выявить 8 соединений (рис. 1), способных блокировать субстрат-связывающий центр фермента InhA МБТ. Согласно дан-

ным МД, они проявляют высокое сродство к каталитическому сайту InhA, что подтверждается низкими средними значениями свободной энергии связывания и соответствующими стандартными отклонениями (таблица). С учетом погрешности метода

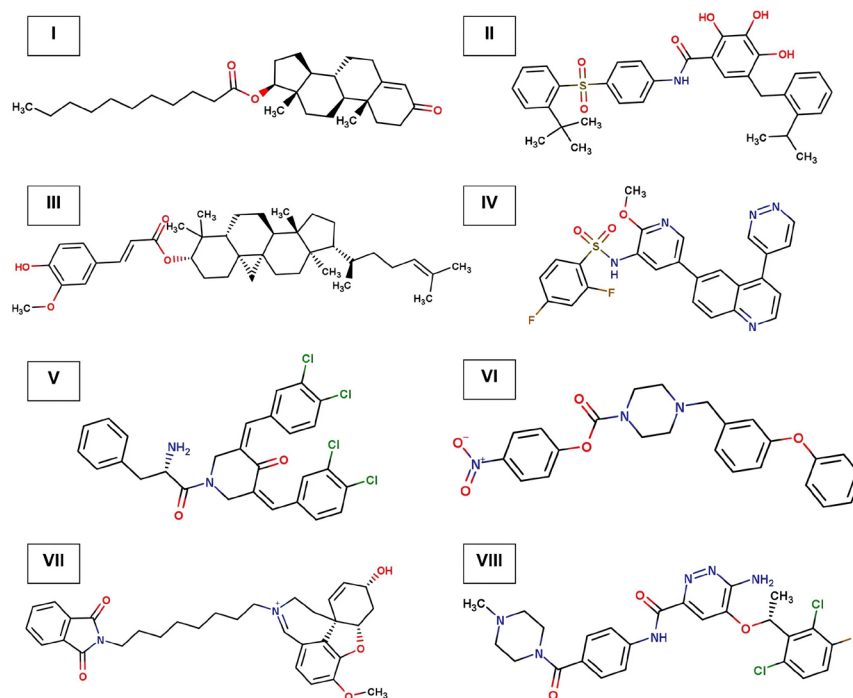


Рис. 1. Химические структуры идентифицированных соединений

Лиганд	$\langle \Delta H \rangle$, ккал/моль	ΔH_{STD} , ккал/моль	$\langle \Delta S \rangle$, ккал/моль	$(\Delta S)_{STD}$, ккал/моль	$\langle \Delta G \rangle$, ккал/моль	ΔG_{STD} , ккал/моль
I	-54,6	3,1	-24	5,2	-30,5	5,8
II	-53,7	3,3	-24,8	4,1	-28,9	5,1
III	-54,3	3,5	-26,2	4,6	-28,1	5,8
IV	-51,5	3,5	-23,9	6,1	-27,6	7,1
V	-52,5	5,8	-26,5	5,4	-26,0	7,1
VI	-48,2	7,1	-25,2	4,6	-23,0	8,7
VII	-46,2	4,5	-24,7	4,8	-21,5	6,6
VIII	-47,1	4,3	-25,8	6,9	-21,3	8,2
Genz10850	-42,9	4,3	-22,3	4,9	-20,6	6
Inh_468	-38,2	3,2	-21,6	4	-16,6	5,1

Таблица. Средние значения свободной энергии связывания $\langle \Delta G \rangle$ и соответствующие им стандартные отклонения ΔG_{STD} , рассчитанные для динамических моделей комплексов лиганд/InhA-NAD⁺

Примечание: $\langle \Delta H \rangle$ и $\langle \Delta S \rangle$ – соответственно средние значения энтальпийной и энтропийной составляющих свободной энергии; $(\Delta H)_{STD}$ и $(\Delta S)_{STD}$ – соответствующие этим значениям стандартные отклонения

ММ/GBSA, составляющей около 2,9 ккал/моль [23], можно предполагать, что значения энергии связывания идентифицированных соединений с белком InhA сопоставимы или значительно ниже величин, рассчитанных для контрольных ингибиторов InhA Genz10850 [24] и Inh_468 [15] с помощью идентичного вычислительного протокола (таблица). Анализ среднеквадратических отклонений (RMSD, Root Mean Square Deviation) положений атомов между всеми динамическими моделями комплексов лиганд/InhA-NAD⁺ и их стартовыми структурами показывает, что они не претерпевают существенных структурных перестроек в течение МД-расчетов (рис. 2). Этот вывод подтверждается средними значениями RMSD, рассчитанными для идентифицированных молекул в комплексах

с InhA, которые близки к соответствующим величинам, предсказанным для контрольных соединений (рис. 2). При этом среднее значение RMSD для InhA в свободном состоянии сопоставимо с полученными значениями для идентифицированных соединений, связанных с ферментом.

