

# МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ЭКОНОМИКЕ, ТЕХНИКЕ, ПРИРОДЕ И ОБЩЕСТВЕ

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЖУРНАЛ

№ 1 (53)

2025

---

## СОДЕРЖАНИЕ

### РАЗДЕЛ 1. МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ЭКОНОМИКЕ И УПРАВЛЕНИИ

- Скворцова В. А., Скворцов А. О.*  
АНТИРОССИЙСКИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ САНКЦИИ:  
ПОСЛЕДСТВИЯ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ ..... 5
- Суровицкая Г. В.*  
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ  
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ УНИВЕРСИТЕТОВ-УЧАСТНИКОВ  
НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРОВ МИРОВОГО УРОВНЯ ..... 20
- Чеботарев С. С., Романова А. В.*  
ПОСТРОЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ МОТИВАЦИИ  
КАК СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫМ ПРОЦЕССОМ  
НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ  
ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ..... 32
- Айкашев П. В., Черушева Т. В., Зверовицкова Н. В.*  
АНАЛИЗ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫПУСКНИКОВ  
ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ  
ПЕНЗЕНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ..... 46

## РАЗДЕЛ 2. МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ТЕХНИКЕ

<b>Костров Б. В., Хруничев Р. В.</b> СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОСПОЛНЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ НА ПРИМЕРЕ РЯЗАНСКОЙ ОБЛАСТИ .....	58
<b>Михайлишин В. В.</b> СЕГМЕНТАЦИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПЛАНТОГРАММ СРЕДСТВАМИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА .....	75
<b>Трундаев И. В.</b> МЯГКОЕ УПРАВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ .....	84
<b>Бекетов С. М., Дергачев М. В., Редько С. Г.</b> МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ КОМАНДЫ ПРОЕКТА НА БАЗЕ МЕТОДОВ ДИСКРЕТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ.....	101
<b>Ксенофонтов М. А.</b> МЕТОДИКА ДОКЛИНИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК УЗЛА ПОДВИЖНОСТИ ЭНДОПРОТЕЗОВ ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	114
<b>Генералова А. А., Никулин А. А., Бычков Д. С.</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАБОТКИ ШКИВОВ БЕССТУПЕНЧАТОЙ ТРАНСМИССИИ ПРИ СЛОЖНОЙ ТРАЕКТОРИИ ЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА В КОМПЛЕКСЕ ПРОГРАММ ANSYS .....	125
<b>Печалин Н. Д., Финогеев А. Г.</b> ОЦЕНКА ВРЕМЕННЫХ И СТОИМОСТНЫХ РИСКОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОЕКТНЫХ ЗАДАНИЙ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА.....	138

# MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN ECONOMICS, TECHNOLOGY, NATURE AND SOCIETY

SCIENTIFIC JOURNAL

№ 1 (53)

2025

---

## CONTENT

### SECTION 1. MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN ECONOMICS AND MANAGEMENT

*Skvortsova V.A., Skvortsov A.O.*

ANTI-RUSSIAN ECONOMIC SANCTIONS:  
CONSEQUENCES AND COUNTERACTION.....5

*Surovitskaya G.V.*

INCREASING THE EFFICIENCY OF EDUCATIONAL  
ACTIVITIES OF UNIVERSITIES-PARTICIPANTS  
OF WORLD-CLASS SCIENTIFIC AND EDUCATIONAL CENTERS.....20

*Chebotarev S.S., Romanova A.V.*

BUILDING AN EFFECTIVE MOTIVATION SYSTEM  
AS A WAY TO MANAGE THE INNOVATION PROCESS  
AT ENTERPRISES OF HIGH-TECH INDUSTRIES .....32

*Aikashev P.V., Cherusheva T.V., Zverovshchikova N.V.*

ANALYSIS AND MATHEMATICAL MODELING  
OF DISTRIBUTION OF ENGINEERING AND TECHNICAL  
SPECIALTIES GRADUATES OF PENZA STATE UNIVERSITY .....46

## SECTION 2. MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN THE TECHNIQUE

<b><i>Kostrov B.V., Khrunichev R.V.</i></b> STATISTICAL ANALYSIS OF THE REPLENISHMENT OF ENGINEERING PERSONNEL ON THE EXAMPLE OF THE RYAZAN REGION.....	58
<b><i>Mikhailishin V.V.</i></b> SEGMENTATION OF ELECTRONIC PLANOGRAMS BY MEANS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE .....	75
<b><i>Trundaev I.V.</i></b> SOFT CONTROL OF A NON-LINEAR ECONOMIC SYSTEM .....	84
<b><i>Beketov S.M., Dergachev M.V., Redko S.G.</i></b> MODEL FOR THE FORMATION OF A PROJECT TEAM COMPOSITION BASED ON DISCRETE OPTIMIZATION METHODS .....	101
<b><i>Ksenofontov M.A.</i></b> METHODOLOGY OF PRECLINICAL CHARACTERISTICS STUDIING THE MOBILITY NODE OF HIP JOINT ENDOPROSTHESES BASED ON MATHEMATICAL MODELING.....	114
<b><i>Generalova A.A., Nikulin A.A., Bychkov D.S.</i></b> SIMULATING MACHINING OF CONTINUOUSLY VARIABLE TRANSMISSION PULLEYS IN COMPLEX BLADE TOOL TRAJECTORY IN ANSYS SOFTWARE PACKAGE.....	125
<b><i>Pechalin N.D., Finogeev A.G.</i></b> ALGORITHM FOR ASSESSING TIME AND COST RISKS AT ENTERPRISES OF THE MILITARY-INDUSTRIAL COMPLEX .....	138

# Раздел 1 МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ЭКОНОМИКЕ И УПРАВЛЕНИИ

## Section 1 MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN ECONOMICS AND MANAGEMENT

---

УДК 332, 339  
doi: 10.21685/2227-8486-2025-1-1

### АНТИРОССИЙСКИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ САНКЦИИ: ПОСЛЕДСТВИЯ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ

**В. А. Скворцова<sup>1</sup>, А. О. Скворцов<sup>2</sup>**

<sup>1, 2</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
<sup>1</sup>va\_skvortsova@mail.ru, <sup>2</sup>v\_skv@bk.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* В последние десятилетия санкционная политика приобрела особое значение в международной конкуренции, этим обусловлена актуальность исследуемой проблемы. Целями исследования являются выявление последствий и определение мер противодействия экономическим антироссийским санкциям. *Материалы и методы.* Основанием исследования послужили методы дескриптивного анализа, системного анализа, единства исторического и логического, сравнительного анализа, фактические данные о введенных против России экономических санкциях и контрсанкциях со стороны России, официальные статистические данные о внешнеэкономической деятельности России (показатели экспорта и импорта за 2014–2023 гг.). *Результаты.* На основе анализа выявлены наиболее пострадавшие от санкций сектора и отрасли экономики России, определены задачи и направления экономического развития отечественной экономики в условиях санкционного давления со стороны зарубежных стран. *Выводы.* Введенные против России международные экономические санкции как оказывают негативное воздействие на отечественную экономику, так и формируют стимулы и создают возможности для ее развития и обеспечения устойчивости и самодостаточности на основе импортозамещения и диверсификации производства и внешнеэкономических связей.

**Ключевые слова:** санкции, экономические санкции, виды санкций, санкционная война, контрсанкции, импортозамещение, диверсификация

**Для цитирования:** Скворцова В. А., Скворцов А. О. Антироссийские экономические санкции: последствия и противодействие // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 1. С. 5–19. doi: 10.21685/2227-8486-2025-1-1

## ANTI-RUSSIAN ECONOMIC SANCTIONS: CONSEQUENCES AND COUNTERACTION

V.A. Skvortsova<sup>1</sup>, A.O. Skvortsov<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup>va\_skvortsova@mail.ru, <sup>2</sup>v\_skv@bk.ru

**Abstract.** *Background.* In recent decades, the sanctions policy has acquired special importance in international competition, which is why the issue under study is relevant. The purpose of the study is to identify the consequences and identify measures to counter economic anti-Russian sanctions. *Materials and methods.* The research was based on methods of descriptive analysis, systematic analysis, unity of historical and logical, comparative analysis, factual data on economic sanctions and counter-sanctions imposed on Russia by Russia, official statistical data on Russia's foreign economic activity (export and import indicators for 2014–2023). *Results.* Based on the analysis, the sectors and branches of the Russian economy most affected by sanctions have been identified, and the tasks and directions of economic development of the domestic economy in the context of sanctions pressure from foreign countries have been identified. *Conclusions.* The international economic sanctions imposed on Russia have both a negative impact on the domestic economy and create incentives and opportunities for its development and sustainability and self-sufficiency based on import substitution and diversification of production and foreign economic relations.

**Keywords:** sanctions, economic sanctions, types of sanctions, sanctions war, counter-sanctions, import substitution, diversification

**For citation:** Skvortsova V.A., Skvortsov A.O. Anti-russian economic sanctions: consequences and counteraction. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2025;(1):5–19. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-1-1

### *Введение*

Актуальность рассматриваемой темы обусловлена широким спектром применения экономических санкций в международных отношениях и их значительным влиянием на различные аспекты как мировой экономики, так и отдельных национальных экономик. Работа актуальна в контексте растущего санкционного давления на Россию и санкционных кампаний против ее партнеров.

Наибольшей эффективностью обладают экономические санкции, поскольку выключение государств из международного разделения труда наносит наиболее существенный удар по экономике [1]. Исходя из структуры антироссийских санкций, можно увидеть скрытые экономические цели их введения как средства конкурентной борьбы в международном масштабе – подрыв экономики и изоляция России в информационной, технологической, экономической и военной сферах, несмотря на политическую официальную цель.

### *Материалы и методы*

Применение дескриптивного метода в данном исследовании позволило дать характеристику фактического состояния, выявить тренды функционирования и развития анализируемого предмета. Применение методов системного анализа, единства исторического и логического позволило исследовать предмет анализа как сложное и многокомпонентное образование, в том числе в ретроспективном ключе, а также проанализировать угрозы для экономики

России с учетом негативного воздействия введенных экономических санкций и перспективы развития ее экономики. Для количественной оценки состояния внешнеэкономической составляющей функционирования экономики России под санкциями на основе статистического и сравнительного методов используются данные статистики Росстата.

### ***Обсуждение и результаты***

В последние десятилетия расширилась практика применения санкционных мер в международных отношениях против разных стран. В связи с этим усилился интерес к проблематике санкционной практики.

ООН под санкциями понимает принудительные меры, принимаемые Советом Безопасности ООН в отношении государства [2], несущего угрозу миру.

Наиболее полное исследование основ, содержания, направлений и издержек санкционной деятельности отражено в работе группы американских ученых Г. Хафбауэра, Дж. Шотта, К. Эллиотт и Б. Оегт «Новый анализ экономических санкций» [3, 4]. Авторы трактуют экономические санкции как «преднамеренные, вызванные действиями правительства меры по прекращению (или угрозы прекращения) традиционных торговых или финансовых отношений» с геополитическими целями, делая акцент на политическом аспекте санкционной политики [5].

Р. Пейп ключевой сущностной чертой санкций считает наличие политической цели [6]. Этой же позиции придерживается Д. Г. Балувев, утверждая, что исторический опыт применения санкционных механизмов подтверждает, что они могут быть прежде всего действенным политическим инструментом [7]. Г. Р. Григорян справедливо указывает на их использование в качестве средства конкурентной борьбы [8].

Таким образом, экономика и политика тесно связаны в вопросе применения санкционных мер. Довольно часто экономические мотивы маскируются или подменяются политическими целями, либо политические события используются как повод или предлог для введения санкций, которые фактически нацелены на ослабление или устранение конкурента в международной борьбе. Асимметрия в торговых отношениях или зависимость национальной экономики от отдельных товаров порождает возможность политических манипуляций заинтересованной стороны в отношении целевой страны. В результате возрастает значение санкций как экономического инструмента достижения политических целей.

Международные санкции претерпели изменения в ходе развития международных отношений. В настоящее время в отсутствие возможности разрешить имеющиеся противоречия вооруженным путем санкционные мероприятия приобрели характер взаимного давления. Введение политико-экономических санкций одной стороной противостояния вызывает введение ответных мер с другой стороны. Страна, подвергшаяся санкциям, принимает вызов и отвечает зеркально или асимметрично. По свидетельству Р. Н. Чанышева и И. Э. Исанова, это характеристика «санкционной войны» [5, 9].

Введение экономических санкций обычно означает наложение ограничений на экономическое взаимодействие с целевой страной или организацией. Цель экономических санкций может быть разной. Они могут быть направлены на изменение политики или действий целевого государства или организации,

достижение политических целей, укрепление безопасности или защиту прав человека.

Наиболее действенными санкционными инструментами являются торговые и финансовые меры, замораживание активов, визовые ограничения и запреты для лиц, принимающих ответственные государственные политические и бизнес-решения (табл. 1). Несмотря на различные сферы их воздействия, они имеют общие цели: активизировать неблагоприятные для национальной экономики факторы, противодействующие движению товарных, финансовых и людских потоков, снижающие эффективность ее функционирования, ведущие к падению уровня жизни населения, сдерживающие развитие.

Таблица 1

Виды международных экономических санкций [10]

Критерий	Виды санкций
По направленности/цели	Коммерчески/торговые, финансовые санкции
По объекту	Прямые и непрямые санкции
По объему	Всеобъемлющие и адресные/целевые/точечные санкции
По охвату участников	Односторонние и многосторонние/коллективные санкции
По степени воздействия	Блокирующие и ограничительные санкции
По уровню	Персональные, корпоративные, секторальные, региональные санкции

К основным методам ведения торговой войны относятся: введение новых или дополнительных импортных тарифов, увеличение ставок действующих пошлин на импортные товары, введение импортных запретов, увеличение экспортных квот, введение лимитов поставок, различные виды демпинга, исключительные меры – экономическая блокада и эмбарго (табл. 1).

Очевидно, что страны, прямо или косвенно втянутые в торговые конфликты, предпринимают ответные меры и вынуждены проводить оборонительные зеркальные действия, использовать введение мер нетарифного регулирования, изменение технических и санитарных норм, усложнение процесса выдачи лицензий и др.

Введение антироссийских санкций оправдывалось такими причинами, как нарушение международного права, прав человека и др. Санкции были введены как ответ на конкретные политические действия России, так и в качестве средства давления для изменения ее политики. Отраслевые санкции против России представлены в табл. 2.

Таблица 2

Санкции, введенные против России [2]

Отрасль экономики	Список санкций
1	2
Нефтегазовая	Запрет на экспорт в Россию нефте- и газодобывающего оборудования, технологий нефтедобычи и нефтепереработки. Замораживание существующих и отказ от новых проектов
Энергетическая	Запрет на поставки, техническую поддержку и инвестиции для энергетической отрасли

1	2
Банковская	Замораживание финансовых активов российских юридических и физических лиц, резервов Банка России. Отключение России от международных платежных систем. Ограничение на размещение средств в западных банках и доступа к кредитным ресурсам
Оборонная	Запрет на технологическую и военную кооперацию. Ограничение экспорта и импорта оружия и военной техники. Контроль за экспортом товаров и технологий двойного назначения

***Хронология применения антироссийских санкций  
и ответные меры на них в 2020–2024 гг.***

В 2020 г. одной из самых значимых санкций против России была блокировка доступа к финансовым ресурсам и активам нескольких российских олигархов и предприятий, коммерческие и экономические санкции были введены против ряда отраслей российской экономики (энергетика, финансы и оборонная промышленность).

Ответом на это правительства России были ограничения импорта и запрет на экспорт ключевых товаров и ресурсов из России. Кроме того, Россия активно развивает свою собственную экономику и работает над диверсификацией своих торговых партнеров.

В 2021 г. санкции США и Европейского Союза включали ограничения на ввоз ряда товаров из России, финансовые санкции, а также запрет на сотрудничество с рядом российских компаний и бизнесменов.

В ответ на эти санкции Россией были введены контрсанкции для западных компаний и граждан. Это включало запрет на въезд в Россию, конфискацию активов, а также запрет на сотрудничество с российскими компаниями и организациями. Кроме того, Россия активно ищет новых партнеров в других странах, чтобы снизить свою зависимость от западных рынков и инвестиций. Это включает развитие торговых и экономических связей с Китаем, Индией, странами БРИКС и другими государствами [12, с. 89].

Признание независимости ДНР и ЛНР в 2022 г. и последующий конфликт на Украине стали основными катализаторами очередного витка антироссийских санкций. В 2022 г. основными антироссийскими санкциями были следующие:

1) санкции со стороны США в ответ на участие России в конфликте на Украине и инкриминируемую ей роль в проведении кибератак на западные страны включали запрет на экспорт некоторых товаров и технологий, а также ограничения в области финансов и энергетики;

2) европейские санкции, вызванные нарушением прав человека и политической ситуацией в России, включали запрет на въезд некоторым российским чиновникам, замораживание активов и ограничения в сфере экспорта и импорта;

3) санкции ООН включали ограничение на использование некоторых российских военных технологий, а также запрет на экспорт некоторых товаров и услуг.

В ответ Россия приняла ряд мер, направленных на защиту своих интересов и минимизацию негативных последствий санкций:

1) повышение экономической самодостаточности: Россия активно разрабатывает и внедряет программы по развитию отечественного производства, включая сельское хозяйство, промышленный сектор и научные исследования;

2) развитие новых торговых и экономических связей: Россия активно ищет новых партнеров и рынки для сотрудничества в обход санкций, включая страны Восточной Европы, Африки, Азии и Латинской Америки;

3) диверсификация экспорта: Россия старается развивать такие отрасли, как информационные технологии, машиностроение и туризм, имеющие экспортный потенциал;

4) дипломатические и политические шаги: Россия стремится представить свою позицию и смягчить эффект антироссийских санкций.

Основные антироссийские санкции за 2023 г. включали в себя следующие меры:

1. Ограничения в сфере торговли и экономики. Западные страны ввели ограничения на импорт российских товаров и услуг в секторах энергетики, финансов, оборонной и авиационной промышленности. Российские компании столкнулись с проблемами доступа к международным рынкам, что привело к сокращению экспорта и снижению инвестиций.

2. Ограничения на финансовые операции. Были введены санкции, запрещающие российским банкам и компаниям обращаться к международным финансовым рынкам. Это создало сложности для российских организаций в обслуживании и погашении внешнего долга, в доступе к финансовым ресурсам и кредитам.

3. Ограничения на перемещение лиц. Были введены запреты на въезд российских официальных лиц и бизнесменов в некоторые страны. Это усложнило деловые контакты и способствовало изоляции России на международной арене.

4. Военные ограничения. Ряд стран прекратили военное сотрудничество с Россией и отменили или заморозили поставки вооружений и оборонных технологий. Это повлияло на безопасность и обороноспособность страны.

В ответ на антироссийские санкции Россия приняла ряд ответных мер:

1. Введение контрсанкций. Россия ввела собственные санкции в отношении стран, введших ограничительные меры против нее: запрет на импорт определенных товаров, отказ в лицензировании деятельности на территории России, ограничения на доступ к российским рынкам.

2. Развитие экономической самодостаточности. Россия активно работала над укреплением своих внутренних ресурсов и обеспечением экономической самодостаточности. Были предприняты шаги для расширения экспорта на другие рынки, развития национальных технологий и привлечения иностранных инвестиций.

3. Поиск новых международных партнеров. Россия активно искала новых международных партнеров в Азии, Латинской Америке и других регионах. Она стремилась развивать отношения с другими государствами, чтобы смягчить влияние антироссийских санкций.

4. Повышение уровня безопасности. В результате антироссийских санкций Россия уделяла особое внимание повышению своей обороноспособности

и безопасности. Были разработаны новые программы военной модернизации и применены усилия по созданию собственных компонентов вооружений и технологий.

Одной из основных антироссийских санкций, с которой Россия столкнулась в 2024 г., было ограничение доступа к международным финансовым рынкам. Это существенно затруднило возможности российских компаний и государственных структур в получении кредитов и привлечении инвестиций из-за рубежа. Кроме того, санкции повлекли за собой значительное сокращение экспорта российских товаров, что сказалось на общей экономической ситуации в стране.

Еще одной серьезной антироссийской санкцией было введение запретов на технологическую и военную кооперацию с Россией. Это привело к отказу от поставок современного оружия и технологий.

Однако Россия ответила на эти санкции собственными мерами. С целью диверсификации экономики и снижения зависимости от международных финансовых рынков были приняты реформы, направленные на развитие отечественного производства и привлечение инвестиций из других регионов. Кроме того, были активизированы региональные экономические интеграционные процессы, например, в рамках Евразийского экономического союза.

Что касается ограничений в технологической и военной сферах, Россия нашла альтернативные источники поставок и развила внутренние производственные мощности. Благодаря этому удалось обеспечить независимость военно-промышленного комплекса и создать новые инновационные технологии, которые позволили компенсировать потери от запретов.

Экономические санкции оказывают двойственное влияние на российскую экономику. Они могут приводить к снижению объемов внешней торговли, сокращению прямых иностранных инвестиций, осложнению доступа российских компаний к зарубежным капиталам и технологиям, росту инфляции, падению валютного курса и снижению уровня жизни населения. С другой стороны, санкции могут способствовать развитию экономики России, ускоренной разработке технологий, внедрению импортозамещения [13, 14].

Снижение объемов внешней торговли России в 2015–2016 гг. объясняется в первую очередь геополитической ситуацией, в последующие годы происходит рост экспорта и импорта (рис. 1, 2).

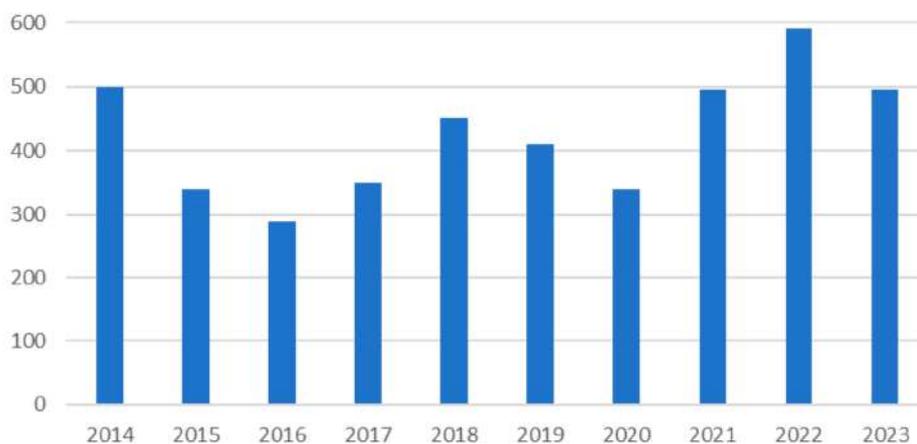


Рис. 1. Динамика российского экспорта в 2014–2023 гг., млрд долл. [15, с. 35]

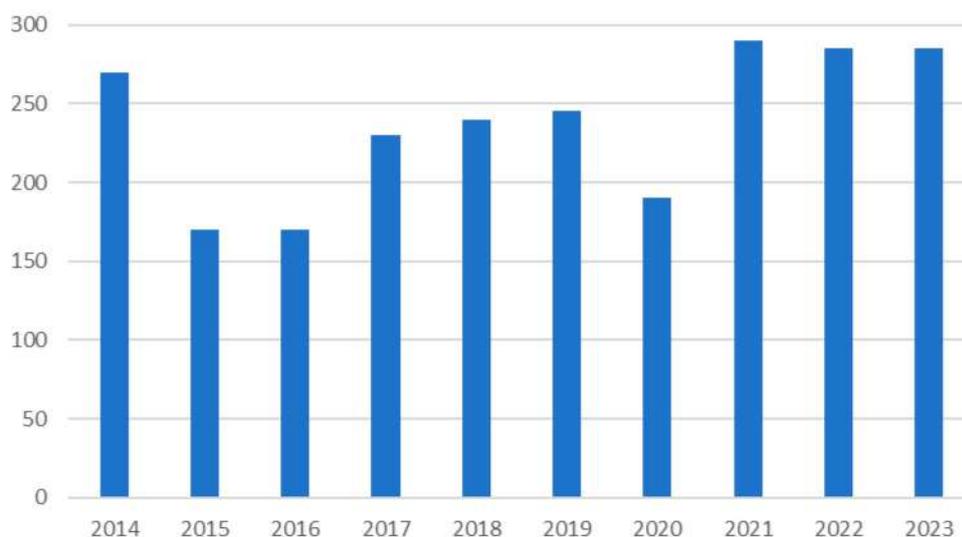


Рис. 2. Динамика российского экспорта в 2014–2023 гг., млрд долл. [15, с. 36]

Очередное снижение обоих показателей в 2020 г. связано, скорее, с пандемией коронавируса и всеобщим закрытием границ, чем с санкциями [11]. Снижение импорта в 2022 г. нельзя назвать критичным [15, с. 36].