Таким образом, данные об аффинности связывания комплексов лиганд/InhA-NAD⁺, предсказанные с помощью методов молекулярного моделирования, свидетельствуют о высоком потенциале ингибирующей активности идентифицированных соединений (рис. 1) против фермента InhA МБТ.

Антимикобактериальный эффект лигандов оценивали против вакцинного штамма *Mycobacterium bovis* BCG и МБТ по величинам минимальной ингибирующей концентрации МИК90 для 5 иден-

тифицированных молекул (соединения II, III, IV, VI, VIII; рис. 1), которые были доступны для приобретения. Полученные результаты показали, что для соединения VIII значение МИК90 составляет 62,5 мкМ как в отношении МБТ, так и для *Mycobacterium bovis* BCG, а соединение VI ингибирует только рост штаммов *Mycobacterium bovis* BCG с величиной МИК90, равной 31,25 мкМ. При этом остальные 3 соединения не проявили приемлемой антимикобактериальной активности. Эти результаты указывают на то, что среди идентифицированных соединений лиганд VIII является наиболее предпочтительным кандидатом для разработки новых эффективных ингибиторов белка InhA МБТ.

Заключение

В настоящей работе методами молекулярного докинга и МД проведен виртуальный скрининг библиотеки биологически активных соединений, включающей 28 260 одобренных FDA препаратов и исследуемых кандидатов в лекарственные средства для оценки потенциала их ингибиторной активности в отношении белка InhA МБТ. На основе расчетных значений свободной энергии связывания комплексов лиганд/InhA-NAD⁺ и анализа их молекулярно-динамических траекторий идентифицированы 8 соединений, которые показали высокое сродство к субстрат-связывающему сайту фермента. Для 5 из этих 8 молекул определены *in vitro* значения минимальной ингибирующей концентрации МИК90 против вакцинного штамма *Mycobacterium bovis* BCG и МБТ, что позволило идентифицировать соединение-лидер (лиганд VIII; рис. 1), проде-

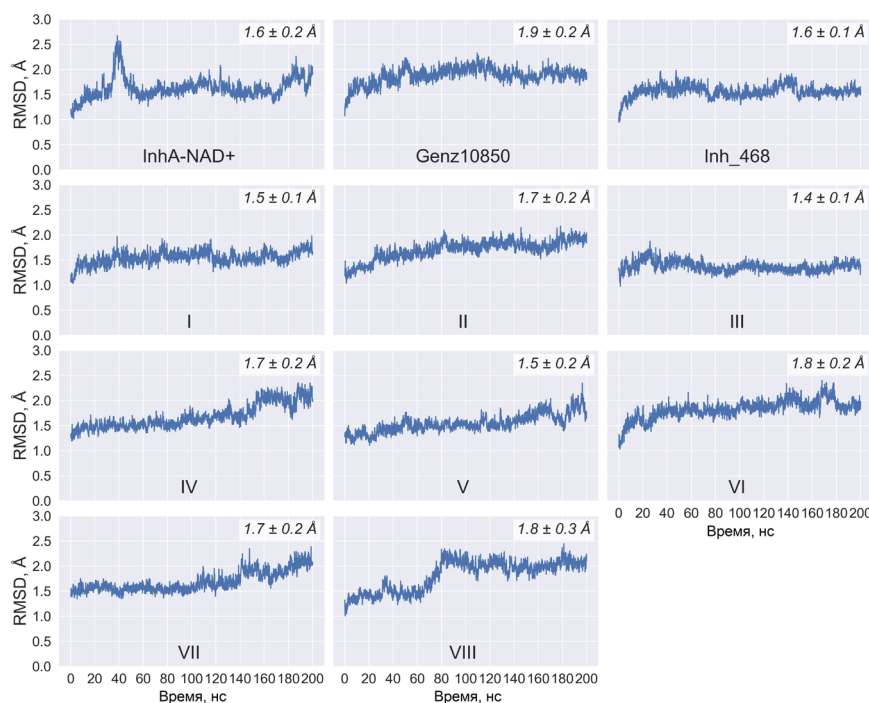


Рис. 2. Временные зависимости значений RMSD (Å), рассчитанных для всех динамических моделей комплексов лиганд/InhA-NAD⁺ и исходных структур. В расчетах использовали атомы основной цепи белка InhA. В правом верхнем углу указаны средние значения RMSD и соответствующие стандартные отклонения

монстрировавшее в обоих случаях значение МИК90, равное 62,5 мкМ. Полученные данные дают основание предполагать, что это соединение формирует перспективную базовую структуру для разработки новых противотуберкулезных молекул, обладающих клиническим потенциалом и способных блокировать критически важную терапевтическую мишень МБТ. ■

Работа выполнена при поддержке грантов Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Ф24КИТГ-016), Международного научно-технического центра (МНТЦ, проект PR150) и Консорциума и портала программы «Лекарственно-устойчивый туберкулез».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. WHO. Global tuberculosis report 2024 / World Health Organization, 2024 // <https://www.who.int/teams/global-programme-on-tuberculosis-and-lung-health/tb-reports/global-tuberculosis-report-2024>.
2. Shetye G.S. New tuberculosis drug targets, their inhibitors, and potential therapeutic impact / G.S. Shetye, S.G. Franzvluu, S. Cho // *Transl. Res.* 2020. Vol. 220. P. 68–97. [Doi.org/10.1016/j.trsl.2020.03.007](https://doi.org/10.1016/j.trsl.2020.03.007).
3. North E.J. New approaches to target the mycolic acid biosynthesis pathway for the development of tuberculosis therapeutics / E.J. North, M. Jackson, R.E. Lee // *Curr. Pharm. Des.* 2014. Vol. 20(27). P. 4357–4378.
4. Pawelczyk J. The molecular genetics of mycolic acid biosynthesis / J. Pawelczyk, L. Kremer // *Microbiol. Spect.* 2014. Vol. 2(4). MGM2-0003-2013.
5. Conditional depletion of KsA, a key enzyme of mycolic acid biosynthesis, leads to mycobacterial cell lysis / A. Bhatt [et al.] // *J. Bacteriol.* 2005. Vol. 187. P. 7596–7606.
6. Duan X. Crucial components of mycobacterium type II fatty acid biosynthesis (Fas-II) and their inhibitors / X. Duan, X. Xiang, J. Xie // *FEMS Microbiol. Lett.* 2014. Vol. 360 (2). P. 87–99. <https://doi.org/10.1111/1574-6968.12597>.
7. Prasad S. Mycobacterium enoyl acyl carrier protein reductase (InhA): A key target for antitubercular drug discovery / S. Prasad, R.P. Bhole, P.B. Khedekar, R.V. Chikhale // *Bioorg Chem.* 2021. Vol. 115: 105242. <https://doi.org/10.1016/j.bioorg.2021.105242>.

■ **Summary.** Structure-based virtual screening of the library of bioactive compounds was used to identify novel small-molecule compounds that can inhibit the catalytic activity of *Mycobacterium tuberculosis* (Mtb) enoyl acyl carrier protein reductase (InhA), one of the key enzymes involved in the biosynthesis of mycolic acids of the Mtb cell wall. To do this, we employed an integrated computational approach to drug repurposing which included high-throughput docking of the InhA enzyme with small-molecule compounds from the library of bioactive molecules containing the FDA-approved drugs and investigation-al drug candidates, molecular dynamics simulations of the ligand/InhA-NAD⁺ complexes, binding free energy calculations, post-modeling analysis followed by selection of the most promising drug candidates and experimental determination of their minimum inhibitory concentration MIC90. As a result, a lead compound which showed the MIC90 value of 62.5 μM against the vaccine strain *Mycobacterium bovis* and Mtb was found, giving hope that this compound forms a promising scaffold for the development of novel antitubercular molecules of clinical significance with activity against an important target of Mtb.

■ **Keywords:** *Mycobacterium tuberculosis*, virtual screening, drug repurposing, inhibitors, enzyme InhA, antituberculosis drugs.