Значительных изменений объемов экспорта и импорта не произошло, поскольку одни страны снижали экспорт, но увеличивали импорт из России, другие страны увеличивали и экспорт, и импорт. Помимо этого, российские производители расширили торговлю со странами, не вводившими санкции [11].

### ***Проблемы и перспективы развития отраслей экономики России в условиях санкций***

В условиях международных экономических санкций Россия столкнулась с серьезными экономическими вызовами. Введение санкций со стороны западных государств привело к ряду проблем, которые затронули различные отрасли нашей экономики [16].

Одной из отраслей, которая столкнулась с серьезными трудностями в период санкций, является энергетическая индустрия. Ограничения в сфере технологий и оборудования привели к тому, что многие энергетические проекты были заморожены или существенно замедлены. Это оказало негативное влияние на экономику России в целом, а также вызвало проблемы с энергоснабжением в некоторых регионах страны.

Однако Россия стремилась справиться с этим вызовом и реализовать свои потенциалы в энергетической отрасли. Она активно искала альтернативные пути развития и взаимодействия на международной арене. Страна усилила сотрудничество с Китаем и Индией, двумя гигантами в сфере энергетики. Российские компании активно заключали новые контракты на поставку энергоресурсов со своими партнерами из Азиатского региона. Это позволило установить стабильные и долгосрочные отношения, что, в свою очередь, обеспечило надежный рынок сбыта для российских энергетических компаний в условиях санкционных ограничений.

Кроме того, Россия продолжала активно разрабатывать свои энергетические ресурсы и совершенствовать существующую инфраструктуру. Это позволило увеличить экспортные возможности и диверсифицировать рынки сбыта энергоносителей.

В рамках санкционного периода Россия также активно развивала альтернативные виды энергии, такие как ветроэнергетика и солнечная энергетика. Несмотря на ограничения и препятствия, российские ученые и инженеры продолжали работу над новыми технологиями, что способствовало развитию экологически чистых источников энергии.

Индустрия сельского хозяйства также претерпела значительные изменения в условиях санкций. Ограничения на импорт сельскохозяйственной продукции существенно повлияли на рынок. Страна вынуждена искать замены для импортируемых товаров и увеличивать собственное производство, что требует времени и больших финансовых вложений. Это создает дополнительные трудности для развития сельского хозяйства и его конкурентоспособности на международном уровне.

Санкции создали серьезные вызовы для отечественных сельскохозяйственных предприятий. Некоторые фермеры и производители оказались перед выбором – либо кардинально перестроить свои бизнес-модели, либо прекратить деятельность. Но вместо того чтобы сдаться перед этими сложностями, многие российские фермеры решили принять вызов и использовать это время как возможность для развития и модернизации.

Произошло значительное перенаправление финансирования в отрасль сельского хозяйства с целью поддержки национального производства и снижения зависимости от импорта, перехода на новые рынки и расширения производственных возможностей. Были сделаны крупные инвестиции в исследования и разработки, объединение академического сообщества и сельскохозяйственных предприятий для совместной работы над новыми технологиями и методами. Продуктивность и эффективность в производстве сельскохозяйственной продукции выросли, а фермеры стали более конкурентоспособными на мировом рынке.

Санкции также стимулировали появление новых форм бизнеса в сельском хозяйстве. Малые и средние предприятия начали активно развиваться, предлагая инновационные решения в области переработки, упаковки и логистики сельскохозяйственной продукции. Были созданы сети фермерских рынков и интернет-магазины, которые способствовали прямому взаимодействию между потребителями и производителями.

Проблемы также затрагивают финансовый сектор. Ограничения на доступ к международным рынкам капитала привели к сокращению иностранных инвестиций и увеличению стоимости кредитования. Это затрудняет финансирование проектов и развитие малого и среднего бизнеса, что является одним из ключевых факторов для успешного развития экономики.

Одним из основных последствий санкций стало снижение ликвидности банковской системы России. Под ограничения попали операции с иностранными валютами, что вызвало необходимость проведения сложных операций с конвертацией и рисками валютного обмена. Банки столкнулись с увеличенным спросом на ликвидность, но с ограниченной возможностью получения новых ресурсов.

Другим значимым изменением в финансовом секторе России в период введения санкций стало усиление национализации. В результате ограничений доступа к международным финансовым рынкам компании были вынуждены обратиться к государственным институтам для получения финансирования. Это привело к увеличению роли государственных банков и возросшему влиянию государства на финансовые процессы.

Разнообразные меры поддержки и стимулирования экономики, принятые правительством и Центральным банком России, способствовали смягчению негативных последствий санкций для финансового сектора. Были предоставлены субсидии и гарантии банкам, осуществлено снижение ключевой процентной ставки, проведена стабилизация рубля.

Туристическая индустрия также пострадала от санкций. Ограничения на поездки в определенные страны и ухудшение общей репутации российского туризма послужили снижению численности иностранных туристов. Это привело к потере доходов от туризма и увеличению безработицы в сфере гостиничного и ресторанного бизнеса.

Одним из первых последствий санкций для туристической индустрии было сокращение числа иностранных туристов, поскольку экономическая нестабильность и политическое напряжение привели к ухудшению имиджа России на международной арене. Однако это стимулировало привлечение посетителей из внутреннего туристического рынка. Большое количество россиян переключили свое внимание с зарубежных направлений на отдых в родной стране.

Для разнообразия и повышения привлекательности туристических мест России в условиях санкций были предприняты шаги по модернизации и развитию инфраструктуры. Государство начало инвестировать в реконструкцию туристических объектов, что, в свою очередь, способствовало повышению комфорта и уровня сервиса для посетителей.

Развитие туризма в период санкций имело свои вызовы, в том числе в области международных платежей и маркетинга. Однако российские компании стали активнее привлекать туристов из ближнего зарубежья, сконцентрировав свои усилия на странах СНГ и Европейском союзе, где введенные санкции имели меньший эффект.

Санкции нанесли наибольший ущерб фармацевтической индустрии: практически половина всех лекарств, произведенных в странах, подвергшихся ограничениям, используется внутри страны (48,2 %). Химические вещества и продукты занимают второе место по уровню воздействия санкций (44,7 % конечного потребления), а производство самолетов, кораблей и железнодорожных локомотивов занимает третье место среди отраслей, пострадавших от санкций (32,2 %) [17]. В сфере автомобильной промышленности (27 %), производстве изделий из резины и пластмасс (26,8 %), бумажной отрасли (19,9 %) и электротехнической продукции (19,4 %) ощутимо присутствует зависимость от импортных поставок из стран, введших санкции [17].

Все эти проблемы требуют комплексных подходов и разносторонних решений. Для успешного развития отраслей экономики в условиях санкций России необходимо активно разрабатывать и внедрять новые технологии, повышать эффективность производства и улучшать качество продукции. Важно фокусироваться на развитии внутреннего потребительского рынка и поиске новых рынков сбыта для отечественных товаров и услуг.

Одной из перспективных отраслей экономики России является сельское хозяйство. В условиях санкций стране становится сложнее импортировать продукты питания, что открывает возможности для развития аграрного сектора. Инвестиции в сельское хозяйство, развитие новых технологий и повышение производительности могут помочь России стать самодостаточной в продовольственной сфере и даже стать экспортером сельскохозяйственной продукции.

Еще одной перспективной отраслью являются информационные технологии. Россия имеет огромный потенциал в этой области, и даже санкции не останавливают ее развитие. Многие российские IT-компании достигли мирового признания и продолжают разрабатывать инновационные продукты и услуги. Государственная поддержка в виде инвестиций и создание специальных технопарков может способствовать еще большему развитию отрасли.

Стоит отметить российский производственный сектор. Санкции могут ограничить доступ к некоторым импортируемым товарам и сырью, но одновременно создают возможности для развития отечественного производства. Замещение импорта, внедрение новых технологий и модернизация производственных мощностей могут способствовать росту конкурентоспособности российского производства.

Кроме того, санкции способствуют развитию внутреннего рынка. Отсутствие конкуренции со стороны иностранных производителей побуждает местные компании улучшать качество товаров и услуг, предлагать более привлекательные цены и условия. Это стимулирует рост потребительского спроса и внутреннего потребительского рынка.

Таким образом, антироссийские санкции имеют существенные последствия для экономики России, они создали проблемы для некоторых отраслей хозяйства. Ограничения на торговые и финансовые операции ведут к снижению объемов бизнеса и инвестиций, разрыв экономических связей с западными странами вызывает сокращение экспорта и импорта, а также затрудняет участие российских компаний в глобальных проектах. Однако благодаря активному поиску новых рынков сбыта и поддержке со стороны государства открываются перспективы для роста и развития экономики.

Россия ответила на санкции путем развития национальной экономики и совершенствования своей финансовой системы. Это включает создание новых промышленных кластеров, стимулирование развития высоких технологий, развитие малого и среднего бизнеса, а также привлечение иностранных инвестиций из стран, не участвующих в санкциях. Кроме того, правительство России активно разрабатывает и реализует программы по содействию экспорту российских товаров и услуг, а также по привлечению иностранных инвесторов.

### *Заключение*

Экономические санкции – один из важнейших инструментов, используемых государствами для воздействия на другие государства. Они представляют собой различные ограничительные меры, применяемые с целью изменить поведение страны-адресата в соответствии с желаниями государства-инициатора. Такое воздействие может принимать разные формы, включая запрет на импорт и экспорт товаров или услуг, финансовые ограничения, а также ограничения в сфере технологий и труда. Хронология применения

антироссийских санкций свидетельствует о том, что данный инструмент стал постоянным сопровождением международных экономических отношений. Исследование теоретических аспектов экономических санкций, анализ мотивов и целей применения санкций, изучение механизмов их действия, анализ их эффективности становятся все более актуальными.

Цели экономических санкций могут быть достаточно широкими и разнообразными. Они могут включать восстановление мира и стабильности в конфликтных регионах, защиту прав человека, демократизацию, предотвращение применения ядерного оружия или подавление терроризма. Санкции являются одним из средств внешней политики стран западной коалиции. В современном мире они активно используются в качестве инструмента давления на другие государства с целью изменения их политики. Важно отметить, что использование санкций должно быть обосновано и соответствовать международному праву. Западная коалиция стремится обеспечить легитимность своих действий и получить поддержку со стороны других государств. Однако санкции часто вызывают споры и критику со стороны как самой целевой страны, так и других акторов.

Санкции подчас не достигают своих целей и терпят неудачу [18]. Более того, санкции могут навредить не только целевой стране, но и другим государствам, регионам, населению, в том числе странам, иницирующим санкции или следующим в фарватере инициаторов, поскольку влекут дополнительные издержки для их экономик.

Санкции представляют серьезные вызовы для экономики России, но они также открывают новые возможности для развития отраслей. Россия может использовать эту ситуацию для разностороннего развития своей экономики, сокращения зависимости от внешних факторов и построения более устойчивой и конкурентоспособной экономической системы. Важной страховкой от нанесения ущерба санкциями национальной экономике остается реальная экономическая мощь, обеспечивающая возможности сдерживания их негативного влияния.

В сложившихся условиях Россия стремится:

- поддерживать стратегически важные для страны и населения отрасли (сельское хозяйство, оборонную отрасль);
- модернизировать структуру экономики и ее инфраструктуру, вводя в производство новейшие технологии, диверсифицировать производство;
- развивать отрасли, не подверженные влиянию санкций;
- укреплять свою финансовую систему;
- развивать внутренний потребительский рынок;
- искать новые рынки сбыта для отечественных товаров, сохраняя открытость экономики к внешним рынкам;
- выстраивать новые форматы международного сотрудничества и находить пути взаимодействия с другими государствами в условиях ограничений.

Период санкционной войны против России стал удобным, хотя и достаточно болезненным поводом для осознания необходимости диверсификации отечественного производства и внешнеэкономических связей, импортозамещения и ослабления зависимости от внешних поставок.

Импортозамещение и диверсификация являются инструментами достижения самодостаточности и конкурентоспособности отечественной экономики.

В перспективе последовательное использование этих инструментов потенциально приведет к долгосрочным выгодам с точки зрения усиления устойчивости и снижения уязвимости национальной экономики от внешних факторов.

### *Список литературы*

1. Ткаченко Е. Д. Понятие, цели, принципы применения экономических санкций в международной торговой практике // Молодая наука Сибири. 2020. № 2. С. 339–347.
2. Гармашова Е. П., Дребот А. М., Баранов А. Г. [и др.]. Санкции как меры международного принуждения: основные виды и теоретические подходы к понятию // Экономические отношения. 2020. Т. 10, № 3. С. 649–662.
3. Еремина А. Е. Экономические санкции: понятие, типология, особенности // Постсоветский материк. 2019. № 4. С. 78–93.
4. Hufbauer G. C., Schott J. J., Elliott K. A., Oegg B. Economic Sanctions Reconsidered / expanded ed. G. C. Hufbauer. 3rd ed. Washington, DC : Peterson Institute for International Economics, 2007. 233 p.
5. Чанышев Р. Н., Исанов И. Э. Феномен «санкционной войны» в системе современных международных отношений // Наука. Общество. Оборона. 2021. Т. 9, № 4. С. 29.
6. Pape R. Why Economic Sanctions Do Not Work? // International Security. 1997. Vol. 22, № 2. P. 90–136.
7. Балувев Д. Г. Эволюция экономических санкций как инструмента внешней политики: от Второй мировой войны до санкций против России // Международные процессы. 2014. № 3. С. 23–33.
8. Григорян Г. Р. Методологические основы оценки результативности применения внешнеэкономических санкций // Экономические отношения. 2019. № 4. С. 2793–2804.
9. Лебедев А. С. Антироссийские санкции в глобальной экономической войне // Вестник МГИМО-Университета. 2022. № 6. С. 26–35.
10. Бутакова Я. С. Анализ определения международных экономических санкций в современной науке // Теоретическая и прикладная юриспруденция. 2023. № 4. С. 35–42.
11. Логинова И. В., Титаренко Б. А., Саяпин С. Н. Экономические санкции против России // Актуальные вопросы экономических наук. 2015. № 47. С. 41–42.
12. Санталова М. С. Управление отношениями с инвесторами в условиях экономических санкций // Мировая экономика и международные отношения. 2018. № 4. С. 84–90.
13. Скворцова В. А., Скворцов А. О. Политика импортозамещения в России: причины, цели, этапы, уровни реализации // Научные труды Вольного экономического общества России. 2019. Т. 218, № 4. С. 537–543.
14. Скворцова В. А., Скворцов А. О. Импортозамещение: опыт других стран и уроки для России // Известия вузов. Поволжский регион. Экономические науки. 2015. № 1. С. 97–104.
15. Растворцев Е. Е., Побережец Е. А. Антироссийские санкции как фактор воздействия на социально-экономическое положение страны // Экономические стратегии. 2022. № 4. С. 33–38.
16. Алимова И. О., Темирбулатова И. Р., Казакова А. А., Афанасьева А. В. Влияние международных санкций на реальный сектор экономики России // Финансовый бизнес. 2023. № 12. С. 28–33.
17. Эксперты назвали самые уязвимые для санкций отрасли экономики России. URL: <https://www.rbc.ru/economics/18/03/2022/623323de9a79475581a199ea> (дата обращения: 10.02.2025).

18. Ягофарова И. Д. Показатели и критерии эффективности экономических санкций // Бюллетень инновационных технологий. 2024. № 2. С. 19–23.

### References

1. Tkachenko E.D. The concept, goals, principles of the application of economic sanctions in international trade practice. *Molodaya nauka Sibiri = Young Science of Siberia*. 2020;(2):339–347. (In Russ.)
2. Garmashova E.P., Drebot A.M., Baranov A.G. et al. Sanctions as measures of international coercion: main types and theoretical approaches to the concept. *Ekonomicheskie otnosheniya = Economic relations*. 2020;10(3):649–662. (In Russ.)
3. Eremina A.E. Economic sanctions: concept, typology, features. *Postsovetskiy materik = The post-Soviet continent*. 2019;(4):78–93. (In Russ.)
4. Hufbauer G.C., Schott J.J., Elliott K.A., Oegg B. *Economic Sanctions Reconsidered*. Expanded ed. G.C. Hufbauer. 3rd ed. Washington, DC: Peterson Institute for International Economics, 2007:233.
5. Chanyshev R.N., Isanov I.E. The phenomenon of the "sanctions war" in the system of modern international relations. *Nauka. Obshchestvo. Oborona = Science. Society. Defense*. 2021;9(4):29. (In Russ.)
6. Pape R. Why Economic Sanctions Do Not Work? *International Security*. 1997;22(2):90–136.
7. Baluev D.G. The evolution of economic sanctions as an instrument of foreign policy: from World War II to sanctions against Russia. *Mezhdunarodnye protsessy = International processes*. 2014;3:23–33. (In Russ.)
8. Grigoryan G.R. Methodological foundations for assessing the effectiveness of the application of foreign economic sanctions. *Ekonomicheskie otnosheniya = Economic relations*. 2019;(4):2793–2804. (In Russ.)
9. Lebedev A.S. Anti-Russian sanctions in the global economic war. *Vestnik MGIMO-Universiteta = Bulletin of MGIMO University*. 2022;(6):26–35. (In Russ.)
10. Butakova Ya.S. Analysis of the definition of international economic sanctions in modern science. *Teoreticheskaya i prikladnaya yurisprudentsiya = Theoretical and applied jurisprudence*. 2023;(4):35–42. (In Russ.)
11. Loginova I.V., Titarenko B.A., Sayapin S.N. Economic sanctions against Russia. *Aktual'nye voprosy ekonomicheskikh nauk = Actual issues of economic sciences*. 2015;(47):41–42. (In Russ.)
12. Santalova M.S. Managing investor relations in the context of economic sanctions. *Mirovaya ekonomika i mezhdunarodnye otnosheniya = World Economy and international relations*. 2018;(4):84–90. (In Russ.)
13. Skvortsova V.A., Skvortsov A.O. Import substitution policy in Russia: causes, goals, stages, levels of implementation. *Nauchnye trudy Vol'nogo ekonomicheskogo obshchestva Rossii = Scientific papers of the Free Economic Society of Russia*. 2019;218(4):537–543. (In Russ.)
14. Skvortsova V.A., Skvortsov A.O. Import substitution: the experience of other countries and lessons for Russia. *Izvestiya vuzov. Povolzhskiy region. Ekonomicheskie nauki = Proceedings of universities. Volga region. Economic sciences*. 2015;(1):97–104. (In Russ.)
15. Rastvortsev E.E., Poberezhets E.A. Anti-Russian sanctions as a factor affecting the socio-economic situation of the country. *Ekonomicheskie strategii = Economic strategies*. 2022;(4):33–38. (In Russ.)
16. Alimova I.O., Temirbulatova I.R., Kazakova A.A., Afanas'eva A.V. The impact of international sanctions on the real sector of the Russian economy. *Finansovyy biznes = Financial Business*. 2023;(12):28–33. (In Russ.)
17. *Eksperty nazvali samye uyazvimye dlya sanktsiy otrasli ekonomiki Rossii = Experts named the sectors of the Russian economy most vulnerable to sanctions*. (In Russ.)

Available at: <https://www.rbc.ru/economics/18/03/2022/623323de9a79475581a199ea> (accessed 10.02.2025).

18. Yagofarova I.D. Indicators and criteria for the effectiveness of economic sanctions. *Bulleten' innovatsionnykh tekhnologiy = Bulletin of Innovative Technologies*. 2024;(2):19–23. (In Russ.)

***Информация об авторах / Information about the authors***

**Валентина Алексеевна Скворцова**

доктор экономических наук, профессор,  
профессор кафедры социологии,  
экономической теории  
и международных процессов,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: va\_skvortsova@mail.ru

**Valentina A. Skvortsova**

Doctor of economical sciences, professor,  
professor of the sub-department  
of sociology, economic theory  
and international processes,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Алексей Олегович Скворцов**

кандидат экономических наук, доцент,  
доцент кафедры социологии,  
экономической теории  
и международных процессов,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: v\_skv@bk.ru

**Aleksey O. Skvortsov**

Candidate of economical sciences,  
associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of sociology, economic theory  
and international processes,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 11.11.2024**

**Поступила после рецензирования/Revised 25.01.2025**

**Принята к публикации/Accepted 29.01.2025**

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ УНИВЕРСИТЕТОВ-УЧАСТНИКОВ НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРОВ МИРОВОГО УРОВНЯ

Г. В. Суловицкая

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
Пензенский казачий институт технологий (филиал) Московского  
государственного университета технологий и управления имени К. Г. Разумовского  
(Первый казачий университет), Пенза, Россия  
gvs\_kachestvo@inbox.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* На современном этапе готовится переход на новую систему высшего образования Российской Федерации. Для обеспечения эффективности образовательной деятельности в этих условиях необходимо задействовать механизмы на базе институтов развития инновационной деятельности. К последним относятся научно-образовательные центры мирового уровня, потенциал которых в части повышения эффективности образовательной деятельности университетов-участников изучен не в полной мере. *Материалы и методы.* Для характеристики конкурентоспособности регионов-инициаторов научно-образовательных центров мирового уровня использованы некоторые показатели рейтинга инновационного развития субъектов Российской Федерации, формируемого Национальным исследовательским университетом «Высшая школа экономики», для характеристики конкурентоспособности университетов-участников – данные рейтинга «Образование» Национального рейтинга университетов, формируемого информационным агентством «Интерфакс», данные мониторинга эффективности вузов и данные независимой оценки условий осуществления образовательной деятельности, которая проводится соответствующим Общественным советом при Минобрнауки России. Вместе со сравнительным анализом конкурентоспособности регионов-инициаторов и университетов-участников научно-образовательных центров мирового уровня проанализировано содержание программ развития университетов. Исследования проведены в срезе научно-образовательного центра мирового уровня «Инженерия будущего». *Результаты.* В ходе стратегической оценки регионов-инициаторов создания данного научно-образовательного центра по итогам 2021 и 2022 гг. выявлены регионы со сравнительно высоким уровнем инновационного развития и высоким уровнем развития университетов-участников, дислоцированных на их территории. В программах развития ряда университетов отражены стратегические проекты, нацеленные на повышение эффективности образовательной деятельности за счет повышения уровня цифровой трансформации. *Выводы.* Научно-образовательные центры мирового уровня, созданные в рамках национального проекта «Наука и университеты», имеют хороший потенциал обеспечения эффективности образовательной деятельности университетов-участников в части образовательных программ, соответствующих направлениям научных проектов центров. Для университетов-участников эффективной может оказаться реализация актуализированных программ развития с позиций включения в стратегические проекты вузов мероприятий по трансформации образовательной деятельности в новых условиях.