■ <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2026-03-78-83>

8. Kruh N. Probing mechanisms of resistance to the tuberculosis drug isoniazid: conformational changes caused by inhibition of InhA, the enoyl reductase from *Mycobacterium tuberculosis* / N. Kruh, R. Rawat, B.P. Ruzsicska, P.J. Tonge // *Prot. Sci.* 2007. Vol. 16. P. 1617–1627.
9. Rawat R. The isoniazid-NAD adduct is a slow, tight-binding inhibitor of InhA, the *Mycobacterium tuberculosis* enoyl reductase: Adduct affinity and drug resistance / R. Rawat, A. Whitty, P.J. Tonge // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2003. Vol. 100. P. 13881–13886. <https://doi.org/10.1073/pnas.2235848100>.
10. Transfer of a point mutation in *Mycobacterium tuberculosis* inhA resolves the target of isoniazid / C. Vilchère [et al.] // *Nat. Med.* 2006. Vol. 12. P. 1027–1029. <https://doi.org/10.1038/nm1466>.
11. Pan P. Targeting InhA, the FASII enoyl-ACP reductase: SAR studies on novel inhibitor scaffolds / P. Pan, P.J. Tonge // *Curr. Top. Med. Chem.* 2012. Vol. 12. P. 672–693. <https://doi.org/10.2174/156802612799984535>.
12. DrugBank 5.0: a major update to the DrugBank database for 2018 / D.S. Wishart [et al.] // *Nucl. Acids Res.* 2017. Vol. 46. P. D1074–D1082. <https://doi.org/10.1093/nar/gkx1037>.
13. Sterling T. ZINC 15 – Ligand discovery for everyone / T. Sterling, J.J. Irwin // *J. Chem. Inf. Model.* 2015. Vol. 55(11). P. 2324–2337. <https://doi.org/10.1021/acs.jcim.5b00559>.
14. Trott O. AutoDock Vina: improving the speed and accuracy of docking with a new scoring function, efficient optimization, and multithreading / O. Trott, A.J. Olson // *J. Comp. Chem.* 2010. Vol. 31. P. 455–461. <https://doi.org/10.1002/jcc.21334>.
15. Pyrrolidine carboxamides as a novel class of inhibitors of enoyl acyl carrier protein reductase from *Mycobacterium tuberculosis* / X. He [et al.] // *J. Med. Chem.* 2006. Vol. 49(21). P. 6308–6323. <https://doi.org/10.1021/jm060715y>.
16. Wójcikowski M. Performance of machine-learning scoring functions in structure-based virtual screening / M. Wójcikowski, P. Ballester, P. Siedlecki // *Sci. Rep.* 2017. Vol. 7. P. 46710. <https://doi.org/10.1038/srep46710>.
17. Durrant J.D. NNScore 2.0: A neural-network receptor–ligand scoring function / J.D. Durrant, J.A. McCammon // *J. Chem. Inf. Model.* 2011. Vol. 51(11). P. 2897–2903. <https://doi.org/10.1021/ci2003889>.
18. Palacio-Rodríguez K. Exponential consensus ranking improves the outcome in docking and receptor ensemble docking / K. Palacio-Rodríguez, I. Lans, C.N. Cavasotto, P. Cossio // *Sci. Rep.* 2019. Vol. 9(1). Article No. 5142. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41594-3>.
19. AMBER 2018 / D.A. Case [et al.] // University of California, 2018.
20. Comparison of simple potential functions for simulating liquid water / W.L. Jorgensen [et al.] // *J. Chem. Phys.* 1983. Vol. 79 (2). P. 926–935. <https://doi.org/10.1063/1.445869>.
21. Ryckaert J.P. Numerical integration of the Cartesian equations of motion of a system with constraints: molecular dynamics of n-alkanes / J.P. Ryckaert, G. Ciccotti, H.J.C. Berendsen // *J. Comput. Phys.* 1977. Vol. 23 (3). P. 327–341. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(77\)90098-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(77)90098-5).
22. A smooth particle mesh Ewald method / U. Essmann [et al.] // *J. Chem. Phys.* 1995. Vol. 103. P. 8577–8593. <https://doi.org/10.1063/1.470117>.
23. Genheden S. The MM/PBSA and MM/GBSA methods to estimate ligand-binding affinity / S. Genheden, U. Ryde // *Expert Opin. Drug Discov.* 2015. Vol. 10(5). P. 449–461. <https://doi.org/10.1517/17460441.2015.1032936>.
24. Targeting tuberculosis and malaria through inhibition of enoyl reductase / M.R. Kuo [et al.] // *J. Biol. Chem.* 2003. Vol. 278(23). P. 20851–20859. <https://doi.org/10.1074/jbc.m211968200>.

Статья поступила в редакцию
13.11.2025 г.

Yuliya Usherenko, Anatoly Belous

Protecting spacecraft from electromagnetic radiation 4

The paper presents developments and technical solutions of the domestic researchers and engineers that have much contributed to a global problem solution: the negative impact of electromagnetic radiation on aircraft and technical devices in space.

Sergey Grabchikov, Stanislav Lastovsky, Anna Yakushevich, Nikolay Vasilenkov

Radiation protection materials for spacecraft electronic component database 9

A promising approach to increasing the reliability of the electronic component database is substantiated, including the local radiation protection technologies.

Svetlana Danilova-Tretyak, Vasily Savchin, Vladimir Chuprasov, Mikhail Tretyak

Thermal protection tests on Earth is a guarantee of safety in space 17

The authors present one of the space research areas being developed at the A.V. Luikov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus: research into materials for thermal protection of aircraft.

Vladimir Vasetsky, Vladimir Grishchenko, Mikhail Doroshko, Anastasia Makhnach, Oleg Penyazkov

Studying the protective materials resistance to high-speed particle impact 23

Using the example of a common structural alloy, D16T, a method for studying the protective materials resistance to high-speed particle impacts was developed and implemented. Combining experiments and numerical modeling, as the most promising approach to studying high-speed impacts, allows us to obtain values that can be used to describe the behavior of target materials without labor-intensive and expensive testing.

Valentin Astashinsky, Georgy Dzagnidze, Pavel Shoronov Thrust elements of space-range plasma engines based on miniature magnetoplasma compressors 28

The Plasma Accelerators Physics Laboratory at the A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus has developed unique quasi-stationary high-current plasma accelerators, giving way to fundamentally new possibilities for creating thrust elements for thrust-vectoring propulsion systems for small spacecraft and stratospheric aircraft.

Pavel Grinchuk, Mikhail Kiyashko, Andrey Akulich, Dmitry Solovey, Mikhail Stepkin, Valentina Shcherbakova

Hot matter in cold space: Experience in manufacturing and testing domestic thermal protection materials 31

The article describes ways to identify and improve alternative thermal protection options for next-generation reusable space systems.

Ekaterina Piskun, Egor Kryachev, Akbarzhon Azizov Risk-based evaluation of the economic efficiency of large language models in the service sector of the Republic of Belarus 36

The paper presents an analysis of the transformation of national business under the influence of Large Language Models.

Eduard Kondratyev, Nikolai Gudz

Lean tools and process efficiency in railroad car building 45

Using the example of a Russian Railways railcar repair plant, the authors showed how, by leveraging the potential of their personnel and basic lean tools, they managed to launch a new work planning and capacity utilisation system, improving labour productivity and work quality.

Irina Malgina

National strategies for artificial intelligence development 49

The article considers national AI development strategies in various countries, including the post-Soviet states.

Qu Jintong

Technology transfer and «green» industrial and logistics partnerships within the Belt and Road Initiative 55

The paper analyzes the role of the China-Belarus Industrial Technology Innovation Center as a platform for knowledge transfer, innovation incubation, and the deepening of bilateral scientific and technological cooperation.

Anatoli Zinchenko, Aliaksandr Shepshaleu, Alena Balotnik Molecular bio- and nanotechnologies in the service of humanity 59

The article introduces the priority areas, most significant results and prospects of scientific and technical activities of the Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus, in particular the branch laboratory of molecular bio- and nanotechnologies.

Aliaksandr Areshankou

Regional technology platforms as a tool for ensuring biological security 65

The paper presents data on the prospects for cooperation among stakeholders to promote innovation, and justifies the feasibility of implementing such cooperation in the pharmaceutical and biotechnology sectors in one of Belarus's regions – the Vitebsk Region.

Irina Poloz

Scientist, mother, wife: Is the mission possible? 70

Science is not a series of epiphanies, but an endless process of testing reality and oneself for strength, as states the heroine of the journal's new column dedicated to the Year of the Belarusian Woman.

Volha Yushkevich

With creative impetus 74

In life, there will always be people who will question your ideas, as is sure the author of the article. But it is important to believe in yourself, your strengths and continue to follow your own path, despite difficulties and obstacles.

Anna Gonchar, Konstantin Furs, Alexander Tuzikov, Alexander Andrianov Computer-aided identification of candidate molecules for tuberculosis drugs 78

A virtual screening of a biologically active compounds library was conducted to identify small molecules capable of inhibiting the catalytic activity of one of the key enzymes involved in the biosynthesis of mycolic acids in the cell wall of *Mycobacterium tuberculosis*. A lead compound was identified that holds promise as a base structure for the development of new anti-tuberculosis molecules.