**Ключевые слова:** университеты, образовательная деятельность, эффективность, научно-образовательный центр, регион

**Для цитирования:** Суrowицкая Г. В. Повышение эффективности образовательной деятельности университетов-участников научно-образовательных центров мирового уровня // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 1. С. 20–31. doi: 10.21685/2227-8486-2025-1-2

## **INCREASING THE EFFICIENCY OF EDUCATIONAL ACTIVITIES OF UNIVERSITIES-PARTICIPANTS OF WORLD-CLASS SCIENTIFIC AND EDUCATIONAL CENTERS**

**G.V. Surovitskaya**

Penza State University, Penza, Russia  
Penza Cossack Institute of Technology (branch) of the K.G. Razumovsky Moscow State  
University of Technology and Management (First Cossack University), Penza, Russia  
gvs\_kachestvo@inbox.ru

**Abstract.** *Background.* At the present stage, the transition to a new system of higher education in the Russian Federation is being prepared. To ensure the effectiveness of educational activities in these conditions, it is necessary to use mechanisms based on institutions for the development of innovative activities. The latter include world-class scientific and educational centers, the potential of which in terms of improving the effectiveness of educational activities of participating universities has not been fully studied. *Materials and methods.* To characterize the competitiveness of the regions-initiators of world-class scientific and educational centers, some indicators of the innovative development rating of the constituent entities of the Russian Federation, formed by the National Research University Higher School of Economics, were used; to characterize the competitiveness of the participating universities – data from the Education rating of the National University Ranking formed by the Interfax News Agency, data from monitoring the effectiveness of universities and data from an independent assessment of the quality of conditions for the implementation of educational activities, which is carried out by the relevant Public Council under the Ministry of Education and Science of Russia. Together with a comparative analysis of the competitiveness of the regions-initiators and universities-participants of world-class scientific and educational centers, the content of university development programs is analyzed. The research was conducted in the context of the world-class scientific and educational center "Engineering of the Future". *Results.* During the stratification of the regions-initiators of the creation of this scientific and educational center based on the results of 2021 and 2022, regions with a relatively high level of innovative development and a high level of development of the participating universities located on their territory were identified. The development programs of a number of universities reflect strategic projects aimed at improving the efficiency of educational activities by increasing the level of digital transformation. *Conclusions.* World-class scientific and educational centers created within the framework of the national project "Science and Universities" have good potential to ensure the efficiency of educational activities of the participating universities in terms of educational programs corresponding to the areas of scientific projects of the centers. For the participating universities, the implementation of updated development programs from the standpoint of including in the strategic projects of universities measures to transform educational activities in the new conditions may be effective.

**Keywords:** universities, educational activities, efficiency, scientific and educational center, region

**For citation:** Surovitskaya G.V. Increasing the efficiency of educational activities of universities-participants of world-class scientific and educational centers. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(1):20–31. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-1-2

### **Введение**

На современном этапе научно-образовательные центры мирового уровня, созданные в Российской Федерации в рамках Национального проекта «Наука и университеты», являются важным инструментом повышения эффективности механизмов управления инновационной деятельностью. С другой стороны, в настоящее время формируется новая система высшего образования страны, что обуславливает целесообразность диверсификации механизмов управления образовательной деятельностью вузов.

Существует ряд проблем, препятствующих развитию названных центров. Это обуславливает целесообразность диверсификации механизмов оценки результативности деятельности научно-образовательных центров мирового уровня, а также выявления ключевых проблем достижения целевых показателей [1]. При этом следует принять во внимание, что в отличие от научных центров мирового уровня [2] в состав научно-образовательных центров мирового уровня входят вузы, которые образуют своего рода образовательную составляющую этих центров.

В этой связи необходимо исследовать подходы к повышению эффективности образовательной деятельности университетов-участников научно-образовательных центров мирового уровня и ее взаимосвязь с инновационной деятельностью.

Важнейшим инструментом повышения эффективности образовательной деятельности университетов является их образовательная политика.

В работе [3] обосновывается целесообразность гармоничного сочетания всех видов политик, реализуемых в университете: образовательной, научной, планово-финансовой. В связи с этим их оптимизация должна осуществляться одновременно.

Ряд авторов, например в работе [4], исследовали вопросы повышения эффективности образовательной деятельности в рамках Болонской системы, т.е. при реализации программ бакалавриата и программ магистратуры. На современном этапе Российская Федерация готовится к переходу на новую систему высшего образования, в рамках которой необходимы новые подходы к формированию и реализации образовательной политики.

Университеты, подведомственные Минобрнауки России, разработали и приняли к реализации программы развития, одним из элементов которых является образовательная политика, отвечающая актуальным требованиям.

Рассмотрим основные инструменты, которые, по мнению исследователей, могут обеспечить эффективность образовательной деятельности.

С позиций повышения эффективности реализации научно-исследовательских проектов важнейшим направлением реализации образовательной политики университетов является формирование экосистемы проектного обучения с использованием разных форматов для формирования как профессиональных, так и «мягких» и «жестких» компетенций [5]. Причем преподавание профильных дисциплин важно организовывать так, чтобы формируемые при

этом управленческие компетенции имели комплексный характер и были востребованы далеко за рамками получаемой профессии [6]. Если ориентироваться на деятельность научно-образовательных центров мирового уровня, то важно раскрыть потенциал наставничества, в том числе при реализации научно-исследовательских проектов [7].

Важнейшим требованием актуальных федеральных образовательных стандартов высшего образования является развитие в университетах внутренней системы оценки качества образования, основным инструментом которого является анкетирование обучающихся и научно-педагогических работников. Здесь одним из инструментов оценки качества является оценка студенческой вовлеченности [8]. Кроме того, развитие данного направления нацелено на создание эффективных методик проведения соответствующих социологических исследований, например, на основе изучения цифровых следов в социальных сетях [9].

Внедрение современных цифровых технологий является важным направлением образовательной политики на современном этапе. При этом отмечается, что существуют серьезные исследования сферы высшего образования, но предпринимается очень мало усилий по включению результатов этих исследований в практическую образовательную деятельность [10].

Так, несмотря на широкий класс образовательных задач, с которыми искусственный интеллект успешно справляется, и достаточно высокие темпы внедрения, имеют место нехватка необходимых данных и недостаточный уровень развития инфраструктуры. Кроме того, необходима корректировка законодательства для обеспечения возможности оборота этих данных в образовании [11].

Участие университетов в проектах научно-образовательных центров мирового уровня создает предпосылки обмена опытом по различным аспектам управления вузом, включая управление образовательной деятельностью. С учетом влияния последней на процессы инновационного развития регионов дислокации.

Для выявления лучших практик управления образовательной деятельностью в вузах-участниках научно-образовательного центра мирового уровня необходимо провести сравнительный анализ их конкурентоспособности в данной сфере.

### ***Материалы и методы***

В качестве объекта исследования выделены вузы, являющиеся участниками научно-образовательного центра мирового уровня «Инженерия будущего» и находящиеся на территории регионов-инициаторов создания данного центра, т.е. на территории Самарской, Саратовской, Пензенской, Тамбовской, Ульяновской областей, Республики Мордовия, Чувашской Республики. Таких вузов 17. Из них девять вузов находятся на территории Самарской области – региона дислокации управляющей компании центра (АНО «Институт регионального развития» (г. Самара)), три вуза находятся на территории Ульяновской области, на территории других названных выше регионов находятся по одному вузу-участнику центра.

Для характеристики взаимного влияния уровня качества образовательной деятельности университетов-участников научно-образовательного центра мирового уровня «Инженерия будущего» и уровня инновационного развития регионов их присутствия использованы две группы нормированных показателей.

Первая группа содержит некоторые показатели рейтинга инновационного развития субъектов Российской Федерации [12], а именно:

- число научных, научно-технических и инновационных проектов, получивших федеральную поддержку;
- федеральное финансирование научных, научно-технических и инновационных проектов;
- доля молодых исследователей;
- численность студентов программ высшего образования на 10 тыс. человек;
- доля студентов программ высшего образования в области STEM.

Вторая группа включает некоторые показатели эффективности деятельности университетов:

- баллы рейтинга «Образование» Национального рейтинга университетов [13];
- доля доходов от образовательной деятельности в доходах вуза [13];
- показатели качества условий осуществления образовательной деятельности [15, 16].

Ряд исследуемых вузов – Самарский государственный аграрный университет, Самарский государственный институт культуры, Ульяновский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина – не представлены в рейтинге «Образование».

В ходе исследования проведен анализ программ развития охваченных университетов, в первую очередь с целью выявления стратегических проектов, нацеленных на повышение эффективности образовательной деятельности.

### *Результаты и обсуждение*

В табл. 1 представлены сводные данные по индексам, рассчитанным с использованием показателей рейтинга инновационного развития субъектов Российской Федерации по итогам 2021 и 2022 гг.

Таблица 1

Некоторые данные рейтинга инновационного развития субъектов Российской Федерации

Регион	Число научных, научно-технических и инновационных проектов, получивших федеральную поддержку		Федеральное финансирование научных, научно-технических и инновационных проектов		Доля молодых исследователей		Численность студентов программ высшего образования на 10 тыс. человек		Доля студентов программ высшего образования в области STEM	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Самарская область	0,538	0,461	0,434	0,510	0,824	0,731	0,520	0,511	0,532	0,562
Саратовская область	0,544	0,502	0,422	0,426	0,568	0,510	0,484	0,461	0,336	0,336

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Пензенская область	0,521	0,499	0,482	0,352	0,880	0,863	0,403	0,391	0,461	0,469
Тамбовская область	0,457	0,407	0,357	0,378	0,401	0,300	0,471	0,438	0,360	0,348
Ульяновская область	0,409	0,434	0,367	0,377	0,591	0,597	0,480	0,473	0,445	0,441
Республика Мордовия	0,449	0,437	0,458	0,399	0,469	0,736	0,528	0,518	0,290	0,292
Чувашская Республика	0,369	0,357	0,340	0,269	0,817	0,681	0,479	0,480	0,366	0,368

Анализ табл. 1 показал, что лидером исследуемой группы регионов в срезе выделенных показателей инновационного развития является Самарская область (ее суммарный показатель инновационного развития примем за 1).

Хорошую конкурентоспособность в данной группе демонстрирует Пензенская область (0,965 в 2021 г., 0,928 в 2022 г.). Наибольший рост нормированного показателя показала Республика Мордовия (0,777 в 2021 г., 0,858 в 2022 г.).

У четырех из семи (57 %) регионов имеет место снижение нормированного показателя в 2021 г. по сравнению с 2022 г.

В табл. 2 представлены нормированные в пределах группы исследуемых вузов значения показателей эффективности образовательной деятельности за те же периоды.

Таблица 2

Некоторые показатели эффективности образовательной деятельности вузов-участников

Вуз-участник научно-образовательного центра мирового уровня «Инженерия будущего»	Данные рейтинга «Образование»		Данные мониторинга эффективности вузов		Результаты независимой оценки
	2021	2022	2021	2022	независимо от года
1	2	3	4	5	6
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева	0,939	0,888	0,917	0,901	0,983
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева	0,922	0,909	0,908	0,922	0,968
Пензенский государственный университет	1,000	1,000	0,932	0,955	1,000
Поволжский государственный университет сервиса	0,752	0,742	0,069	0,088	0,995
Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики	0,776	0,729	0,282	0,211	0,906
Самарский государственный аграрный университет	нет данных		0,112	0,140	0,962

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6
Самарский государственный институт культуры	нет данных		0,093	0,090	0,958
Самарский государственный медицинский университет	0,719	0,714	0,518	0,545	0,996
Самарский государственный технический университет	0,922	0,906	1,000	1,000	0,981
Самарский государственный университет путей сообщения	0,753	0,752	0,353	0,379	0,987
Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина	0,863	0,885	0,597	0,618	0,985
Тамбовский государственный технический университет	0,906	0,878	0,329	0,354	0,969
Тольяттинский государственный университет	0,865	0,828	0,477	0,452	0,968
Ульяновский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина	нет данных		0,148	0,158	0,928
Ульяновский государственный технический университет	0,745	0,744	0,313	0,333	0,988
Ульяновский государственный университет	0,921	0,851	0,961	0,664	0,967
Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова	0,936	0,942	0,833	0,889	0,998

Как видно из табл. 2, лидером в срезе данных Национального рейтинга университетов (частный рейтинг «Образование») и данных независимой оценки качества условий осуществления образовательной деятельности является Пензенский государственный университет; в срезе данных мониторинга эффективности вузов – Самарский государственный технический университет.

На рис. 1 и 2 показаны сводные результаты анализа.

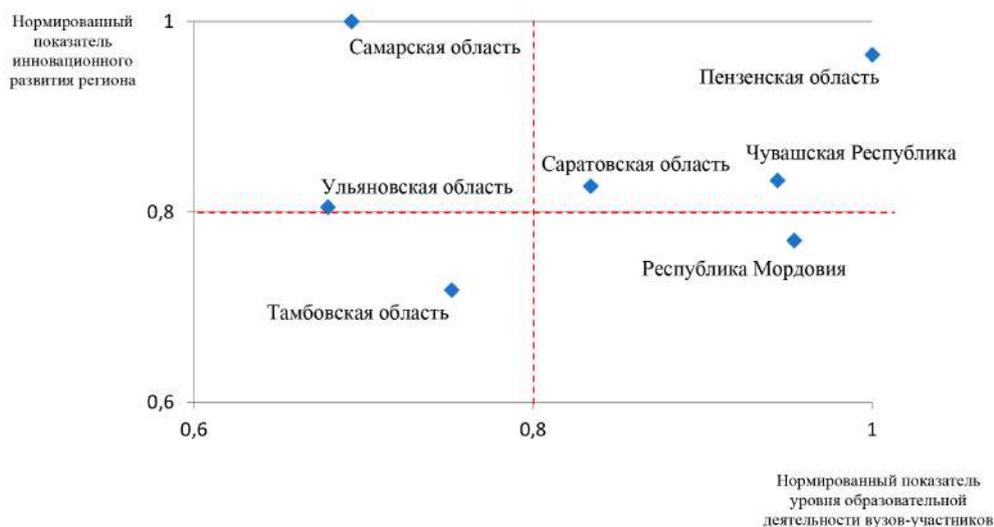


Рис. 1. Стратификация регионов по итогам 2021 г.

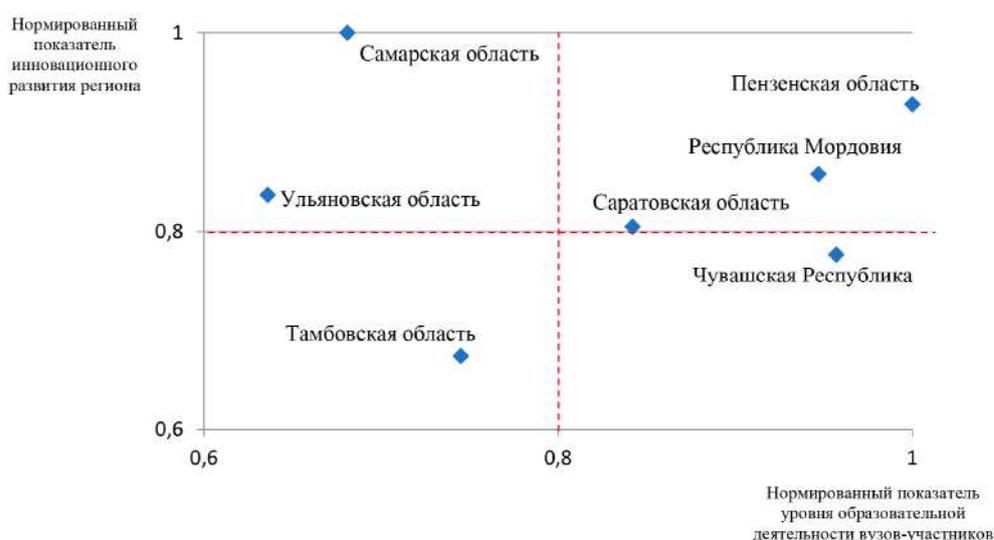


Рис. 2. Стратификация регионов по итогам 2022 г.

Здесь интервал возможных значений нормированных показателей разбит на две части: 1,0–0,8 – очень высокий уровень конкурентоспособности; 0,6–0,8 – высокий уровень конкурентоспособности.

Как видно по рис. 1 и 2, в сфере высшего образования не наблюдается заметных прорывов в анализируемом периоде. С позиций изучения опыта лучших практик целесообразно обратить внимание на опыт Пензенского государственного университета.

Анализ программ развития показал целесообразность актуализации образовательной политики университетов в соответствии с формирующейся в настоящее время новой системой высшего образования страны.

В ходе анализа программ развития исследуемых университетов выявлены следующие стратегические проекты, нацеленные на повышение эффективности образовательной деятельности:

- стратегический проект Пензенского государственного университета «Интеллектуальная научно-образовательная среда» (создание механизмов индивидуализации обучения и повышения эффективности управления учебным и научно-исследовательским процессами для всех уровней образования за счет использования технологий искусственного интеллекта, достижение статуса системообразующего университета в области научно-исследовательской деятельности обучающихся и молодых ученых на региональном уровне);

- стратегический проект Тольяттинского государственного университета, в рамках которого планируется создание центра компетенций по педагогическому дизайну и анализу учебного поведения, реинжиниринг ряда процессов образовательной деятельности с использованием цифровых технологий;

- стратегический проект Ульяновского государственного университета по формированию пространства выбора за счет разработки и внедрения гибких индивидуальных образовательных траекторий успешности обучающихся; формированию платформы образовательной деятельности для разработки образовательных механизмов гибких индивидуальных образовательных траекторий, включая цифровое сопровождение через рекомендательный сервис, сбор

и анализ цифрового следа, цифровые профили курса, студента, научно-педагогического работника и др.

В составе регионов-учредителей научно-образовательного центра мирового уровня «Инженерия будущего» не наблюдается регионов с невысоким уровнем развития инновационной или образовательной составляющих. Для поддержания уровня конкурентоспособности в ходе формирования новой системы высшего образования страны эффективность образовательной деятельности университетов должна стать одной из составляющих деятельности центров.

Особенностью научно-образовательных центров мирового уровня является использование механизмов управления деятельностью, отличающихся от применяемых в ряде университетов и нацеленных на реализацию современных принципов управления. Это позволяет при необходимости диверсифицировать механизмы управления деятельностью участников центров.

Обмен опытом лучших практик университетов-участников научно-образовательных центров мирового уровня целесообразно осуществить в отношении образовательных программ высшего образования, так или иначе связанных с научными проектами центров.

Для реализации потенциала научно-образовательных центров мирового уровня в части повышения эффективности образовательной деятельности университетов важно сформировать механизмы диагностики процессов управления. Методологической базой в этом случае может стать методология диагностики бизнес-процессов АНО «Роскачество».

### ***Заключение***

В ходе проведенного исследования установлено, что научно-образовательные центры мирового уровня имеют хороший потенциал для формирования на их основе механизмов повышения эффективности образовательной деятельности университетов-участников.

Реализация данного потенциала будет способствовать обеспечению эффективности новой системы высшего образования страны.

### ***Список литературы***

1. Кузнецова Е. П., Иванов С. Л. Научно-образовательные центры мирового уровня: значение для инновационного развития России // Организатор производства. 2023. Т. 31, № 1. С. 102–115. doi: 10.36622/VSTU.2023.92.50.008
2. Белов Ф. Д., Зволинская О. В., Гутковская Е. А., Клубникина М. Э. Результаты деятельности научных центров мирового уровня: итоги за 2023 г. // Управление наукой и наукометрия. 2024. Т. 19, № 3. С. 612–636. doi: 10.33873/2686–6706.2024.19-3.612-636
3. Михайлов Н. Н., Владимирский Б. М. Формирование образовательной политики вуза и ее реализация в современных условиях // Высшее образование в России. 2015. № 5. С. 20–26.
4. Князев С. Т., Третьяков В. С., Неволлина А. Л. Образовательная политика как инструмент модернизации образовательной деятельности // Университетское управление: практика и анализ. 2016. № 102. С. 26–34.
5. Певная М. В., Боронина Л. Н., Кульминская А. В. Актуальные вопросы реализации проектного обучения в высшей школе // Высшее образование в России. 2024. Т. 33, № 12. С. 142–154. doi: 10.31992/0869-3617-2024-33-12-142-154
6. Гребнев Л. С. «Образование в законе» и законы в образовании // Высшее образование в России. 2024. Т. 33, № 12. С. 155–168. doi: 10.31992/0869-3617-2024-33-12-155-168

7. Кулагин О. И., Гладких Е. Г., Казаковцева О. С. [и др.]. Анализ практик наставничества в науке // Университетское управление: практика и анализ. 2024. Т. 28, № 3. С. 123–135. doi: 10.15826/umpra.2024.03.029
8. Малошонов Н. Г. Студенческая вовлеченность как инструмент оценки качества образования в российских университетах // Университетское управление: практика и анализ. 2023. Т. 27, № 2. С. 45–58. doi: 10.15826/umpra.2023.02.012
9. Криштал М. М., Богданова А. В., Мягков М. Г., Александрова Ю. К. Цифровой след: оценка удовлетворенности студентов качеством образования // Высшее образование в России. 2024. Т. 33, № 2. С. 89–108. doi: 10.31992/0869-3617-2024-33-2-89-10
10. Резаев А. В., Степанов А. М., Трегубова Н. Д. Высшее образование в эпоху искусственного интеллекта // Высшее образование в России. 2024. Т. 33, № 4. С. 49–62. doi: 10.31992/0869-3617-2024-33-4-49-62
11. Давыдов С. Г., Матвеева Н. Н., Адемукова Н. В., Вичканова А. А. Искусственный интеллект в российском высшем образовании: текущее состояние и перспективы развития // Университетское управление: практика и анализ. 2024. № 28. С. 32–44. doi: 10.15826/umpra.2024.03.023
12. Абашкин В. Л., Абдрахманова Г. И., Артемов С. В. [и др.]. Рейтинг инновационного развития субъектов Российской Федерации / под ред. Л. М. Гохберга, Е. С. Куценко. М.: ИСИЭЗ ВШЭ, 2024. Вып. 9. 248 с.
13. Национальный рейтинг университетов. URL: <https://academia.interfax.ru/ru/ratings/?rating=1&year=2024&page=1> (дата обращения: 10.02.2025).
14. Информационно-аналитические материалы по результатам проведения мониторинга деятельности образовательных организаций высшего образования. URL: <https://monitoring.miccedu.ru/?m=vpo> (дата обращения: 10.02.2025).
15. Независимая оценка качества. URL: <https://minobrnauki.gov.ru/action/indcontrol/> (дата обращения: 10.02.2025).
16. Суровицкая Г. В. Особенности анализа деятельности университета с использованием показателей качества условий осуществления образовательной деятельности // Инновационные направления развития в образовании, экономике, технике и технологиях : сб. науч. ст. по материалам Нац. с междунар. участием науч.-практ. конф. Ставрополь, 2023. С. 33–36.

### References

1. Kuznetsova E.P., Ivanov S.L. World-class scientific and educational centers: importance for the innovative development of Russia. *Organizator proizvodstva = Production organizer*. 2023;31(1):102–115. (In Russ.). doi: 10.36622/VSTU.2023.92.50.008
2. Belov F.D., Zvolinskaya O.V., Gutkovskaya E.A., Klubnikina M.E. Results of world-class scientific centers: results for 2023. *Upravlenie naukoy i naukometriya = Management of science and scientometry*. 2024;19(3):612–636. (In Russ.). doi: 10.33873/2686-6706.2024.19-3.612-636
3. Mikhaylov N.N., Vladimirskiy B.M. Formation of the educational policy of the university and its implementation in modern conditions. *Vysshee obrazovanie v Rossii = Higher education in Russia*. 2015;(5):20–26. (In Russ.)
4. Knyazev S.T., Tret'yakov V.S., Nevolina A.L. Educational policy as a tool for modernizing educational activities. *Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz = University management: practice and analysis*. 2016;(102):26–34. (In Russ.)
5. Pevnaya M.V., Boronina L.N., Kul'minskaya A.V. Actual issues of project-based learning in higher education. *Vysshee obrazovanie v Rossii = Higher education in Russia*. 2024;33(12):142–154. (In Russ.). doi: 10.31992/0869-3617-2024-33-12-142-154
6. Grebnev L.S. "Education in law" and laws in education. *Vysshee obrazovanie v Rossii = Higher education in Russia*. 2024;33(12):155–168. (In Russ.). doi: 10.31992/0869-3617-2024-33-12-155-168

7. Kulagin O.I., Gladkikh E.G., Kazakovtseva O.S. et al. Analysis of mentoring practices in science. *Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz = University management: practice and analysis*. 2024;28(3):123–135. (In Russ.). doi: 10.15826/umpa.2024.03.029
8. Maloshonok N.G. Student engagement as a tool for assessing the quality of education in Russian universities. *Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz = University management: practice and analysis*. 2023;27(2):45–58. (In Russ.). doi: 10.15826/umpa.2023.02.012
9. Krishtal M.M., Bogdanova A.V., Myagkov M.G., Aleksandrova Yu.K. Digital footprint: assessment of student satisfaction with the quality of education. *Vysshee obrazovanie v Rossii = Higher education in Russia*. 2024;33(2):89–108. (In Russ.). doi: 10.31992/0869-3617-2024-33-2-89-10
10. Rezaev A.V., Stepanov A.M., Tregubova N.D. Higher education in the era of artificial intelligence. *Vysshee obrazovanie v Rossii = Higher education in Russia*. 2024;33(4):49–62. (In Russ.). doi: 10.31992/0869-3617-2024-33-4-49-62
11. Davydov S.G., Matveeva N.N., Ademukova N.V., Vichkanova A.A. Artificial intelligence in Russian higher education: current state and development prospects. *Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz = University management: practice and analysis*. 2024;(28):32–44. (In Russ.). doi: 10.15826/umpa.2024.03.023
12. Abashkin V.L., Abdрахманова G.I., Artemov S.V. et al. *Reyting innovatsionnogo razvitiya sub"ektov Rossiyskoy Federatsii = Rating of innovative development of the subjects of the Russian Federation*. Moscow: ISIEZ VShE, 2024;(9):248. (In Russ.)
13. *Natsional'nyy reyting universitetov = National University Ranking*. (In Russ.). Available at: <https://academia.interfax.ru/ru/ratings/?rating=1&year=2024&page=1> (accessed 10.02.2025).
14. *Informatsionno-analiticheskie materialy po rezul'tatam provedeniya monitoringa deyatel'nosti obrazovatel'nykh organizatsiy vysshego obrazovaniya = Information and analytical materials on the results of monitoring the activities of educational institutions of higher education*. (In Russ.). Available at: <https://monitoring.miccedu.ru/?m=vpo> (accessed 10.02.2025).
15. *Nezavisimaya otsenka kachestva = Independent quality assessment*. (In Russ.). Available at: <https://minobrnauki.gov.ru/action/indcontrol/> (accessed 10.02.2025).
16. Surovitskaya G.V. Features of the analysis of university activities using quality indicators of educational conditions. *Innovatsionnye napravleniya razvitiya v obrazovanii, ekonomike, tekhnike i tekhnologiyakh: sb. nauch. st. po materialam Nats. s mezhdunar. uchastiem nauch.-prakt. konf. = Innovative directions of development in education, economics, engineering and technology : collection of scientific articles based on the materials of the National and International Conferences. with the participation of a scientific and practical conference*. Stavropol', 2023:33–36. (In Russ.)

### **Информация об авторах / Information about the authors**

**Галина Владимировна Суровицкая**  
 доктор экономических наук, доцент,  
 начальник отдела менеджмента качества,  
 Пензенский государственный университет  
 (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);  
 профессор,  
 Пензенский казачий институт технологий  
 (филиал)  
 Московского государственного  
 университета технологий  
 и управления имени К. Г. Разумовского  
 (Первый казачий университет)  
 (Россия, г. Пенза, ул. Гагарина, 11а)  
 E-mail: gvs\_kachestvo@inbox.ru

**Galina V. Surovitskaya**  
 Doctor of economical sciences,  
 associate professor,  
 head of quality management department,  
 Penza State University  
 (40 Krasnaya street, Penza, Russia);  
 professor,  
 Penza Cossack Institute of Technology  
 (branch) of the K.G. Razumovsky  
 Moscow State University of Technology  
 and Management (First Cossack  
 University)  
 (11a Gagarin street, Penza, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /  
The author declares no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 25.11.2024**

**Поступила после рецензирования/Revised 06.02.2025**

**Принята к публикации/Accepted 18.02.2025**

## ПОСТРОЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ МОТИВАЦИИ КАК СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫМ ПРОЦЕССОМ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

С. С. Чеботарев<sup>1</sup>, А. В. Романова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт автоматической аппаратуры  
имени академика В. С. Семенихина, Москва, Россия

<sup>1</sup> Волжский государственный университет водного транспорта,  
Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> Объединенная приборостроительная корпорация, Москва, Россия  
<sup>1</sup> Stst57@yandex.ru, <sup>2</sup> a.rogozhina@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Рассматривается одна из актуальнейших задач в организациях высокотехнологичных отраслей по построению системы мотивации, позволяющая ускорить темпы развития российской экономики в условиях санкционного давления, дефицита человеческого капитала и ориентации на внутренние ресурсы и импортозамещение. Цель работы – показать возможность использования современных подходов к построению системы мотивации, направленных на ускорение инновационной деятельности предприятий высокотехнологичных отраслей промышленности. *Материалы и методы.* Методология проведения работы базируется на системном подходе, позволяющем использовать современные условия развития высокотехнологичных отраслей путем создания модели мотивации для управления инновационным процессом. *Результаты.* Показана необходимость перехода к эффективной системе мотивации с четкой количественной оценкой постоянного и переменного вознаграждения работников наукоемких предприятий, позволяющей раскрыть и увеличить потенциал работника. *Выводы.* В выводах отмечены последствия применения системы мотивации на ускорение инновационного процесса в высокотехнологичных отраслях промышленности.

**Ключевые слова:** высокотехнологичные отрасли промышленности, мотивация, вознаграждение, оценка, управление, инновационный процесс

**Для цитирования:** Чеботарев С. С., Романова А. В. Построение эффективной системы мотивации как способ управления инновационным процессом на предприятиях высокотехнологичных отраслей промышленности // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 1. С. 32–45. doi: 10.21685/2227-8486-2025-1-3

## BUILDING AN EFFECTIVE MOTIVATION SYSTEM AS A WAY TO MANAGE THE INNOVATION PROCESS AT ENTERPRISES OF HIGH-TECH INDUSTRIES

S.S. Chebotarev<sup>1</sup>, A.V. Romanova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Scientific Research Institute of Automatic Equipment  
named after academician V.S. Semenikhin, Moscow, Russia

<sup>1</sup> Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup> United Instrument-Making Corporation, Moscow, Russia

<sup>1</sup> Stst57@yandex.ru, <sup>2</sup> a.rogozhina@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The article is devoted to one of the most urgent tasks in organizations of high-tech industries to build a motivation system that allows accelerating the pace of development of the Russian economy in the face of sanctions pressure, a shortage of human capital and focus on domestic resources and import substitution. The purpose of the work: to show the possibility of using modern approaches to building a motivation system aimed at accelerating the innovative activities of enterprises in high-tech industries. *Materials and methods.* The methodology of work is based on a systematic approach that allows using modern conditions for the development of high-tech industries to manage the innovation process. *Results.* It shows the need to move to an effective motivation system with a clear quantitative assessment of the constant and variable remuneration of employees of high-tech enterprises, which allows to reveal and increase the potential of the employee. *Conclusions.* The conclusions noted the consequences of using a motivation system to accelerate the innovation process in high-tech industries.

**Keywords:** high-tech industries, motivation, remuneration, evaluation, management, innovation process

**For citation:** Chebotarev S.S., Romanova A.V. Building an effective motivation system as a way to manage the innovation process at enterprises of high-tech industries. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2025;(1):32–45. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-1-3

### **Введение**

В высокотехнологичных отраслях промышленности России (в первую очередь в оборонно-промышленном комплексе (ОПК)) сегодня наблюдается значительная концентрация современных технологий как военного, так и гражданского назначения. Это связано с тем, что такие отрасли, как авиационная, космическая, ядерная, играют ключевую роль в технологическом прогрессе страны [1, 2].

Динамичное развитие организаций высокотехнологичных отраслей за последние годы позволило не только создать новые технологии, но и вывести на рынок конкурентоспособную продукцию. Это, в свою очередь, способствует укреплению позиций России на международной арене и повышению ее обороноспособности.

Этими организациями достигнуты устойчивые темпы развития, превышающие показатели российской экономики в целом. Наибольшую долю в отраслевой структуре таких предприятий занимают предприятия радиоэлектронного комплекса (38,5 %) и авиационной промышленности (19,7 %) [3].

Производственно-технологическое развитие высокотехнологичных предприятий является необходимым условием решения задач, стоящих перед Российской Федерацией в области обеспечения обороны страны и безопасности государства. Его конечная цель – обеспечение оснащения Вооруженных Сил РФ (ВС РФ), а также иных силовых структур современными образцами, видами вооружений, военной и специальной техники (ВВСТ) на базе новых технологий в требуемых количествах в заданные сроки [4].

Управление человеческими ресурсами в высокотехнологичных отраслях промышленности действительно играет критически важную роль в обеспечении их успешного функционирования и развития. Эффективное управление кадрами позволяет не только привлекать и удерживать талантливых специалистов, но и максимально использовать их потенциал для достижения стратегических целей

предприятия. С учетом изменений в экономической и политической обстановке работодателям необходимо адаптировать свои подходы к управлению человеческими ресурсами [5].

### *Терминологический анализ*

С методологической точки зрения необходимо прежде всего упорядочить понятийный аппарат. Неверная трактовка понятий приводит к неверным суждениям и, соответственно, ошибочным выводам.

В данный момент в мире существует две наиболее авторитетных классификации высокотехнологичных отраслей промышленности: классификация Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) и классификация Организации Объединенных Наций по промышленному развитию (ЮНИДО) [6]. По методике ОЭСР к высокотехнологическим относят такие отрасли, в отгруженной продукции которых доля затрат на отраслевую науку составляет более 5 %. К средне-высокотехнологическим относятся отрасли, доли затрат на исследования и разработки в которых составляют 2,5 до 5 %, к средне-технологическим – от 1 до 2,5 %, к низкотехнологическим – ниже 1 %. Каждое государство, хотя и базируется на вышеуказанных методологиях, выдвигает свою концепцию сегментации рынка. В то же время пороговый показатель затрат на НИОКР в различных методологиях установлен на разном уровне и определить его реальное доленое значение в конкретной отрасли крайне трудно, учитывая факт использования продукции одной отрасли при производстве другой [7].

Согласно последним данным, классификация Росстата основана на методике ОЭСР [8]. Приказом Росстата от 15.12.2017 № 832 утверждена Методика расчета показателей «Доля продукции высокотехнологичных и наукоемких отраслей в валовом внутреннем продукте» и «Доля продукции высокотехнологичных и наукоемких отраслей в валовом региональном продукте субъекта Российской Федерации».

Согласно этой методике, «критерием отнесения к высокотехнологичным отраслям является высокий уровень технологического развития, определяемый по отношению затрат на НИОКР к валовой добавленной стоимости. Критерием отнесения отрасли к числу наукоемких служит доля лиц с высоким уровнем профессионального образования в численности работников». В этой же методике приведена классификация отраслей по следующим группам: отрасли высокого технологического уровня; отрасли среднего высокого технологического уровня, наукоемкие отрасли.

Можно привести неоднозначное понимание таких общеизвестных категорий, которые зачастую рассматриваются как синонимы. Наиболее часто в разных источниках употребляется понятие «инновация» как понятие, тождественное любому новшеству. В начале XX в. австрийский ученый Й. Шумпетер ввел понятие «нововведение» («новые комбинации»), под которым понимал процессы создания, освоения и распространения новых продуктов, новой технологии, новой организации промышленного производства [9].

### *Краткий обзор литературы*

Проведенный анализ показал, что ранее были проведены некоторые экономические исследования, в определенной мере приближающиеся к рассматриваемой в данной работе проблематике.

Так, например, И. В. Попова и Ю. Ю. Бокорев рассматривают возможность применения в наукоемких отраслях промышленности (в частности, в ОПК) дискриптивную модель мотивации и оплаты труда персонала. А. Е. Козлов в своих работах в качестве построения эффективной системы мотивации ориентируется на реализацию стратегических подходов в ОПК. А. Д. Боньани рассматривает методы и инструменты оценки мотивационных факторов специалистов высокотехнологичных предприятий в России и Иране [10].

Необходимо отметить, что были проведены очень важные исследования, касающиеся инноваций, таких ученых, как В. В. Воробьев, С. С. Голубев, В. Л. Гладышевский, П. А. Дроговоз, А. И. Каширин, Г. А. Лавринов, А. Ю. Мушков, Н. Н. Швец.

Однако разнообразие и многоаспектность качественных подходов привели к возникновению противоречий по поводу понятийного аппарата, разработанных методик и подходов, что обуславливает необходимость построения эффективной системы мотивации именно для предприятий высокотехнологичных отраслей промышленности.

### *Материалы и методы*

Основной целью исследования является ускорение инновационных процессов в аспекте новых моделей мотивации на предприятиях высокотехнологичных отраслей.

Научная проблема исследования – отсутствие стандартизированных моделей мотивации на предприятиях ОПК в части создания системы принятия решений для управления инновационными процессами, в том числе в управлении персоналом.

В качестве объекта исследования принята реализация инновационных процессов на основе построения эффективной системы мотивации, в качестве предмета – управление персоналом через систему мотивации.

Методологической и теоретической основами темы исследования явились фундаментальные концепции и положения, обоснованные и предложенные в отечественной и зарубежной экономической и специальной литературе по вопросам функционирования экономических систем рыночного и смешанного типов, национальной и экономической безопасности, устойчивого развития социально-экономической системы общества. Методология исследования базируется на субъективно-объективном, историко-логическом, логико-информационном и системном подходах к анализу, оценке и моделированию по критерию управляемости риска проблемной ситуации.

Система вознаграждения работников высокотехнологичного предприятия (прежде всего предприятия ОПК) действительно должна быть хорошо продуманной и ориентированной на рыночные условия. Оптимальная система компенсации включает в себя несколько ключевых аспектов, которые позволяют обеспечить конкурентоспособность и справедливость в вознаграждении сотрудников. Для этих целей необходимо использовать обзоры рынка заработной платы, закупка которых осуществляется у специализированных независимых консультантов. В случае отсутствия обзора рынка заработных плат необходимо производить изменения системы вознаграждения без увеличения уровня совокупного вознаграждения работников, в том числе при помощи изменения структуры дохода.

### *Современные условия развития высокотехнологичных отраслей*

Несмотря на сильный переток кадров в высокотехнологичные отрасли промышленности из гражданских, сохраняется потребность примерно в 160 тыс. специалистов, заявил первый вице-премьер Денис Мантуров на Петербургском международном экономическом форуме [11]. По словам министра промышленности и торговли Дениса Мантурова, один из ключевых вызовов для обрабатывающей промышленности в России – это нехватка высококвалифицированных специалистов, способных одновременно справляться с задачами наращивания объемов производства и обеспечения технологического суверенитета страны. Проблема актуальна для сектора, где занято около 10 млн человек, и, по прогнозам, к 2026 г. дефицит кадров может достигнуть 240 тыс. специалистов [11].

По словам Олега Морозова, главы комитета Госдумы по контролю, предприятия российских высокотехнологичных отраслей сталкиваются с серьезной нехваткой кадров, которая в ближайшее время может достичь 400 тыс. человек. Эта проблема подчеркивает необходимость разработки и внедрения комплексных стратегий по привлечению, подготовке и удержанию квалифицированных специалистов в высокотехнологичных секторах [12].

В 2023 г. уровень безработицы в России достиг исторического минимума, составив в январе 3,6 %, а к концу года снизившись до 2,9 %. По последним данным Росстата, в 2024 г. этот показатель продолжил снижаться и достиг 2,6 %. Однако, несмотря на низкий уровень безработицы, рынок труда сталкивается с серьезным дефицитом кадров, что стало одной из основных проблем для экономики страны.

Глава Центробанка Эльвира Набиуллина отметила, что нехватка квалифицированных специалистов негативно сказывается на экономическом развитии. Минпромторг также подчеркивает, что дефицит кадров является ключевым вызовом для промышленности, что требует разработки и реализации эффективных стратегий по подготовке и привлечению специалистов в различные отрасли [11, 13].

В современных условиях для наукоемких предприятий, работающих на государственные заказы в области инновационных видов ВВСТ, действительно критически важным становится не только наличие высококвалифицированных кадров, но и совершенствование управленческих подходов, направленных на формирование и развитие человеческого капитала [14].

Геополитические разногласия отразились на деятельности предприятий высокотехнологичных отраслей промышленности в виде новых задач и требований. Так, введено рекордное количество санкций, возникла необходимость в ориентации на внутренние ресурсы и импортозамещение, что требует от работников инновационной, интеллектуальной деятельности [15].

В условиях санкционного давления действительно важно активизировать инновационную деятельность предприятий высокотехнологичных отраслей, чтобы они могли создавать конкурентоспособную высокотехнологичную продукцию, которая не только соответствует зарубежным образцам, но и превосходит их.

Дальнейшее развитие высокотехнологичных отраслей в условиях санкционного давления требует активного внедрения инновационных технологий и программных мероприятий, направленных на использование производственного потенциала. Это не только поможет создать конкурентоспособную

продукцию, но и обеспечит устойчивое развитие отрасли в долгосрочной перспективе [16].

### ***Мотивация как источник ускорения инновационных процессов***

Мотивация и оплата труда персонала являются одними из ключевых элементов управления, необходимыми для эффективного функционирования наукоемкого предприятия и его инновационной активности в долгосрочной перспективе. Работодателю необходимо не только отобрать наиболее ценные кадры, но и сформировать значительный человеческий капитал. Работник же, в свою очередь, должен получать материальное и моральное удовлетворение от труда, поэтому заинтересован в размере оплаты труда и дополнительных материальных выплатах и поощрениях [5].

Предприятия ОПК испытывают острую потребность в эффективном инструментарии исследования трудовой мотивации для проведения адекватных изменений, направленных на ее совершенствование с целью повышения трудовой мотивации персонала.

Система мотивации работников предприятий высокотехнологичных отраслей промышленности должна строиться на следующих принципах [17]:

- прозрачность – способствует мотивации сотрудников и повышению их вовлеченности в рабочий процесс;

- ориентация на результат – является основополагающим принципом для высокотехнологичных предприятий и требует четкого и взвешенного подхода к системе вознаграждения работников; ориентация на результат в системе вознаграждения на высокотехнологичных предприятиях позволяет создать динамичный и мотивированный персонал, который активно стремится к выполнению как личных, так и корпоративных целей, что способствует устойчивому развитию и конкурентоспособности компании;

- взаимосвязь – создает основу для высокой продуктивности, вовлеченности и удовлетворенности работников, что в конечном итоге способствует успешному развитию компании;

- обеспечение рыночного уровня совокупного годового вознаграждения для работников высокотехнологического предприятия является критически важным аспектом управления человеческими ресурсами. Это не только привлекает высококвалифицированных специалистов, но и способствует их удержанию и мотивации на достижение результатов;

- дифференциация размера вознаграждения в зависимости от уровня должности, категории персонала, зоны ответственности и возможности влияния на результат является важным аспектом управления результатами в высокотехнологичных предприятиях.

Структура вознаграждения работников высокотехнологичных предприятий должна включать в себя:

- фиксированное вознаграждение – гарантированная часть заработной платы, состоящая из должностного оклада, стимулирующих и компенсационных доплат/надбавок;

- переменное вознаграждение – вознаграждение (премия), выплачиваемое работнику высокотехнологичного предприятия;

- пакет компенсаций и льгот – набор выплат, не связанных с количеством и качеством труда работника, порядок и размер компенсаций и льгот устанавливается в соответствии с законодательством Российской Федерации.

### *Система вознаграждения в высокотехнологичных отраслях*

Для того чтобы мотивировать работников на выполнение определенных задач, на законодательном уровне работодатель имеет право устанавливать различные системы мотивации (премирование, стимулирование и т.д.), при этом порядок и условия их применения работодатель устанавливает самостоятельно в положениях по оплате труда, коллективных договорах, соглашениях и иных локальных нормативных актах [17].

Ниже представлен вариант эффективной модели мотивации для работников высокотехнологичных отраслей промышленности, которая будет учитывать уровень ответственности и объем полномочий работников. Для этого целесообразно внедрить дифференцированный подход. Такой подход к определению размера премий с учетом уровня ответственности, объема полномочий, периодичности выплаты и условий невыплат является важным компонентом эффективной системы мотивации работников на высокотехнологичном предприятии. Он способствует повышению удовлетворенности, мотивации сотрудников, а также более активному участию в достижении стратегических целей компании.

Размер и соотношение фиксированного и переменного вознаграждения работника высокотехнологичного предприятия должны определяться в зависимости от категории персонала, к которой относится работник, и уровня занимаемой должности на основе исследования рынка заработных плат [18].

Переменное вознаграждение работников высокотехнологичных предприятий должно выплачиваться при условии достижения целевых значений ключевых показателей эффективности (КПЭ). Переменное вознаграждение должно включать в себя следующие виды премирования:

- премия за выполнение КПЭ;
- премия КПЭ «Оценка руководителя»;
- премия за реализацию проектов.

#### *Премия за выполнение КПЭ*

Размер премии за выполнение КПЭ необходимо рассчитывать по следующей формуле:

$$P_{\text{КПЭ}} = O_{\text{факт}} \cdot \%_{\text{цел}} \cdot K, \quad (1)$$

где  $P_{\text{КПЭ}}$  – выплачиваемый работнику расчетный размер премии за выполнение в отчетном периоде КПЭ, в рублях;  $O_{\text{факт}}$  – размер должностного оклада работника пропорционально отработанному времени за отчетный период, в рублях;  $\%_{\text{цел}}$  – целевой процент премии за выполнение КПЭ от должностного оклада, который работник смог бы получить при 100 % достижении КПЭ;  $K$  – интегральный показатель, отражающий размер премирования за выполнение КПЭ в отчетном периоде, в долях.

Размер должностного оклада работника пропорционально отработанному времени  $O_{\text{факт}}$  рассчитывается по следующей формуле:

$$O_{\text{факт}} = \sum (O_n \cdot t_{\text{фн}}) \cdot N / t_n, \quad (2)$$

где  $n$  – количество случаев изменения должностного оклада работника в отчетном периоде;  $N$  – количество полных месяцев отчетного периода для премирования указанной категории должности, определяемой при расчете премии за выполнение КПЭ;  $O_n$  – размер должностного оклада по полной ставке согласно штатному расписанию, действующий в отчетном периоде, в рублях

в месяц;  $t_{фн}$  – фактическое количество рабочих часов, отработанных работником согласно таблице рабочего времени в отчетном периоде, в котором действовал должностной оклад  $O_n$ . В расчет фактических часов включаются часы работы на рабочем месте, время работы в командировках, периоды обучения, сверхурочная работа, работа в выходные и праздничные дни (при одинарной оплате). Периоды работы в выходные и праздничные дни (при двойной оплате), отпусков, болезни и отсутствий на рабочем месте без уважительной причины в расчет не включаются;  $t_n$  – норма рабочих часов по производственному календарю в отчетном периоде при 40-часовой рабочей неделе.

Интегральный показатель выполнения КПЭ ( $K$ ) – средневзвешенное значение показателей, отражающих выполнение КПЭ, рассчитывается по следующей формуле:

$$K = \sum n (K_i W_i), \quad (3)$$

где  $K$  – интегральный показатель выполнения КПЭ, в единицах;  $K_i$  – коэффициент премирования за выполнение  $i$ -го КПЭ, значение находится в интервале  $[0,00; 1,10]$ ;  $W_i$  – вес  $i$ -го КПЭ в общей системе оценки КПЭ, установленный на отчетный период, в процентах, сумма весов всех КПЭ = 100 %;  $n$  – количество КПЭ на отчетный период.