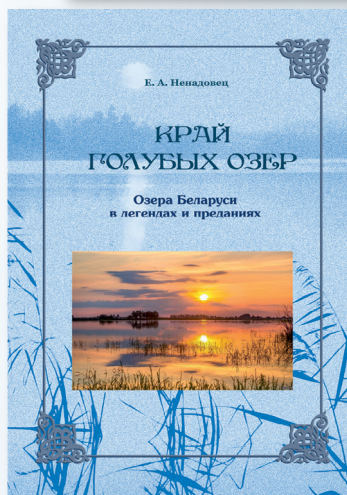


Национальные культурные коды ў беларускім эпасе мяжы XX–XXI стст. / Л. Г. Дуктава ; навук. рэд. І. В. Саверчанка. – Мінск : Беларуская навука, 2026. – 335 с. : іл.

ISBN 978-985-08-3378-5.

У манаграфіі комплексна разгледжана пытанне рэцэпцыі нацыянальных культурных кодаў у беларускім эпасе мяжы XX–XXI стст., абгрунтоўваецца паняцце «нацыянальны культурны код», разгледжана сістэма культурных кодаў. На шырокім зрэзе эпічных твораў паказана, як адбываецца выпяванне і крышталізацыя кодаў у паэтыцы твора, як кодавы інструментарый дазваляе абазначыць ідэйна-аўтарскую парадыгму мастакоў слова пры адлюстраванні розных аспектаў нацыянальнай ідэнтычнасці. Выдзелены коды, якія маркіруюць Беларусь (коды бусла, зубра, валашкі і інш.), разгледжаны код «кужаль», звязаны з асаблівасцямі нацыянальнага менталітэту, а таксама код «палеская мадонна», які рэпрэзентуе рысы характару беларускай жанчыны – нястомнай працаўніцы, клапатлівай гаспадыні і ахоўніцы сям’і.

Адрасавана выкладчыкам, студэнтам і ўсім, каго цікавіць пытанне функцыянавання нацыянальных культурных кодаў у мастацкай літаратуры.



Край голубых озер : озера Беларуси в легендах и преданиях / Е. А. Ненадовец ; ил. К. Д. Карачун. – Минск : Беларуская навука, 2026. – 175 с. : ил.

ISBN 978-985-08-3383-9.

На территории нашей республики много озер: больших и малых, глубоких и мелких, известных и не очень. Недаром нашу страну называют краем голубых озер, а сами озера – глазами земли. Наиболее крупные и известные из них (Нарочь, Свитязь, Князь-озеро и др.) описаны в устном поэтическом творчестве далеких предков. Благодаря им мы все глубже узнаем историю нашей земли.

Книга адресована всем тем, кто интересуется историей родного края, нашим духовным и культурным наследием.



Социология современного медиапространства / А. В. Посталовский, А. М. Бельский, Н. Н. Вакулюк [и др.] ; науч. ред. А. В. Посталовский ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т социологии. – Минск : Беларуская навука, 2026. – 220 с. : ил.

ISBN 978-985-08-3377-8.

Монография посвящена социологическим аспектам исследования современного медиапространства. Представлены методологические подходы к измерению востребованности информационного контента, раскрываются практики медиапотребления аудитории, показан социально-демографический портрет современных медиа, а также приведены результаты исследовательской практики. Эмпирический материал составляют результаты социологических исследований (массовые опросы населения), проведенных ГНУ «Институт социологии НАН Беларуси» в 2020–2024 гг.

Адресуется аналитикам, специалистам по социологии СМИ и медиапланированию, экспертам, политологам, журналистам, практикам государственного управления.

РУП «ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «БЕЛОРУССКАЯ НАУКА»

предлагает литературу

- по медицине
- искусствоведению
- литературоведению
- языкознанию
- этнографии
- фольклору
- естественным наукам

принимает заказы на печать

- бланки формата А₅, А₄, А₃
 - грамоты ● дипломы
 - канцелярские книги
 - блокноты ● блоки для записей
 - календари ● буклеты
 - проспекты (с разработкой дизайна)
- тираж от 1 экземпляра*

Получить информацию об изданиях и оформить заказ можно по телефонам: +375 (17) 396-83-27, 370-64-17, 320-33-74. Адрес: ул. Ф. Скорины, 40, 220084, г. Минск, Республика Беларусь; e-mail: belnauka@mail.ru; сайт: www.belnauka.by