#### Премия КПЭ «Оценка руководителя»

Руководитель по итогам завершения отчетного периода должен производить индивидуальную оценку деятельности подчиненных работников по каждому из факторов по следующей матрице (табл. 1).

Таблица 1

Матрица оценки КПЭ «Оценка руководителя»

Фактор	Вес фактора, %	Уровень проявления фактора		
		от 0,00 до 0,49	от 0,50 до 1,00	от 1,01 до 1,10
1	2	3	4	5
Объем	30 %	Нагрузка значительно ниже ожидаемого результата (не по вине руководителя)	Равномерная нагрузка и интенсивность в соответствии с должностными обязанностями и поручениями руководителя в течение отчетного периода	Наличие сверхплановых мероприятий и заданий за счет более высокой интенсивности труда, проявления инициативы
Качество	50 %	Качество значительно ниже ожидаемого результата	Задачи выполнены в полном соответствии с ожидаемыми результатами. Отдельные недочеты, не повлиявшие на качество работы	Выше ожидаемого. Работа выполняется своевременно, без замечаний и превосходит ожидания

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
Сложность	20 %	Задачи в отчетном периоде являются более упрощенными относительно типовых задач работника	Выполняемые задачи в течение отчетного периода типовые	Выполняемые задачи выходят за рамки стандартных решений (нетиповые), требуют проявления достаточного уровня самостоятельности и творческого подхода

Формула расчета КПЭ «Оценка руководителя»:

$$K_{\text{оценка}} = B_{\text{объем}} \cdot 30 \% + B_{\text{качество}} \cdot 50 \% + B_{\text{сложность}} \cdot 20 \%, \quad (4)$$

где  $K_{\text{оценка}}$  – коэффициент выполнения КПЭ «Оценка руководителя»;  $B_{\text{объем}}$  – балл, проставленный руководителем по фактору «Объем» согласно уровню проявления фактора по матрице оценки КПЭ «Оценка руководителя» [0,00; 1,10];  $B_{\text{качество}}$  – балл, проставленный руководителем по фактору «Качество» согласно уровню проявления фактора по матрице оценки КПЭ «Оценка руководителя» [0,00; 1,10];  $B_{\text{сложность}}$  – балл, проставленный руководителем по фактору «Сложность» согласно уровню проявления фактора по матрице оценки КПЭ «Оценка руководителя» [0,00; 1,10].

#### *Премия за реализацию проектов*

Премия за достижение плановых контрольных точек КПЭ до выхода проекта на точку окупаемости, предусмотренных инвестиционным этапом проекта (подэтапы проекта), рассчитываемая по формуле

$$П_{\text{КТ}} = \%_{\text{Цел\_КТ}} \cdot O_{\text{план}} \cdot K, \quad (5)$$

где  $П_{\text{КТ}}$  – расчетный размер премии за достижение контрольной точки (КПЭ);  $\%_{\text{Цел\_КТ}}$  – целевой процент премии за достижение контрольных точек (КПЭ) проекта, составляющий 30 %;  $O_{\text{план}}$  – расчетный размер должностного оклада, который мог получить член постоянной команды проекта за плановый период работы на подэтапе проекта в случае отработки 100 % рабочего времени;  $K$  – триггерный коэффициент достижения контрольной точки (выполнения КПЭ) проекта в запланированные сроки, принимающий фактическое значение 0 (не выполнен) или 1 (выполнен).

Премия за достижение проектом точки окупаемости КПЭ проекта, рассчитываемая по формуле

$$П_{\text{ТО}} = \%_{\text{Цел\_ТО}} \cdot O_{\text{план}} \cdot K, \quad (6)$$

где  $П_{\text{ТО}}$  – расчетный размер премии за достижение точки окупаемости (КПЭ) проекта в запланированный срок;  $\%_{\text{Цел\_ТО}}$  – целевой процент премии за достижение точки окупаемости (КПЭ) проекта, составляющий 70 %;  $O_{\text{план}}$  – расчетный размер должностного оклада, который мог получить член постоянной команды проекта за плановый период работы в проекте с даты начала реализации проекта до даты выхода на точку окупаемости в случае отработки 100 % рабочего времени;  $K$  – триггерный коэффициент достижения точки окупаемости

(выполнения КПЭ) проекта в запланированные сроки, принимающий фактическое значение 0 (не выполнен) или 1 (выполнен).

Решением проблемы мотивации работников наукоемких предприятий высокотехнологичных отраслей в современных условиях является представленная модель мотивации, которая позволяет:

1. Заинтересовать работника в результате своей работы и профессиональном росте.

Для этого необходимо использовать:

– профессиональное развитие: предложение программ обучения и повышения квалификации, а также создания карьерных лестниц поможет работникам видеть возможности для роста и укрепит их мотивацию;

– целевые показатели и обратную связь: регулярное установление конкретных и измеримых целей может помочь работникам видеть результаты своей работы. Обратная связь должна быть конструктивной и поддерживающей, что позволит работникам корректировать свою деятельность в будущем;

– признание и награды: внедрение системы признания успехов сотрудников, включая различные формы поощрения (например, благодарности, награды, премии), поможет поддерживать высокий уровень мотивации.

2. Раскрыть и увеличить потенциал работника.

Для этого необходимо использовать:

– индивидуальные планы развития: создание индивидуальных планов развития для каждого сотрудника, учитывающих его сильные стороны, интересы и профессиональные цели, будет способствовать раскрытию потенциала;

– менторство и коучинг: поддержка программ наставничества и коучинга поможет работникам получать личный опыт и учиться на практике, что способствует их профессиональному росту;

– проектную работу: вовлечение в инновационные проекты или кросс-функциональные задачи поможет работникам продемонстрировать и развить свои навыки.

3. Оценить профессионально-трудовую деятельность в соответствии со стратегиями и задачами наукоемкого предприятия.

Для этого необходимо использовать:

– систему КПЭ, которая будет отражать как индивидуальные, так и командные достижения, позволит оценивать трудовые результаты сотрудников в контексте целей компании;

– регулярные оценки. Проведение регулярных оценок работы сотрудников (например, раз в полгода или год) с помощью многоуровневого подхода, включая самооценку и обратную связь от коллег и руководителей;

– постоянную связь с целями компании: установка четкой связи между личными целями работников и стратегическими целями наукоемкого предприятия, чтобы у сотрудников была четкая картина влияния своей работы на общий успех компании.

4. Привлечь и удержать наиболее ценные и нужные кадры в условиях дефицитного кадрового кризиса и квалификационного дефицита.

Для этого необходимо использовать:

– конкурентные условия труда: разработка конкурентного пакета компенсаций, включая зарплату, бонусы, льготы, гибкие графики и возможности удаленной работы;

– брендینگ работодателя: участие в карьерных мероприятиях и активная позиция на рынке труда помогут создать положительный имидж компании как работодателя, привлекательного для квалифицированных специалистов;

– социальные гарантии и корпоративная культура: разработка программ по удержанию кадров, включая программы здоровья и благополучия, создание культуры открытости и поддерживающего климата в коллективе [19].

### *Заключение*

Важную роль в трансформации управления эффективностью высокотехнологических отраслей промышленности играет формирование эффективной системы управления инновационными процессами. Эта система предполагает создание прежде всего действенного механизма трудовых ресурсов как на уровне организаций, так и в целом в масштабе страны и регионов.

В условиях развивающейся диверсификации производств и снижения издержек мотивация персонала, особенно в ОПК, приобретает весьма весомое значение. Для эффективного функционирования системы мотивации на предприятии при формировании следует учитывать фундаментальные научные подходы к моделям других элементов рассматриваемой системы. Одной из главных задач для любого предприятия является поиск эффективных способов управления персоналом, обеспечивающих активизацию человеческой деятельности. Решающим фактором результативности труда работников является их мотивация. Целью авторской модели эффективной системы мотивации персонала является формирование комплекса условий, побуждающих работников предприятия к выполнению действий, направленных на достижение целей предприятия с максимальным эффектом.

Следующим шагом будет непосредственная апробация предлагаемой модели мотивации на действующих предприятиях ОПК, в частности АО «НПП "Рубин"» (г. Пенза), АО «НИИАА» (г. Москва) с учетом мнений и работ авторов и исследователей, работающих в аналогичных направлениях, таких как О. А. Демченкова, А. В. Сидорин и др.

### *Список литературы*

1. Об утверждении Перечня высокотехнологичной продукции, работ и услуг с учетом приоритетных направлений модернизации Российской экономики и Перечня высокотехнологичной продукции : приказ Министерства промышленности и торговли Российской Федерации № 1193 от 23.06.2017. URL: [https://consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_125487](https://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_125487) (дата обращения: 05.02.2025).
2. О критериях отнесения товаров, работ, услуг к инновационной продукции (или) высокотехнологичной продукции : постановление Правительства Российской Федерации № 773 от 15.06.2019. URL: [https://consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_765811](https://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_765811) (дата обращения: 05.02.2025).
3. Барина В. А., Земцов С. П., Семенова Р. И., Федотов И. В. Высокотехнологичный бизнес в регионах России. Национальный доклад. М. : РАНХиГС, АИПП, 2018. 56 с.
4. Стратегия инновационного развития РФ № 2227-р от 8 декабря 2011 г. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70006124/?ysclid=m6wduftr6997147658> (дата обращения: 05.02.2025).
5. Попова И. В., Бокорев Ю. Ю. Deskриптивная модель мотивации и оплаты труда персонала наукоемких предприятий оборонно-промышленного комплекса // Лидерство и менеджмент. 2024. Т. 11, № 3. С. 1041–1055.

6. Revision of the High-Technology Sector and Product Classification // OECD Science, Technology and Industry Working Papers. 01.01.1997.
7. Иванченко А. Г., Ушаков Д. С. Понятие высокотехнологичной продукции. Анализ российской и зарубежной литературы // Молодой ученый. 2018. № 17. С. 178–180. URL: <https://moluch.ru/archive/203/49692/> (дата обращения: 05.02.2025).
8. Методика расчета показателей «Доля продукции высокотехнологичных и наукоемких отраслей в валовом внутреннем продукте» и «Доля продукции высокотехнологичных и наукоемких отраслей в валовом региональном продукте субъекта Российской Федерации» : приказ Росстата № 832 от 15.12.2017. URL: [http://www.gks.ru/metod/metodika\\_832.pdf](http://www.gks.ru/metod/metodika_832.pdf) (дата обращения: 05.02.2025).
9. Чеботарев С. С., Проскурин Б. В., Ельшин В. А. Векторы управления инновациями высокотехнологичных организаций промышленности: методологические аспекты : монография. М. : РУСАЙНС, 2022. 148 с.
10. Бонйани А. Д. Методы и инструменты оценки мотивационных факторов специалистов высокотехнологичных предприятий в России и Иране. doi: 10.26425/2309-3633-2022-10-1-42-53
11. Мантуров рассказал, сколько сотрудников не хватает оборонным предприятиям. URL: <https://www.rbc.ru/economics/07/06/2024/6662c05f9a7947b6bcad6605.html> (дата обращения: 13.12.2024).
12. Дефицит кадров – 2,5 млн человек. Что происходит на российском рынке труда. URL: <https://www.gazeta.ru/economics/2024/11/27/20147317.html> (дата обращения: 14.12.2024).
13. Росстат сообщил о новом историческом минимуме уровня безработицы. URL: <https://www.interfax.ru/russia/918586.html> (дата обращения: 14.12.2024).
14. О контрактной системе в сфере закупок товаров; работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд : федер. закон № 44-ФЗ от 05.04.2013 (ред. от 18.03.2023). URL: [https://consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_388926](https://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_388926) (дата обращения: 05.02.2025).
15. Сотрудников оборонных предприятий могут обязать работать сверхурочно. URL: <https://www.pnp.ru/economics/sotrudnikov-oboronnykh-predpriyatiy-mogut-obyazat-rabotatsverkhurochno.html> (дата обращения: 14.12.2024).
16. Ельшин В. А., Ельшина Т. А. Формирование цен на продукцию высокотехнологичных промышленных предприятий с помощью инвестиционного подхода // Информационно-управляющие, телекоммуникационные системы, средства поражения и их техническое обеспечение : сб. науч. ст. по материалам VI Всерос. межведомственной науч.-техн. конф. Пенза : НПП «Рубин», 2024. С. 303–313.
17. Методические рекомендации по формированию системы мотивации и управления результативностью работников головных организаций холдинговых компаний (интегрированных структур) и иных организаций Государственной корпорации «Ростех». М., 2020.
18. Козлов А. Е. Разработка системы мотивации, ориентированной на реализацию стратегических подходов предприятия (на примере оборонно-промышленного комплекса) // Вестник НГУЭУ. 2020. № 1. С. 244–255.
19. Горбачев А. С., Иванова А. А., Моисеенко А. М. [и др.]. Исследование системы мотивации сотрудников на предприятиях оборонно-промышленного комплекса России // Московский экономический журнал. 2020. № 7. С. 502–510.

### *References*

1. On approval of the List of High-tech products, works and services, taking into account the priority areas of modernization of the Russian economy and the List of High-tech products: Order of the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation No. 1193 dated 06/23/2017. (In Russ.). Available at: [https://consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_125487](https://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_125487) (accessed 05.02.2025).

2. On the criteria for classifying goods, works, and services as innovative products (or) high-tech products : Decree of the Government of the Russian Federation No. 773 dated 06/15/2019. (In Russ.). Available at: [https://consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_765811](https://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_765811) (accessed 05.02.2025).
3. Barinova V.A., Zemtsov S.P., Semenova R.I., Fedotov I.V. *Vysokotekhnologichnyy biznes v regionakh Rossii. Natsional'nyy doklad = High-tech business in the regions of Russia. National Report*. Moscow: RANKhiGS, AIRR, 2018:56. (In Russ.)
4. *Strategiya innovatsionnogo razvitiya RF № 2227-r ot 8 dekabrya 2011 g. = Strategy of Innovative development of the Russian Federation No. 2227-r dated December 8, 2011*. (In Russ.). Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70006124/?ysclid=m6wdufhtr6997147658> (accessed 05.02.2025).
5. Popova I.V., Bokorev Yu.Yu. Descriptive model of motivation and remuneration of personnel of high-tech enterprises of the military-industrial complex. *Liderstvo i menedzhment = Leadership and management*. 2024;11(3):1041–1055. (In Russ.)
6. Revision of the High-Technology Sector and Product Classification. *OECD Science, Technology and Industry Working Papers*. 01.01.1997.
7. Ivanchenko A.G., Ushakov D.S. The concept of high-tech products. Analysis of Russian and foreign literature. *Molodoy uchenyy = Young Scientist*. 2018;(17):178–180. (In Russ.). Available at: <https://moluch.ru/archive/203/49692/> (accessed 05.02.2025).
8. Methodology for calculating the indicators "The share of high-tech and knowledge-intensive industries in the gross domestic product" and "The share of high-tech and knowledge-intensive industries in the gross regional product of a constituent entity of the Russian Federation": Rosstat Order No. 832 dated 12/15/2017. (In Russ.). Available at: [http://www.gks.ru/metod/metodika\\_832.pdf](http://www.gks.ru/metod/metodika_832.pdf) (accessed 05.02.2025).
9. Chebotarev S.S., Proskurin B.V., El'shin V.A. *Vektory upravleniya innovatsiyami vysokotekhnologichnykh organizatsiy promyshlennosti: metodologicheskie aspekty: monografiya = Vectors of innovation management of high-tech industrial organizations: methodological aspects : monograph*. Moscow: RUSAYNS, 2022:148. (In Russ.)
10. Bonyani A.D. *Metody i instrumenty otsenki motivatsionnykh faktorov spetsialistov vysokotekhnologichnykh predpriyatiy v Rossii i Irane = Methods and tools for assessing the motivational factors of specialists of high-tech enterprises in Russia and Iran*. (In Russ.). doi: 10.26425/2309-3633-2022-10-1-42-53
11. *Manturov rasskazal, skol'ko sotrudnikov ne khvataet oboronnykh predpriyatiyam = Manturov told how many employees the defense enterprises lack*. Available at: <https://www.rbc.ru/economics/07/06/2024/6662c05f9a7947b6bcad6605.html> (accessed 13.12.2024).
12. *Defitsit kadrov – 2,5 mln chelovek. Chto proiskhodit na rossiyskom rynke truda = Staff shortage – 2.5 million people. What is happening in the Russian labor market*. (In Russ.). Available at: <https://www.gazeta.ru/economics/2024/11/27/20147317.html> (accessed 14.12.2024).
13. *Rosstat soobshchil o novom istoricheskom minimume urovnya bezrabotitsy = Rosstat reported a new historical low in the unemployment rate*. (In Russ.). Available at: <https://www.interfax.ru/russia/918586.html> (accessed 14.12.2024).
14. On the contract system in the field of procurement of goods, works, services for state and municipal needs : feder. Law No. 44-FZ of 04/05/2013 (as amended on 03/18/2023). (In Russ.). Available at: [https://consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_388926](https://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_388926) (accessed 05.02.2025).
15. *Sotrudnikov oboronnykh predpriyatiy mogut obyazat' rabotat' sverkhurochno = Employees of defense enterprises may be required to work overtime*. (In Russ.). Available at: <https://www.pnp.ru/economics/sotrudnikov-oboronnykh-predpriyatiy-mogut-obyazat-rabotatsverkhurochno.html> (accessed 14.12.2024).
16. El'shin V.A., El'shina T.A. Formation of prices for products of high-tech industrial enterprises using an investment approach. *Informatsionno-upravlyayushchie,*

*telekommunikatsionnye sistemy, sredstva porazheniya i ikh tekhnicheskoe obespechenie: sb. nauch. st. po materialam VI Vseros. mezhvedomstvennoy nauch.-tekhn. konf. = Information management, telecommunication systems, weapons of destruction and their technical support : collection of scientific articles based on the materials of the VI All-Russian interdepartmental scientific and technical conf. Penza: NPP «Rubin», 2024:303–313. (In Russ.)*

17. *Metodicheskie rekomendatsii po formirovaniyu sistemy motivatsii i upravleniya rezul'tativnost'yu rabotnikov glavnykh organizatsiy kholdingovykh kompaniy (integrirovannykh struktur) i inykh organizatsiy Gosudarstvennoy korporatsii «Rostekh» = Methodological recommendations on the formation of a motivation system and performance management for employees of parent organizations of holding companies (integrated structures) and other organizations of the Rostec State Corporation. (In Russ.). Moscow, 2020. (In Russ.)*
18. Kozlov A.E. Development of a motivation system focused on the implementation of strategic approaches of the enterprise (using the example of the military-industrial complex). *Vestnik NGUEU = Bulletin of the National Research University of Economics*. 2020;(1):244–255. (In Russ.)
19. Gorbachev A.S., Ivanova A.A., Moiseenko A.M. et al. A study of the employee motivation system at enterprises of the Russian military-industrial complex. *Moskovskiy ekonomicheskyy zhurnal = Moscow Economic Journal*. 2020;(7):502–510. (In Russ.)

#### **Информация об авторах / Information about the authors**

##### **Станислав Стефанович Чеботарев**

доктор экономических наук, профессор,  
начальник отдела методологических  
и экономических исследований,  
Научно-исследовательский институт  
автоматической аппаратуры  
имени академика В. С. Семенихина  
(Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, 78);  
главный научный сотрудник кафедры  
маркетинга и логистики,  
Волжский государственный университет  
водного транспорта  
(Россия, г. Нижний Новгород,  
ул. Минина, 7/55)  
E-mail: Stst57@yandex.ru

##### **Stanislav S. Chebotarev**

Doctor of economical sciences, professor,  
head of the department of methodological  
and economic research,  
Scientific Research Institute  
of Automatic Equipment named after  
academician V.S. Semenikhin  
(78 Profsoyuznaya street,  
Moscow, Russia);  
chief scientific officer of the department  
of logistics and marketing,  
Volga State University of Water Transport  
(7/55 Minina street,  
Nizhny Novgorod, Russia)

##### **Анастасия Васильевна Романова**

директор департамента организационного  
развития и управления персоналом,  
Объединенная приборостроительная  
корпорация  
(Россия, г. Москва,  
ул. Верейская, 29, стр. 141)  
E-mail: a.rogozhina@mail.ru

##### **Anastasia V. Romanova**

Director of department of organization  
development and human resource  
management,  
United Instrument-Making Corporation  
(build. 141, 29 Vereiskaya street,  
Moscow, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 19.12.2024**

**Поступила после рецензирования/Revised 02.02.2025**

**Принята к публикации/Accepted 15.02.2025**

## АНАЛИЗ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫПУСКНИКОВ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ ПЕНЗЕНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

П. В. Айкашев<sup>1</sup>, Т. В. Черушева<sup>2</sup>, Н. В. Зверовщикова<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
<sup>1</sup>aikashev.pavel@mail.ru, <sup>2</sup>tank1100@yandex.ru, <sup>3</sup>nvz.matematika@yandex.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Рост потребности в квалифицированных кадрах для реализации технологических инноваций и развития инфраструктуры обуславливает актуальность анализа и численного моделирования распределения выпускников инженерно-технических специальностей (ИТС). В связи с этим важно проводить регулярный мониторинг спроса и предложения ИТС на рынке труда, чтобы адекватно реагировать на изменения и обеспечивать наличие необходимых кадров для успешного развития бизнеса. Это поможет выявить недостаток или избыток специалистов в определенных областях, поспособствовать оптимизации образовательных программ, а также обеспечить соответствие подготовки выпускников требованиям рынка труда. В условиях цифровизации и перехода к устойчивому развитию важно эффективно использовать ресурсы для формирования инженерного потенциала страны. Цель исследования – разработка адекватных математических моделей для моделирования распределения выпускников инженерных специальностей Пензенского государственного университета (ПГУ). *Материалы и методы.* Используются методы статистического анализа, эконометрического моделирования, экономико-математического моделирования. *Результаты.* В условиях стремительных изменений на рынке труда и растущей необходимости в высококвалифицированных кадрах распределение выпускников инженерно-технических специальностей приобретает особую значимость. На основе зарубежных и отечественных моделей рынка труда разработаны три математические модели для анализа распределения выпускников инженерно-технических специальностей ПГУ. Эти модели служат инструментом для прогнозирования числа бакалавров, специалистов и магистров, которые будут искать работу по окончании учебы. С использованием построенных математических моделей и результатов предыдущих связанных исследований был сформирован усредненный прогноз распределения выпускников ИТС ПГУ в переходный период «учеба – работа» до 2028 г. *Выводы.* Полученные результаты позволяют не только прогнозировать распределение выпускников, но и оценивать возможный дисбаланс между спросом и предложением специалистов, подчеркнуть необходимость повышения престижа технических специальностей и актуальность инженерного образования. Успешное развитие научно-исследовательской деятельности и промышленности, а также сектора наукоемких услуг становится критически важным для реиндустриализации экономики России.

**Ключевые слова:** высшее инженерно-техническое образование, распределение выпускников, моделирование, выпуск инженерно-технических специалистов

**Для цитирования:** Айкашев П. В., Черушева Т. В., Зверовщикова Н. В. Анализ и математическое моделирование распределения выпускников инженерно-технических специальностей Пензенского государственного университета // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 1. С. 46–57. doi: 10.21685/2227-8486-2025-1-4

**ANALYSIS AND MATHEMATICAL MODELING  
OF DISTRIBUTION OF ENGINEERING  
AND TECHNICAL SPECIALTIES GRADUATES  
OF PENZA STATE UNIVERSITY**

**P.V. Aikashev<sup>1</sup>, T.V. Cherusheva<sup>2</sup>, N.V. Zverovshchikova<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> aikashev.pavel@mail.ru, <sup>2</sup> tank1100@yandex.ru, <sup>3</sup> nvz.matematika@yandex.ru

**Abstract.** *Background.* The growing demand for skilled personnel to implement technological innovations and develop infrastructure underscores the relevance of analyzing and numerically modeling the distribution of graduates in engineering and technical specialties (ETS). Therefore, it is essential to conduct regular monitoring of the demand and supply of ETS in the labor market to respond adequately to changes and ensure the availability of necessary personnel for the successful development of businesses. This helps identify shortages or surpluses of specialists in specific fields, optimizes educational programs, and ensures that graduates' training meets labor market requirements. In the context of digitalization and the transition to sustainable development, it is crucial to effectively utilize resources to cultivate the engineering potential of the country. The aim of this study is to develop appropriate mathematical models for simulating the distribution of graduates from the Penza State University (PSU) engineering programs. *Materials and methods.* Statistical analysis methods, econometric modeling, and economic-mathematical modeling are employed. *Results.* In the context of rapid changes in the labor market and the growing need for highly qualified personnel, the distribution of graduates of engineering and technical specialties is of particular importance. Based on foreign and domestic models of the labor market, three mathematical models have been developed to analyze the distribution of graduates of engineering and technical specialties at PSU. These models serve as a tool for forecasting the number of bachelors, specialists and masters who will look for work after graduation. Using the constructed mathematical models and the results of previous related studies, an average forecast for the distribution of PSU ITS graduates in the transition period "study-work" until 2028 has been formed. *Conclusions.* The results obtained not only allow for forecasting the distribution of graduates but also assess the potential imbalance between demand and supply of specialists in this field. These data highlight the necessity of enhancing the prestige of technical specialties and the relevance of engineering education. The successful development of research activities and industry, as well as the high-tech service sector, becomes critically important for the reindustrialization of Russia's economy.

**Keywords:** higher engineering and technical education, distribution of graduates, modeling, graduation of engineering and technical specialists

**For citation:** Aikashev P.V., Cherusheva T.V., Zverovshchikova N.V. Analysis and mathematical modeling of distribution of engineering and technical specialties graduates of Penza State University. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2025;(1):46–57. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-1-4

**Введение**

Для успешного развития экономики России и стимулирования инноваций необходимо уделять особое внимание проблемам спроса и предложения инженерно-технических специалистов. В последнее время многие работодатели обращают внимание на нехватку опытных специалистов в инженерной

области, особенно при недостаточном притоке молодых специалистов и оттоке специалистов старшего поколения. С конца 1990-х гг. после снижения спроса со стороны промышленных предприятий на фоне перестройки в России начались проблемы с нехваткой инженеров и техников. Ситуация стала улучшаться только с 2000-х гг. в связи с экономическим ростом, за которым последовало увеличение спроса на квалифицированный инженерно-технический персонал [1]. При этом к 2014 г. работодатели все еще указывали на острую нехватку инженерно-технических работников. Помимо проблемы с дисбалансом спроса и предложения ИТС, существуют проблемы с качеством обучения, взаимодействием между работодателями и университетами, а также с обеспечением молодых специалистов возможностями трудоустройства [2].

Помимо сложившихся проблем дисбаланса спроса и предложения на рынке труда для инженерно-технических специалистов недавние мировые события оказали значительное воздействие на количество доступных рабочих мест для ИТС. Распространение COVID-19 в 2019–2020 гг. сказалось на качестве и количестве выпускников в данных областях. Кроме того, санкции, примененные против России в период с 2022 по 2024 г., привели к оттоку как иностранных, так и отечественных специалистов, что еще более усугубило неравновесие между спросом и предложением инженеров. В связи с этим задача прогнозирования распределения выпускников по инженерно-техническим специальностям остается актуальной.

В рамках исследования рассматривается модификация экономической модели, предложенной авторами в работах [3, 4]. Модель позволяет проводить прогнозы числа студентов, получающих степени бакалавров в области инженерии, а также оценивать количество выпускников, трудоустроенных по специальности в год окончания обучения, и количество бакалавров, поступающих в магистратуру для дальнейшего обучения в Пензенском государственном университете.

С начала 1990-х гг. в России количество выпускников инженерно-технических специальностей начало стремительно сокращаться [2]. Если в начале 1990-х гг. около 28 % всех выпускников высших учебных заведений были инженерно-техническими специалистами, то к началу 2010 г. число выпускаемых инженеров уменьшилось на 6 %, что привело к уменьшению количества выпускаемых инженеров на 25 %. И только начиная с 2010 г. ситуация стала улучшаться и стабилизироваться. Так, в 2013 г. доля технических специалистов составила 20,8 % от общего выпуска в высших учебных заведениях.

К текущему моменту, по отчетам экономистов РАН [7], каждая пятая компания испытывает потребности в квалифицированных кадрах. Особенно это отражается в технической сфере. Так, например, в 2024 г. для инженеров-электронщиков, сметчиков, экологов, специалистов по охране труда и технике безопасности вакансий было втрое больше, чем резюме.

Проведенные исследования показывают, что с каждым годом открываются все больше новых вакансий для инженеров: 270 тыс. в 2019 г., 300 тыс. в 2020 г. [5]. Рост потребности в инженерных кадрах продолжается до сих пор. В 2023 г. число вакансий, предлагаемых работодателями в промышленной сфере, увеличилось на 28 % по сравнению с 2022 г., при этом количество резюме выросло всего на 18 %. По данным Всероссийского научного исследовательского института труда, за 2023 г. общее количество вакансий по инженерным профессиям составило 574,2 тыс. За первое полугодие 2024 г.

их было опубликовано 289,7 тыс., что на 0,6 % больше по сравнению с аналогичным периодом 2023 г. Это подчеркивает необходимость анализа спроса и предложения инженерно-технических специалистов.

Другая проблема заключается в оттоке наиболее перспективных кадров за рубеж из-за низкого уровня заработной платы, недостаточного престижа инженерных специальностей и несоответствия уровня подготовки выпускников требованиям работодателей [9]. Часть инженерно-технических специалистов работает в сферах, не связанной с полученной специальностью, что тоже влияет на дисбаланс на рынке труда инженеров [11–13].

Все вышперечисленное говорит о необходимости разработки математических моделей, позволяющих прогнозировать как количество выпускаемых инженерно-технических специалистов, так и спрос на подобных специалистов.

***Разработанные математические модели распределения  
инженерно-технических специалистов  
Пензенского государственного университета***

Существующие математические модели применяются для макро моделирования ситуации на рынке труда, в то время как для моделирования небольших сегментов они подходят значительно хуже (в том числе из-за отсутствия необходимых данных по конкретным направлениям). Авторами проведена разработка математических моделей распределения инженерно-технических специалистов, выпускаемых Пензенским государственным университетом.

В прошлых работах были построены две модели: простейшая [3] и ее модификация, рассматривающая большее количество факторов [4]. В простейшей модели было всего два блока, связывающих численность выпуска инженеров с количеством занятых инженеров. Ее модификация состояла уже из трех блоков: блока численности выпускаемых студентов (включающая количество принимаемых абитуриентов, количество закончивших обучение), блока занятых не по специальности инженеров и блока инженеров, устроившихся работать по специальности.

Так как простейшие модели давали высокую погрешность при прогнозировании на большой период времени, то были разработаны новые модели распределения выпускников ИТС среди бакалавров, магистров и специалистов ПГУ. Они учитывают следующие параметры: ситуация на рынке труда, влияние заработной платы в технической и экономической сферах, отток специалистов из технической сферы и желание продолжить обучение.

В связи с тем, что разработанные модели распределения выпускников ПГУ имеют сходную структуру, приведем описание модели распределения специалистов ПГУ и отличия от нее моделей для бакалавров и магистров. Модель распределения выпускников-специалистов инженерно-технических специальностей ПГУ состоит из пяти блоков:

1. Спрос на ИТС на рынке труда:

$$DEM(t) = c_0(DEM(t-1) - ET(t-1)) + c_1ET(t-1) + d_1DEM(t-1), \quad (1)$$

где  $ET(t)$  – количество занятых ИТС на текущий момент;  $c_0$  – коэффициент, характеризующий вакантные места, незанятые за прошлый год;  $c_1$  – коэффициент, характеризующий появление вакантных мест из-за оттока инженеров

в экономическую область или сферу услуг;  $d_1$  – коэффициент, показывающий изменение потребности в инженерах в связи с изменением количества рабочих мест для ИТС.

2. Численность абитуриентов, поступающих на инженерные специальности с учетом количества поступивших за последние четыре года на специалитет и влияния запроса на выпускников:

$$GA(t) = s_{21}GA(t-1) + s_{22}GA(t-2) + s_{23}GA(t-3) + s_{24}GA(t-4) + s_{25}GA(t-5) + d_2DEM(t), \quad (2)$$

где  $s_{2i}, i = 1, 2, 3, 4, 5$  – коэффициент, характеризующий влияние количества поступивших  $i$  лет назад на объем приема абитуриентов в текущем году;  $d_2$  – коэффициент, характеризующий изменение запросов на выпускников в зависимости от ситуации на рынке труда.

3. Численность абитуриентов, продолжающих обучение после окончания бакалавриата в магистратуре, за последние четыре года:

$$GY(t) = s_{51}GY(t-1) + s_{52}GY(t-2) + s_{53}GY(t-3) + s_{54}GY(t-4) + s_{55}GY(t-5), \quad (3)$$

где  $s_{5i}, i = 1, 2, 3, 4, 5$  – коэффициент, характеризующий влияние количества выпускников  $i$  лет назад на количество продолживших свое обучение в магистратуре (аспирантуре) в текущем году.

4. Численность выпускаемых инженеров-специалистов с учетом количества поступивших за последние пять лет:

$$GE(t) = s_{31}GA(t-1) + b_{32}GA(t-2) + s_{33}GA(t-3) + s_{34}GA(t-4) + s_{35}GA(t-5), \quad (4)$$

где  $s_{3i}, i = 1, 2, 3, 4$  – коэффициент, характеризующий влияние количества выпускников  $i$  лет назад специалистов на объем выпуска инженеров в текущем году.

5. Число занятых ИТС:

$$ET(t) = et(t)GE(t), \quad (5)$$

$$et(t) = s_{41} \frac{DEM(t)}{GE(t)} + s_{42}wr(t) + c_3, \quad (6)$$

$$wr(t) = s_{43} \frac{wr(t-1)DEM(t)}{GE(t)}, \quad (7)$$

$$EE(t) = s_{61}GE(t). \quad (8)$$

Математическая модель (1)–(8) представляет собой модель распределения выпускников специалитета ПГУ. В связи с тем, что бакалавры обучаются 4 года, необходимо для трансформации модели (1)–(8) в модель распределения выпускаемых инженеров-бакалавров значения коэффициентов  $s_{2,5}, s_{3,5}, s_{5,5}$  принять равными нулю:  $s_{2,5} = 0, s_{3,5} = 0, s_{5,5} = 0$ . В случае модели для магистров необходимо принять следующие значения коэффициентов:  $s_{2i} = 0, i = 3, 4, 5, s_{3i} = 0, i = 3, 4, 5, s_{5i} = 0, i = 3, 4, 5$ .

Математическая модель (1)–(8) в явном виде выглядит следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} DEM(t) = c_0(DEM(t-1) - ET(t-1)) + c_1ET(t-1) + d_1DEM(t-1), \\ GA(t) = s_{21}GA(t-1) + s_{22}GA(t-2) + s_{23}GA(t-3) + s_{24}GA(t-4) + \\ s_{25}GA(t-5) + d_2DEM(t), \\ GY(t) = s_{51}GY(t-1) + s_{52}GY(t-2) + s_{53}GY(t-3) + s_{54}GY(t-4) + s_{55}GY(t-5), \\ GE(t) = s_{31}GA(t-1) + b_{32}GA(t-2) + s_{33}GA(t-3) + s_{34}GA(t-4) + s_{35}GA(t-5), \\ ET(t) = et(t)GE(t), \\ et(t) = s_{41} \frac{DEM(t)}{GE(t)} + s_{42}wr(t) + c_3, \\ wr(t) = s_{43} \frac{wr(t-1)DEM(t)}{GE(t)}, \\ EE(t) = s_{61}GE(t). \end{array} \right. \quad (9)$$

Оценки параметров модели (9) были получены с использованием данных по Пензенскому государственному университету за 2019–2023 гг. Источниками информации были статистические данные Регионального центра содействия трудоустройству и адаптации выпускников [6]. Для определения параметров модели (1)–(8) и ее модификаций для бакалавров и магистров использовался метод максимального правдоподобия.

В табл. 1–3 представлены данные о распределении инженерно-технических специалистов в Пензенском государственном университете за 2019–2023 гг.

Таблица 1

Информация о бакалаврах технических специальностей для ПГУ за 2020–2023 гг.

Количество	Год			
	2020	2021	2022	2023
Поступление	514	659	549	612
Выпуск	492	458	410	483
Трудоустроенные по специальности	287	211	181	248
Трудоустроенные не по специальности	39	65	47	48
Решившие продолжить обучение	100	49	132	95

Таблица 2

Информация о специалистах технических специальностей для ПГУ за 2020–2023 гг.

Количество	Год				
	2019	2020	2021	2022	2023
Поступление	297	275	314	314	310
Выпуск	167	196	163	122	215
Трудоустроенные по специальности	142	146	132	86	172
Трудоустроенные не по специальности	4	6	7	7	8
Решившие продолжить обучение	9	17	14	17	28

Информация о магистрах технических специальностей для ПГУ за 2020–2023 гг.

Количество	Год				
	2019	2020	2021	2022	2023
Поступление	162	126	129	232	161
Выпуск	198	152	140	103	124
Трудоустроенные по специальности	149	127	111	78	93
Трудоустроенные не по специальности	19	10	12	18	26
Решившие продолжить обучение	13	7	3	2	30

Результаты прогноза распределения специалистов на основе модели (9) и ее модификациях для бакалавров и магистров представлены на рис. 1–3.

При построении прогноза распределения специалистов с помощью разработанной математической модели (9) были получены результаты, показанные на рис. 1.

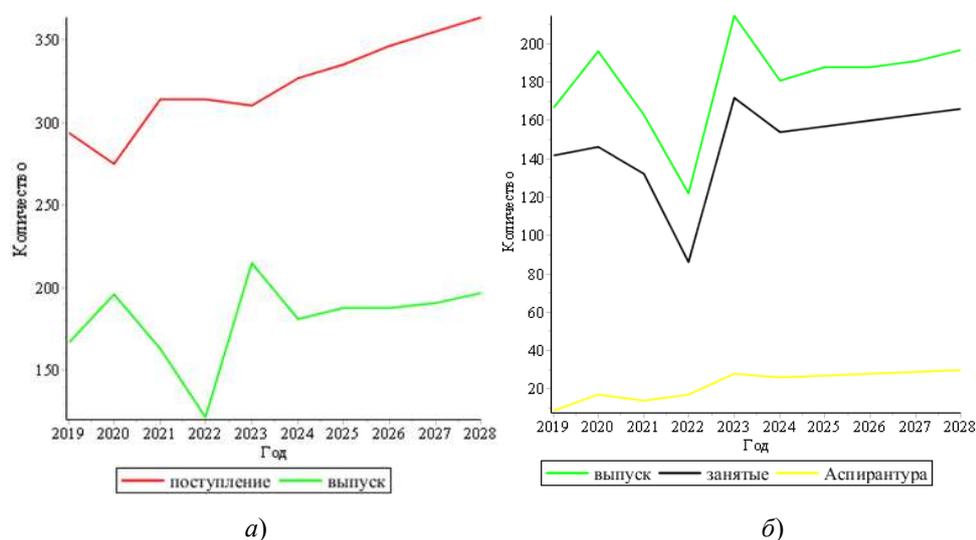


Рис. 1. Результаты моделирования распределения ИТС, закончивших специалитет ПГУ:  
*а* – фактическая численность поступивших и выпуска в соответствующий год специалистов (до 2023 г.), прогноз поступления и выпуска специалистов; *б* – сравнение количества выпускаемых и устроившихся по специальности выпускников и количества выпускников, продолживших обучение в аспирантуре

На рис. 2 продемонстрированы полученные результаты моделирования распределения бакалавров с использованием соответствующей модификации модели (9).

На рис. 3 продемонстрированы полученные результаты моделирования распределения магистров.

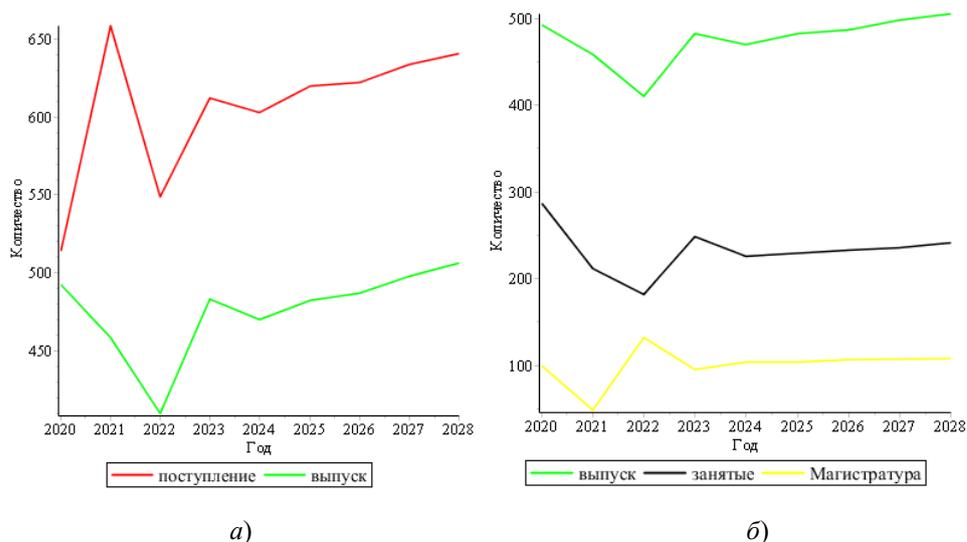


Рис. 2. Результаты моделирования распределения ИТС, закончивших бакалавриат ПГУ:  
 а – фактическая численность поступивших и выпустившихся в соответствующий год бакалавров (до 2023 г. включительно), прогноз поступления и выпуска бакалавров (с 2024 г.); б – сравнение количества выпускаемых и устроившихся по специальности выпускников и количества выпускников, продолживших обучение в магистратуре

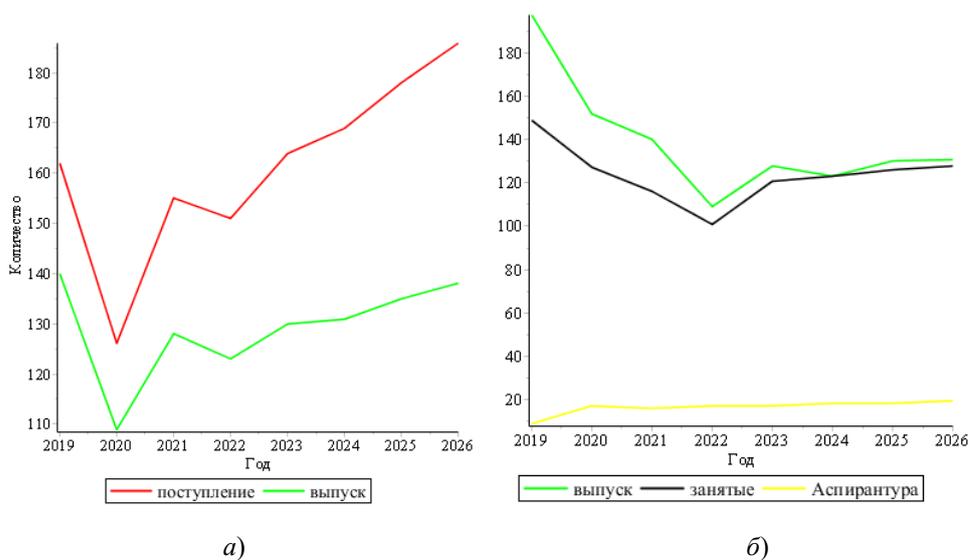


Рис. 3. Результаты моделирования распределения ИТС, закончивших бакалавриат ПГУ:  
 а – сравнение прогнозов численности поступивших в магистратуру и выпуска по окончании магистратуры через два года (выпуск сдвинут на два года влево);  
 б – сравнение прогнозов численности окончивших обучение магистрантов, трудоустроенных по окончании магистратуры и пошедших учиться в аспирантуру

### Обсуждение

Проведенный анализ литературных источников позволяет отметить актуальность темы исследования. Нехватка инженеров в российских компаниях

представляет собой важный и актуальный аспект для анализа состояния рынка труда и дальнейшего развития отечественной экономики. В условиях стремительного технологического прогресса и цифровизации многих отраслей дефицит квалифицированных специалистов в технической области становится одной из главных преград для инновационного роста.

Полученные данные позволяют предсказать выпуск, занятость и число решивших продолжить свое обучение студентов. Это поможет планировать ситуацию на рынке трудоустройства выпускников. При этом нельзя сбрасывать со счетов, что прием студентов на инженерные специальности зависит от глобального запроса работодателей, политики Министерства науки и высшего образования и стратегии экономического развития России.

Следует отметить, что математическая модель (9) и ее модификации разработаны с использованием данных Пензенского государственного университета.

Если рассматривать данные по другим университетам, то надо заметить, что в открытом доступе мало сведений, необходимых для оценки разработанных моделей по данным других вузов. Тем не менее модель показывает хорошие результаты при условии ее адаптации под особенности соответствующего вуза. Здесь также требуются данные о запросах предприятий региона, в котором ведет свою образовательную деятельность данный вуз, а также сведения о специфике образовательного процесса в исследуемом вузе. В связи с тем, что параметры модели зависят от временного интервала, на основе которого модель обучается, потребуется перерасчет параметров модели (9).

### *Заключение*

Текущая ситуация на рынке труда говорит о том, что потребность в инженерно-технических специалистах постоянно растет, и текущий уровень их выпуска не может в полной мере ее удовлетворить. Даже те вакансии, которые демонстрировали превосходство количества резюме над количеством свободных вакансий, сейчас начинают испытывать нехватку ИТС. Например, в 2023 г. число поданных резюме по специальности «сетевой инженер» превышало число соответствующих вакансий на 37 %, а на текущий момент – всего на 13 %. Следовательно, требуются исследования распределения выпускников инженерно-технических специальностей вузов и в случае необходимости принятие соответствующих мер по стимулированию выпуска квалифицированных инженеров.

На примере Пензенского государственного университета была построена и апробирована модель распределения выпускников инженерных специальностей. Полученные результаты говорят о том, что разработанная модель имеет потенциал для развития и совершенствования. Эффективность моделирования может быть улучшена за счет введения новых параметров после решения Министерства науки и высшего образования о новых стандартах обучения, а также применения модели для анализа данных по другим университетам страны.

### *Список литературы*

1. Коровкин А. Г. Динамика занятости и рынка труда. Вопросы макроэкономического анализа и прогнозирования. М. : МАКС-Пресс, 2001. 320 с.
2. Бреев Б. Д. Безработица в современной России. М. : Наука, 2005. 271 с.

3. Черушева Т. В., Зверовщикова Н. В., Айкашев П. В. Моделирование распределения выпускников инженерно-технических специалистов ПГУ // Математическое и компьютерное моделирование естественно-научных и социальных проблем : труды XVIII Междунар. конф. / под ред. И. В. Бойкова. Пенза : Изд-во ПГУ, 2023.
4. Черушева Т. В., Зверовщикова Н. В., Айкашев П. В. Моделирование показателей выпуска и занятости инженерно-технических специалистов ПГУ // Математическое и компьютерное моделирование естественно-научных и социальных проблем : труды XVII Междунар. конф. / под ред. И. В. Бойкова. Пенза : Изд-во ПГУ, 2022. С. 85–88.
5. Рынку труда снова понадобились инженеры // Российская газета. URL: <https://rg.ru/2021/03/29/rynku-truda-snova-ponadobilis-inzhenery.html> (дата обращения: 12.12.2024).
6. Региональный центр содействия трудоустройству и адаптации выпускников ПГУ. URL: <https://lider.pnzgu.ru/> (дата обращения: 12.12.2024).
7. Ахапкин Н. Ю. Российская экономика в условиях санкционных ограничений: динамика и структурные изменения // Вестник Института экономики Российской академии наук. 2023. № 6. С. 7–25. doi: 10.52180/2073-6487\_2023\_6\_7\_25
8. Коровкин А. Г., Долгова И. Н., Единак Е. А., Королев И. Б. Прогнозноаналитическое исследование взаимосвязей сферы занятости и профессионального образования в России // Вестник Российского фонда фундаментальных исследований. Гуманитарные и общественные науки. 2018. № 4. С. 38–49.
9. Капелюшников Р. И. Спрос и предложение высококвалифицированной рабочей силы в России: кто бежал быстрее? // Препринты ГУ ВШЭ. Серия WP3 «Проблемы рынка труда». 2011. № 09.
10. Варшавский А. Е. Актуальные вопросы разработки научно-технологической и инновационной политики. Модернизация и экономическая безопасность России / под ред. акад. Н. Я. Петракова. М. ; СПб. : Нестор-история, 2014. Т. 4. С. 11–52.
11. Варшавский А. Е., Никонова М. А. Анализ региональных особенностей динамики численности исследователей // Вестник университета (ГУУ). 2010. № 2.
12. Нанаян А. М. Динамика занятости в науке и подготовка кадров высшей квалификации в регионах России // Евразийское Научное Объединение. 2019. № 10-4 (56). С. 318–321. doi: 10.5281/zenodo.3533721
13. Варшавская Е. Я., Котырло Е. С. Выпускники инженерно-технических и экономических специальностей: между спросом и предложением // Вопросы образования. 2019. № 2. С. 98–128. doi: 10.17323/1814-9545-2019-2-98-128.132

### *References*

1. Korovkin A.G. *Dinamika zanyatosti i rynka truda. Voprosy makroekonomicheskogo analiza i prognozirovaniya = Dynamics of employment and labor market. Issues of macroeconomic analysis and forecasting*. Moscow: MAKS-Press, 2001:320. (In Russ.)
2. Breev B.D. *Bezrabortitsa v sovremennoy Rossii = Unemployment in modern Russia*. Moscow: Nauka, 2005:271. (In Russ.)
3. Cherusheva T.V., Zverovshchikova N.V., Aykashev P.V. Modeling the distribution of graduates of engineering and technical specialists of PSU. *Matematicheskoe i komp'yuternoe modelirovanie estestvenno-nauchnykh i sotsial'nykh problem: trudy XVIII Mezhdunar. konf. = Mathematical and computer modeling of natural science and social problems : proceedings of the XVIII International conference*. Penza: Izd-vo PGU, 2023. (In Russ.)
4. Cherusheva T.V., Zverovshchikova N.V., Aykashev P.V. Modeling of indicators of output and employment of engineering and technical specialists of PSU. *Matematicheskoe i komp'yuternoe modelirovanie estestvenno-nauchnykh i sotsial'nykh problem: trudy XVII Mezhdunar. konf. = Mathematical and computer modeling of natural science*

- and social problems : proceedings of the XVII International conference*. Penza: Izd-vo PGU, 2022:85–88. (In Russ.)
5. The labor market needed engineers again. *Rossiyskaya gazeta = Rossiyskaya Gazeta*. (In Russ.). Available at: <https://rg.ru/2021/03/29/rynku-truda-snova-ponadobilis-inzhenery.html> (accessed 12.12.2024).
  6. *Regional'nyy tsentr sodeystviya trudoustroystvu i adaptatsii vypusnikov PGU = Regional Center for assistance to employment and adaptation of graduates of PSU*. (In Russ.). Available at: <https://lider.pnzgu.ru/> (accessed 12.12.2024).
  7. Akhupkin N.Yu. The Russian economy under sanctions restrictions: dynamics and structural changes. *Vestnik Instituta ekonomiki Rossiyskoy akademii nauk = Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences*. 2023;(6):7–25. (In Russ.). doi: 10.52180/2073-6487\_2023\_6\_7\_25
  8. Korovkin A.G., Dolgova I.N., Edinak E.A., Korolev I.B. Predictive and analytical study of the interrelationships of employment and vocational education in Russia. *Vestnik Rossiyskogo fonda fundamental'nykh issledovaniy. Gumanitarnye i obshchestvennye nauki = Bulletin of the Russian Foundation for Basic Research. Humanities and social sciences*. 2018;(4):38–49. (In Russ.)
  9. Kapelyushnikov R.I. Demand and supply of highly skilled labor in Russia: Who ran faster? *Preprinty GU VShE. Seriya WP3 «Problemy rynka truda» = Preprints of the Higher School of Economics. WP3 series "Labor Market Problems"*. 2011;(09). (In Russ.)
  10. Varshavskiy A.E. *Aktual'nye voprosy razrabotki nauchno-tekhnologicheskoy i innovatsionnoy politiki. Modernizatsiya i ekonomicheskaya bezopasnost' Rossii = Actual issues of scientific, technological and innovation policy development. Modernization and Economic Security of Russia*. Moscow; Saint Petersburg: Nestor-istoriya, 2014;4:11–52. (In Russ.)
  11. Varshavskiy A.E., Nikonova M.A. Analysis of regional features of the dynamics of the number of researchers. *Vestnik universiteta (GUU) = Bulletin of the University (GUU)*. 2010;(2). (In Russ.)
  12. Nanavyan A.M. Dynamics of employment in science and training of highly qualified personnel in the regions of Russia. *Evraziyskoe Nauchnoe Ob"edinenie = Eurasian Scientific Association*. 2019;(10-4):318–321. (In Russ.). doi: 10.5281/zenodo.3533721
  13. Varshavskaya E.Ya., Kotyrlo E.S. Graduates of engineering, technical and economic specialties: between supply and demand. *Voprosy obrazovaniya = Educational issues*. 2019;(2):98–128. (In Russ.). doi: 10.17323/1814-9545-2019-2-98-128.132

#### **Информация об авторах / Information about the authors**

##### **Павел Владимирович Айкашев**

ассистент кафедры высшей  
и прикладной математики,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: aikashev.pavel@mail.ru

##### **Pavel V. Aikashev**

Assistant of the sub-department  
of higher and applied mathematics,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

##### **Татьяна Вячеславовна Черушева**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры высшей  
и прикладной математики,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: tank1100@yandex.ru

##### **Tatyana V. Cherusheva**

Candidate of technical sciences,  
associate professor, associate professor  
of the sub-department of higher  
and applied mathematics,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Наталья Васильевна Зверовщикова**

кандидат педагогических наук, доцент,  
доцент кафедры высшей  
и прикладной математики,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: nvz.matematika@yandex.ru

**Natalia V. Zverovshchikova**

Candidate of pedagogical sciences,  
associate professor, associate professor  
of the sub-department of higher  
and applied mathematics,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 16.10.2024**

**Поступила после рецензирования/Revised 24.12.2024**

**Принята к публикации/Accepted 27.12.2024**

## Раздел 2 МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ТЕХНИКЕ

## Section 2 MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN THE TECHNIQUE

---

УДК 519.25, 004.622, 004.67, 311.313  
doi: 10.21685/2227-8486-2025-1-5

### СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОСПОЛНЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ НА ПРИМЕРЕ РЯЗАНСКОЙ ОБЛАСТИ

**Б. В. Костров<sup>1</sup>, Р. В. Хруничев<sup>2</sup>**

<sup>1, 2</sup> Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В. Ф. Уткина, Рязань, Россия

<sup>1</sup> kostrov.b.v@evm.rsreu.ru, <sup>2</sup> hrunichev\_robert@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Приводится статистический и аналитический анализ перспективы обеспечения инженерными кадрами предприятий на основе статистических данных выпуска школьников Рязанской области и результатов ЕГЭ. Цель работы – проанализировать общий потенциал региона по наращиванию объема подготовки кадров по инженерным направлениям подготовки и специальностям и определить тенденции на этапе общей подготовки абитуриентов по основным предметам, необходимым для подготовки инженерных кадров, в образовательных организациях среднего общего образования, выявить закономерности и тренды по массивам выборочных совокупностей выпуска 9-х и 11-х классов в период с 2017 по 2025 г. Рассматриваются задачи обработки ряда выборочных совокупностей выпуска 9-х и 11-х классов, анализа выбираемости предметов единого государственного экзамена (ЕГЭ), распределения абитуриентов по предметам ЕГЭ в срезе потенциального восполнения инженерных кадров за период с 2019 по 2024 г. и преодоления минимальных для поступления в вузы порогов. *Материалы и методы.* Использовались методы подготовки и очистки данных, обработки выборочных совокупностей на основе построения вариационных рядов, определения выборочных долей, метод гистограмм для визуализации полученных данных, корреляционного и регрессионного анализа. Анализ результатов ЕГЭ осуществляется с позиции преодоления/непреодоления минимального порога, устанавливаемого Минобрнауки России для подведомственных ему вузов. *Результаты.* По результатам проведенного анализа определены нисходящие тренды в перспективе восполнения инженерных кадров, связанные со снижением качества подготовки в школе, установлена закономерность снижения количества сдающих ЕГЭ по физике с одновременным, но непропорциональным в части преодолевающих минимальный порог ростом аналогичного показателя по информатике. Выявлен абсолютный

© Костров Б. В., Хруничев Р. В., 2025. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

минимум результатов ЕГЭ по многим критически важным для инженерного образования предметам в 2023 г. *Выводы.* Рост числа бюджетных мест на инженерные направления подготовки и специальности не приводит к росту популярности последних. Такие явления, как недоборы, а особенно недобор в 2023 г., когда проблемы с приемом возникли и в ряде столичных вузов, стали обыденностью на фоне снижения качества подготовки абитуриентов.

**Ключевые слова:** школьное образование, анализ результатов ЕГЭ, восполнение инженерных кадров, выборочный анализ, выбираемость предметов ЕГЭ, кадровое обеспечение предприятий оборонно-промышленного комплекса, технологический суверенитет, качество математического и естественно-научного образования

**Для цитирования:** Костров Б. В., Хруничев Р. В. Статистический анализ восполнения инженерных кадров на примере Рязанской области // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 1. С. 58–74. doi: 10.21685/2227-8486-2025-1-5

## STATISTICAL ANALYSIS OF THE REPLENISHMENT OF ENGINEERING PERSONNEL ON THE EXAMPLE OF THE RYAZAN REGION

**B.V. Kostrov<sup>1</sup>, R.V. Khrunichev<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup> Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, Ryazan, Russia

<sup>1</sup> kostrov.b.v@evm.rsreu.ru, <sup>2</sup> hrunichev\_robert@mail.ru

**Abstract. Background.** This paper provides a statistical and analytical analysis of the prospects for providing engineering personnel to enterprises based on statistical data on the graduation of schoolchildren from the Ryazan region and the results of the Unified State Exam. The purpose of the work is to analyze the overall potential of the region to increase the volume of training in engineering areas of training and specialties and to identify trends at the stage of general training of applicants in the main subjects necessary for the training of engineering personnel in educational institutions of secondary general education, to identify patterns and trends in the arrays of sample populations graduating from grades 9 and 11 in the period from 2017 to 2025. The tasks of processing a number of sample sets of the 9th and 11th grade graduates, analyzing the choice of subjects for the Unified State Exam (USE), distributing applicants by USE subjects in the context of the potential replenishment of engineering personnel for the period from 2019 to 2024 and overcoming the minimum thresholds for admission to universities are considered. *Materials and methods.* In preparing the materials of the article, methods of data preparation and purification, processing of sample populations based on the construction of variation series, determination of sample fractions, the histogram method for visualizing the data obtained, correlation and regression analysis were used. The analysis of the results of the Unified State Exam is carried out from the perspective of overcoming / not overcoming the minimum threshold set by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for universities subordinate to it. *Results.* Based on the results of the analysis, downward trends have been identified in the prospect of replenishing engineering staff associated with a decrease in the quality of school education, and a pattern has been established for a decrease in the number of students taking the Unified State Exam in physics with a simultaneous, but disproportionate, increase in a similar indicator in computer science. The absolute minimum of the Unified State Exam results in many subjects critical for engineering education in 2023 has been revealed. *Conclusions.* The increase in the number of budget places for engineering training and specialties does not lead to an increase in the popularity of the latter. Such phenomena as shortages, and especially shortages in 2023, when problems with admission arose in a number of metropolitan universities, have become commonplace against the background of a decrease in the quality of applicants' training.

**Keywords:** school education, analysis of the results of the Unified State Exam, replenishment of engineering personnel, selective analysis, selection of subjects of the Unified State Exam, staffing of defense industry enterprises, technological sovereignty, quality of mathematical and natural science education

**For citation:** Kostrov B.V., Khrunichev R.V. Statistical analysis of the replenishment of engineering personnel on the example of the Ryazan region. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(1):58–74. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-1-5

### **Введение**

Восполнение инженерных кадров в современных условиях является критически важной задачей обеспечения технологического суверенитета страны, поставленной президентом РФ. Рязанский радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина является ведущим вузом региона по обеспечению предприятий оборонно-промышленного комплекса инженерными кадрами, где ведется подготовка специалистов по многим направлениям развития технологического суверенитета страны [1]. Основы подготовки будущих инженеров закладываются на этапе школьного образования абитуриентов. Перспективы восполнения инженерных кадров базируются на качестве подготовки школьников по ключевым для данного направления предметам: математике, физике, химии, информатике и другим предметам естественно-научного цикла.

В последние годы проблема обеспечения отечественных предприятий высококвалифицированными инженерными кадрами неоднократно озвучивалась на уровне президента, Правительства и Государственной Думы РФ, что свидетельствует об остроте данной проблемы. Так, по данным ВНИИ труда, в 2023 г. общее количество вакансий по инженерным профессиям составило 574,2 тыс. [2, 3]. Для решения проблемы дефицита инженерных кадров принят ряд нормативных актов, направленных на достижение технологического лидерства РФ, развитие вузов, обеспечивающих подготовку инженерных кадров и научных разработок, развитие системы школьного образования, среди которых:

– распоряжение Правительства РФ от 20.05.2023 № 1315-р (ред. от 21.10.2024) «Об утверждении Концепции технологического развития на период до 2030 года» (вместе с «Концепцией технологического развития на период до 2030 года») [4];

– указ Президента РФ от 07.05.2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» [5];

– поручение Правительства Российской Федерации от 7 февраля 2024 г. «По развитию вузов, обеспечивающих подготовку инженерных кадров и научных разработок для создания технологического суверенитета» [6];

– распоряжение Правительства РФ от 19 ноября 2024 г. № 3333-р «Комплексный план мероприятий по повышению качества математического и естественно-научного образования на период до 2030 года» [7].

В плане дефицита инженерных кадров Рязанский, как регион промышленный, не является исключением [8], несмотря на то, что количество бюджетных мест на технические направления подготовки в профильные вузы региона поэтапно увеличивается, как и в целом по стране с 2020 г. [9].

### Материалы и методы

Основной целью работы является анализ общего потенциала региона по наращиванию объема подготовки кадров по инженерным направлениям подготовки и специальностям и определение тенденций на этапе общей подготовки абитуриентов по основным предметам, необходимым для подготовки инженерных кадров, а также анализ перспективы восполнения кадров на предприятиях ОПК и в иных организациях, формирующих технологический суверенитет России и обеспечивающих задел на будущее. Основным является определение закономерностей и трендов по массивам выборочных данных выпуска 9-х и 11-х классов в период с 2017 по 2025 г. Важным представляется и анализ распределения абитуриентов по предметам ЕГЭ и преодоления/непреодоления минимального порога, устанавливаемого Минобрнауки России [10] для подведомственных ему вузов в указанном аспекте.

Этапом, предваряющим непосредственный анализ, является использование методов подготовки и очистки данных [11]. Исследование основано на выборочном методе анализа совокупностей результатов ЕГЭ абитуриентов, полученных при подготовке и проведении приемных кампаний 2019–2024 гг. Полученные выборочные совокупности являются выборками большого объема, поскольку общее число элементов  $n$  выборки значительно превышает уровень в 30 единиц, определяемых методами математической статистики. Выборочные доли определялись как отношение числа удовлетворяющих условию элементов  $n_i$  к общему объему выборки  $\omega = n_i/n$  [12, 13]. Для визуального представления опытных данных по годам применен метод гистограмм [14]. Предварительная подготовка и очистка данных заключалась в выборе только тех абитуриентов, которые поступили на бюджет по общему конкурсу [15], исключении абитуриентов с отсутствующими результатами ЕГЭ, исправлении неточных данных и очистке данных от меньших значений вариативных предметов ЕГЭ.

### Результаты и обсуждение

Исследование основано на статистических данных, предоставленных Министерством образования Рязанской области. На рис. 1, 2 приведены данные о выпускниках 9-х и 11-х классов за 2017–2024(5) гг., а также доля (в процентах) выпускников 9-х классов, перешедших в старшую школу (рис. 3).

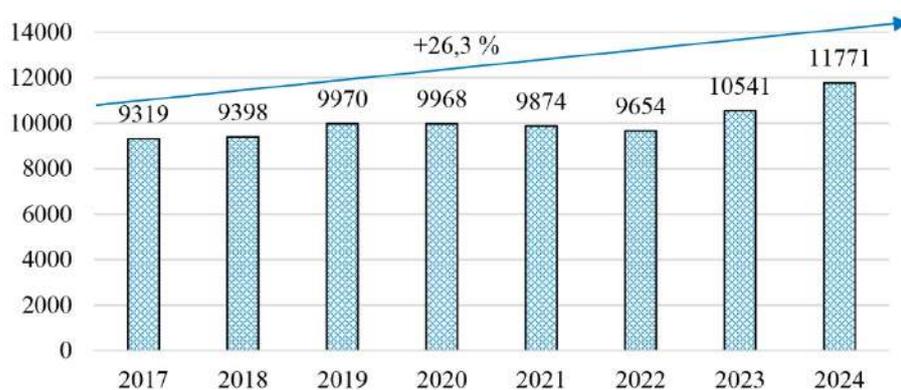


Рис. 1. Количество выпускников 9-х классов

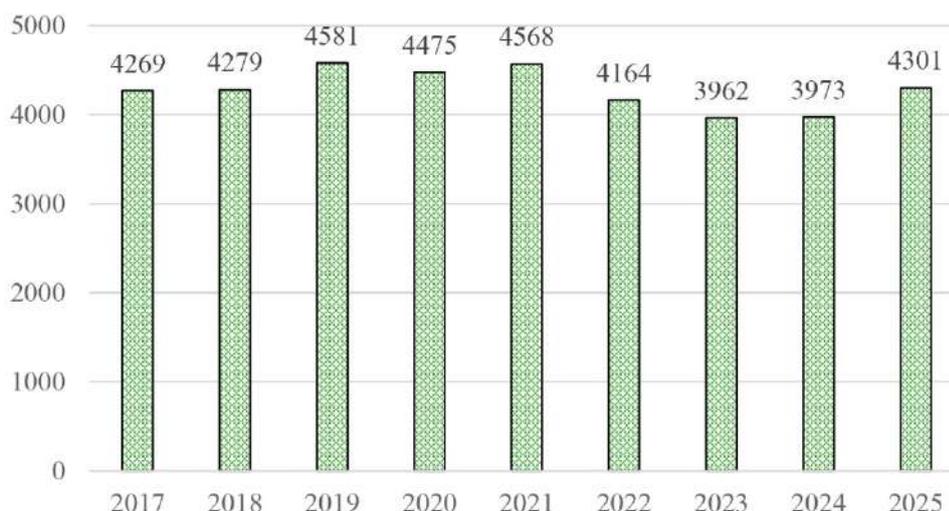


Рис. 2. Количество выпускников 11-х классов

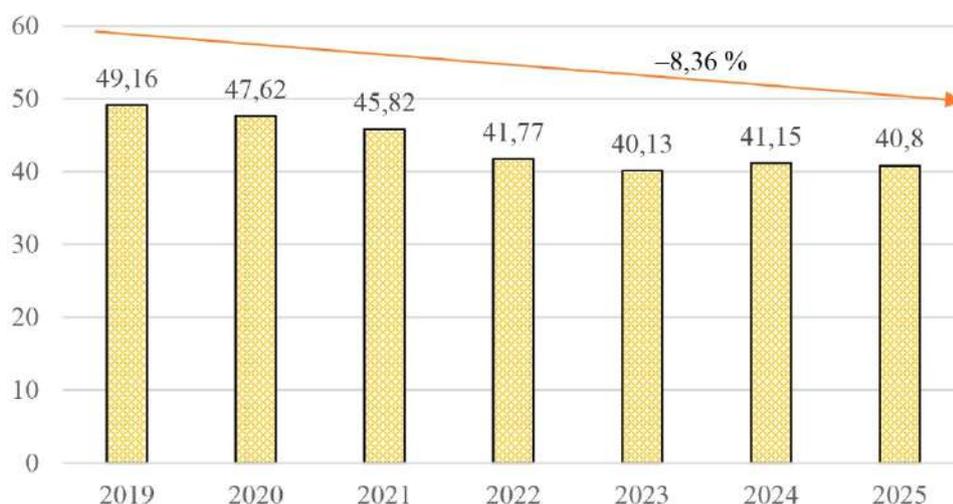


Рис. 3. Доля выпускников 9-х классов, переходящих в старшую школу, %

На диаграммах видно, что при увеличении количества выпускников 9-х классов не происходит увеличения учащихся 11-х классов, несмотря на не снижающуюся востребованность высшего образования [16]. На рис. 3 представлено количество выпускников 11-х классов со сдвигом в два года относительно количества выпускников 9-х классов для объективной оценки показателей, т.е. процент учащихся 11-х классов в 2019 г. вычислен от количества выпускников 9-х классов в 2017 г. Видно, начиная с 2022 г. (рис. 2) наблюдается некоторый постоянный уровень выпускников 11-х классов, но за последние 7 лет общая доля учеников, переходящих из 9-х в 11-е классы, сократилась практически на 8,5 %. Наблюдается значительный рост популярности программ СПО для выпускников 9-х классов [17].

Рассмотрим общую статистику выбираемости предметов ЕГЭ, обеспечивающей прием в вузы на технические направления подготовки и специальности.

Кроме того, для возможности объективного сравнительного анализа приведем общую статистику ЕГЭ по некоторым гуманитарным предметам. Вне зависимости от того, что минимальные пороги по предметам ЕГЭ, устанавливаемые Минобрнауки, в период с 2019 по 2024 г. незначительно менялись, для объективности анализа приводимых данных установлены минимальные баллы, дающие право абитуриентам подавать документы в вузы в последние 5 лет: русский язык – 40 баллов, математика профильная – 39 баллов, физика/информатика – 39/44 балла (предмет по выбору поступающего), химия – 39 баллов, обществознание – 45 баллов.

За указанный период наблюдается стремительное сокращение сдающих обязательный для всех технических направлений предмет ЕГЭ по математике – уменьшение с 2019 по 2024 г. составило более 25 % (рис. 4, 5), что коррелирует в общероссийской тенденции [18].

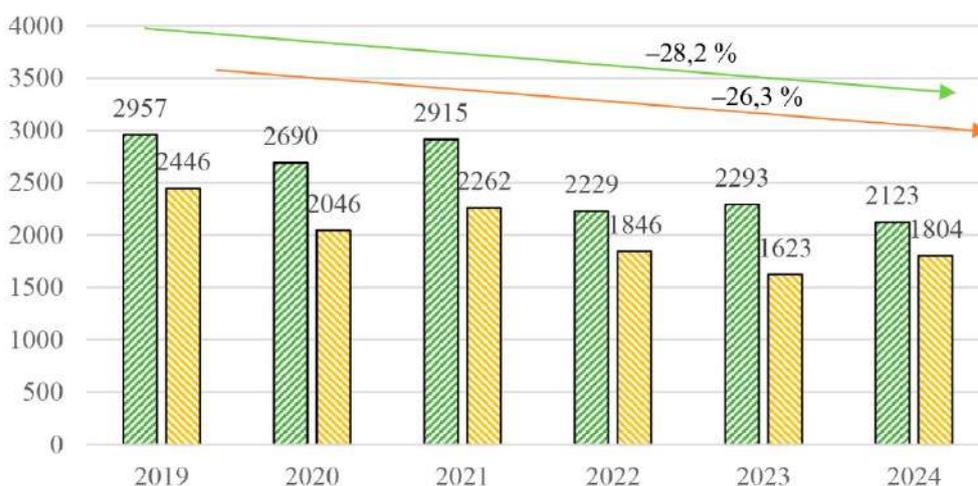


Рис. 4. Количество выпускников 11-х классов, сдававших ЕГЭ по профильной математике и преодолевших уровень 39 баллов

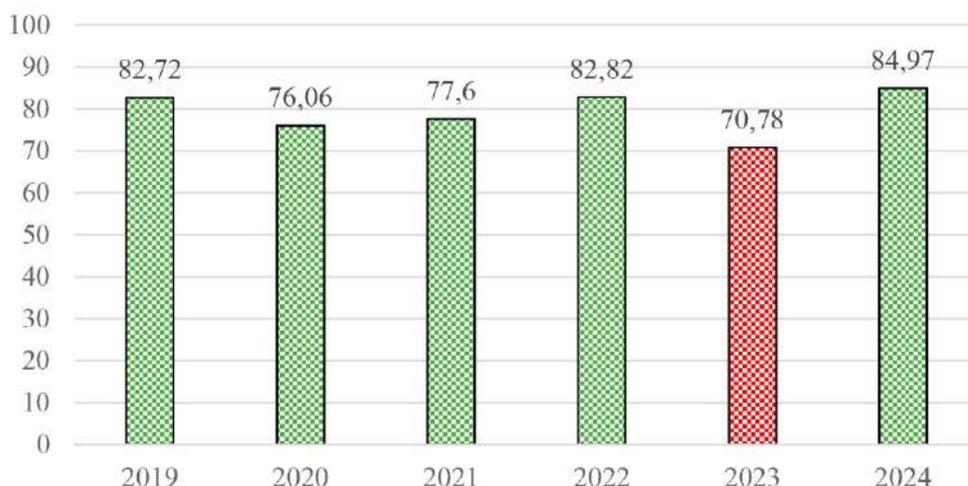


Рис. 5. Доля выпускников 11-х классов, преодолевших уровень 39 баллов по профильной математике, %

Для прогнозирования результатов ЕГЭ по ключевым для инженерного образования предметам – профильной математике и физике (рис. 6, 7) – построим уравнение линейной регрессии  $y'_x = a \cdot x + b$  по количеству сдававших ЕГЭ по профильной математике ( $x$ ) и преодолевших пороговое значение в 39 баллов ( $y$ ), а также определим коэффициент корреляции по этим параметрам. В случае линейной регрессии параметры  $a$  и  $b$  находятся из системы нормальных уравнений методом наименьших квадратов (МНК):

$$\begin{cases} n \cdot b + a \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i, \\ b \sum_{i=1}^n x_i + a \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i. \end{cases} \quad (1)$$

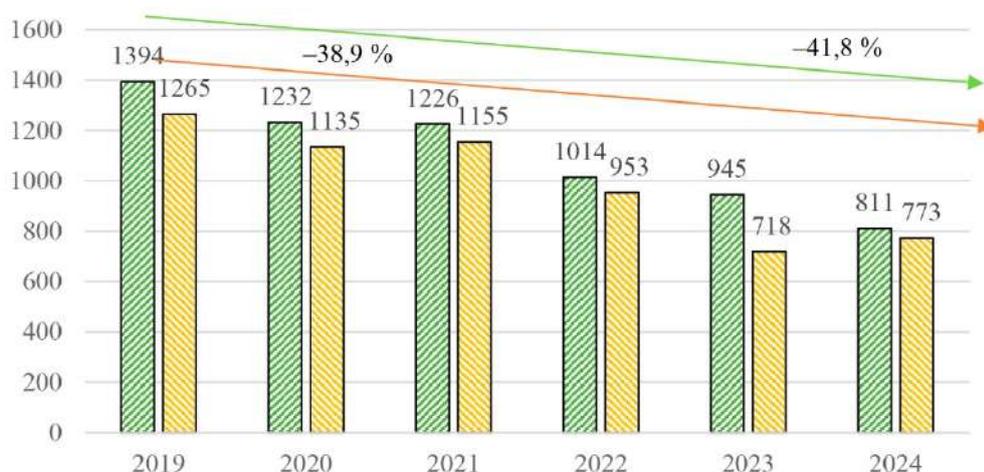


Рис. 6. Количество выпускников 11-х классов, сдававших ЕГЭ по физике и преодолевших уровень 39 баллов

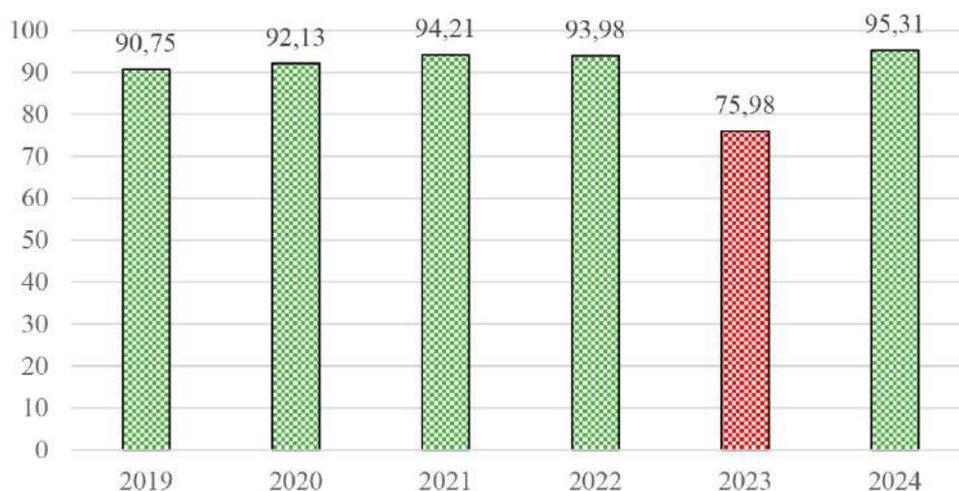


Рис. 7. Доля выпускников 11-х классов, преодолевших уровень 39 баллов по физике, %

Парный коэффициент корреляции определим по формуле

$$r_{xy} = \frac{\overline{x \cdot y} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sqrt{\overline{x^2} - \bar{x}^2} \cdot \sqrt{\overline{y^2} - \bar{y}^2}}. \quad (2)$$

По результатам вычислений получено уравнение регрессии для профильной математики  $y'_x = 0,769 \cdot x + 56$  с коэффициентом корреляции  $r = 0,9133$ , что по шкале Чеддока свидетельствует о высокой зависимости. В соответствии с долей выпускников 11-х классов, сдававших профильную математику в 2024 г., равной 53,436 %, вероятное количество выпускников, которые будут сдавать ее в 2025 г., составляет 2298 человек. Тогда по уравнению линейной регрессии количество абитуриентов, преодолевших порог в 39 баллов, можно ожидать на уровне 1823 человек.

По формулам МНК (1) определим параметры уравнения линейной регрессии для ЕГЭ по физике, а также найдем коэффициент корреляции по формуле (2). Получено уравнение регрессии для ЕГЭ по физике  $y'_x = 0,9745 \cdot x - 76$  с коэффициентом корреляции  $r = 0,952$ , что по шкале Чеддока свидетельствует о высокой зависимости. В соответствии с долей выпускников 11-х классов, сдававших физику в 2024 г., равной 20,4 %, вероятное количество выпускников, которые будут сдавать ее в 2025 г., составляет 877 человек. Тогда по уравнению линейной регрессии количество абитуриентов, преодолевших порог в 39 баллов, можно ожидать на уровне 779 человек.

Отметим, что при обозначившейся тенденции на увеличение количества сдающих ЕГЭ по информатике (рис. 8, 9) доля абитуриентов, способных преодолеть минимальный порог для поступления в вузы, подведомственные Минобрнауки России, в последние три года значительно сократилась. Одновременно с этим ситуация с выбором ЕГЭ по физике имеет резко отрицательную динамику, что напрямую отражается на сохранности контингента в вузах по техническим направлениям подготовки и, как следствие, на динамике восполнения кадров на предприятиях. Кроме того, снижается и средний балл по данному предмету ЕГЭ [19].

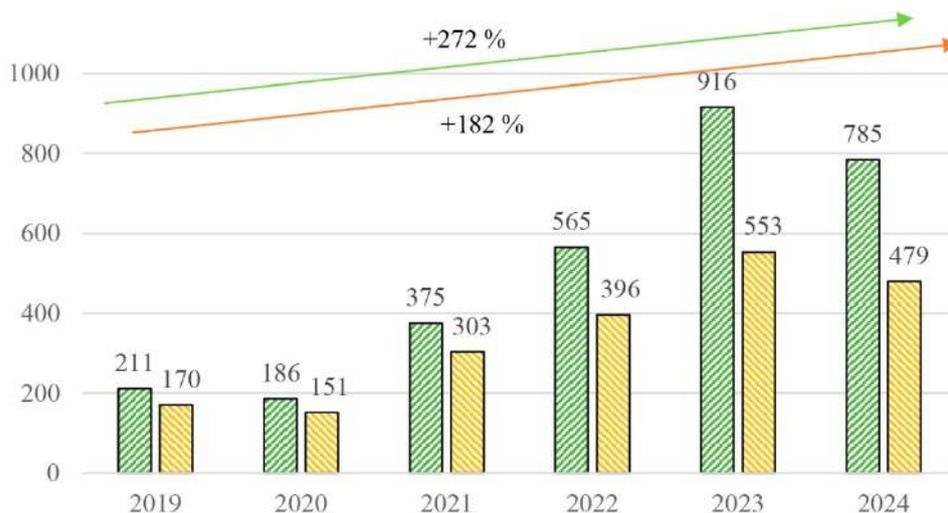


Рис. 8. Количество выпускников 11-х классов, сдававших ЕГЭ по информатике и преодолевших уровень 44 баллов

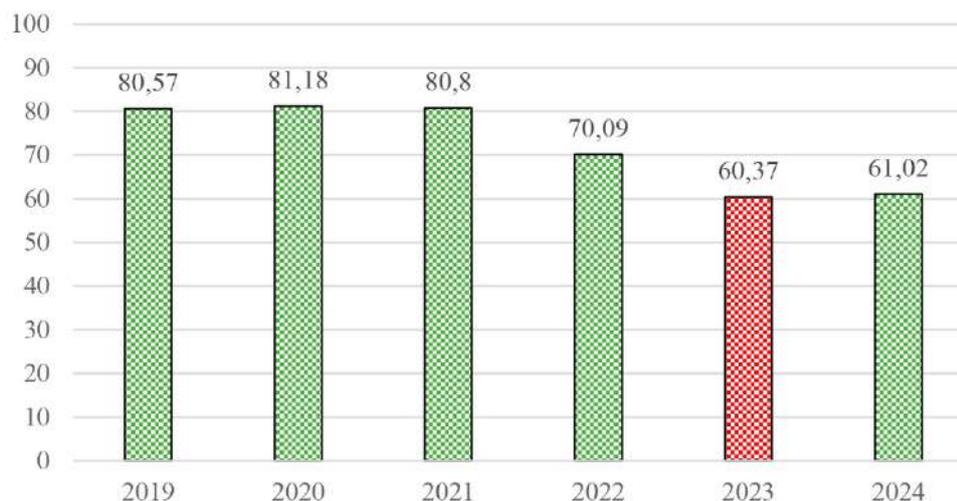


Рис. 9. Доля выпускников 11-х классов, преодолевших уровень 40 баллов по информатике, %

Наряду с остальными предметами ЕГЭ химия не стала исключением, в соответствии с общей тенденцией в период с 2019 по 2024 г. количество выпускников 11-х классов, способных преодолеть порог в 39 баллов сократилось более чем на 20 % (рис. 10, 11).

Тревожные статистические данные отмечаются и по обязательному для всех выпускников предмету ЕГЭ русский язык (рис. 12, 13), являющемуся также обязательным для поступления на любое направление подготовки или специальность в вузы. Уменьшение количества потенциальных абитуриентов только по этому предмету составило 16,4 %. Значительное уменьшение произошло в 2023 и 2024 гг., когда доля выпускников, способных преодолеть порог в 40 баллов, упала ниже 90 и 95 % соответственно.

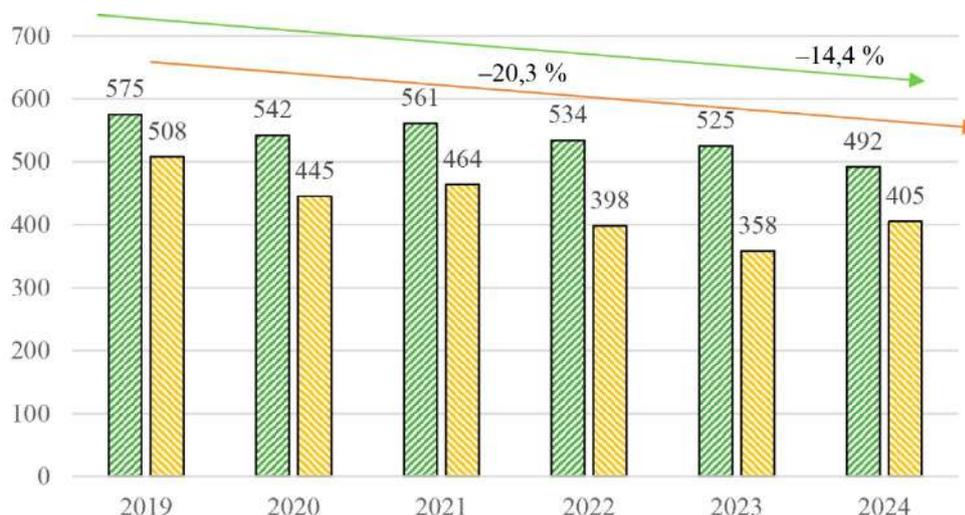


Рис. 10. Количество выпускников 11-х классов, сдававших ЕГЭ по химии и преодолевших уровень 39 баллов

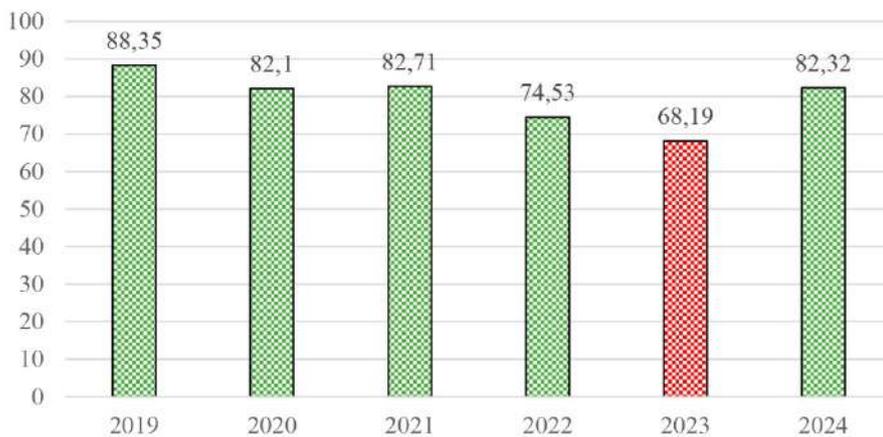


Рис. 11. Доля выпускников 11-х классов, преодолевших уровень 39 баллов по химии, %

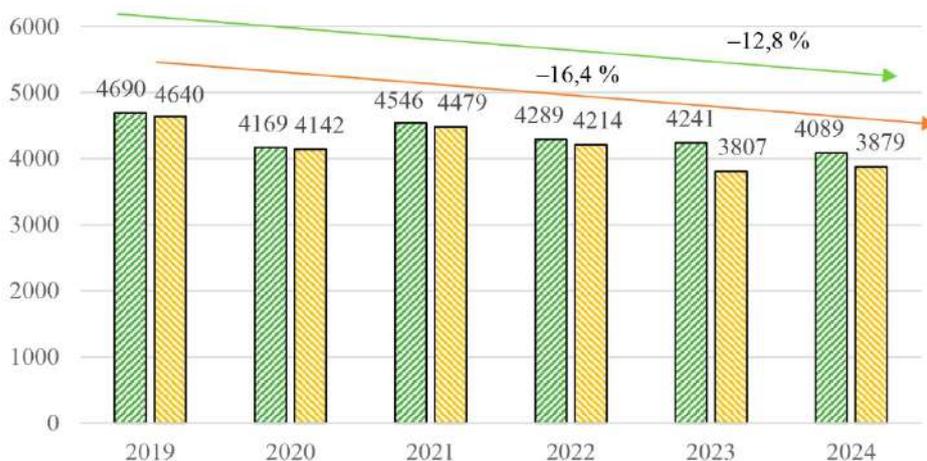


Рис. 12. Количество выпускников 11-х классов, сдававших ЕГЭ по русскому языку и преодолевших уровень 40 баллов

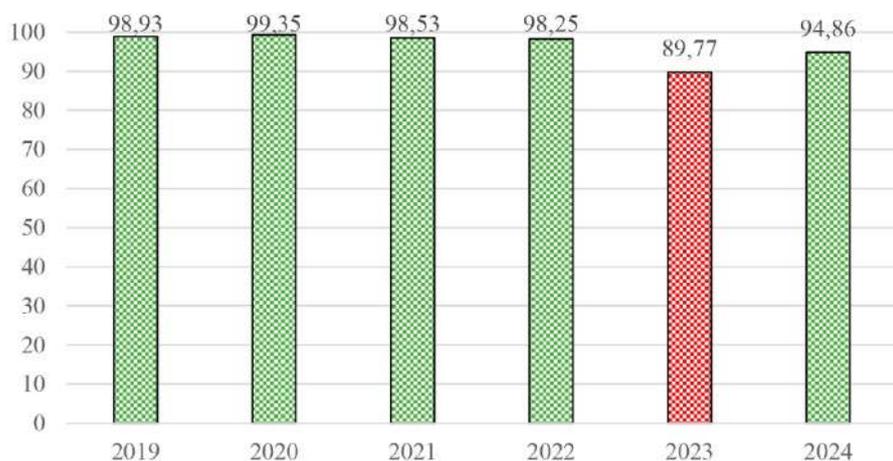


Рис. 13. Доля выпускников 11-х классов, преодолевших уровень 40 баллов по русскому языку, %

На рис. 14, 15 отражены статистические данные ЕГЭ по обществознанию.

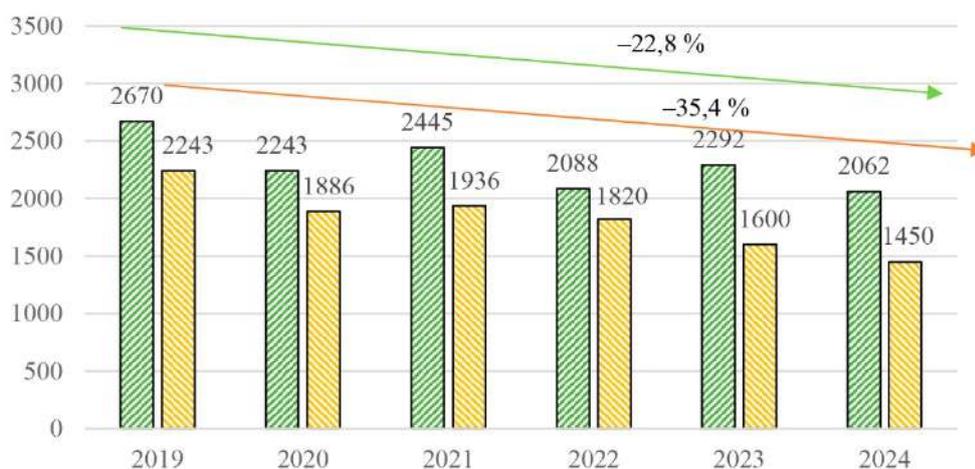


Рис. 14. Количество выпускников 11-х классов, сдававших ЕГЭ по обществознанию и преодолевших уровень 45 баллов

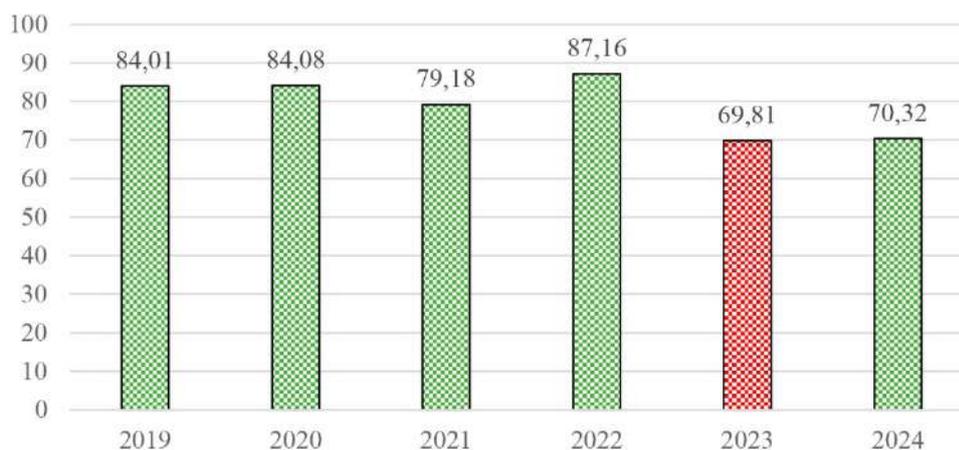


Рис. 15. Доля выпускников 11-х классов, преодолевших уровень 45 баллов по обществознанию, %

Отметим также, что провал по результатам ЕГЭ для высшей школы в части обеспечения приема на технические направления подготовки и специальности произошел в 2023 г. (см. рис. 5, 7, 9, 11, 13, 15) – абсолютный минимум по доле преодолевших необходимый минимальный порог для поступления в вуз.

### Обсуждение

С 2021 г. Порядком приема на обучение по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры, утвержденным Приказом Минобрнауки России от 21 августа 2020 г. № 1076, предусмотрена возможность установления одного предмета по выбору поступающего. Так, альтернативой физике

устанавливалась возможность сдачи ЕГЭ по информатике на большинство технических направлений подготовки и специальностей, а также химии на некоторые направления.

Обозначенные изменения к и без того наметившейся тенденции снижения сдающих физику привели к удручающему положению (см. рис. 6, 7) – с 2019 по 2024 г. доля выпускников, сдающих физику, снизилась практически на 40 %. При этом, несмотря на стремительный рост желающих сдавать информатику (см. рис. 8, 9) в альтернативу к физике, это не привело к столь же стремительному увеличению количества преодолевших порог в 44 балла, т.е. в абсолютных цифрах уменьшение сдавших физику почти на 500 человек привело к увеличению сдавших информатику на 300 человек.

Уровень среднего общего образования снижается не только по предметам естественно-научного цикла. Отметим, что обществознание наряду с русским языком является предметом гуманитарного цикла, однако и здесь тренды неутешительные. Количество школьников, способных преодолеть 45 баллов по ЕГЭ, уменьшилось с 2019 по 2024 г. на 35,4 %.

Рязанский радиотехнический университет со своей стороны для повышения привлекательности таких предметов ЕГЭ, как математика, физика, информатика, организовал на своей базе физико-математическую школу, где начиная с 2020 г. школьники безвозмездно готовятся к ЕГЭ по профильным для инженерного образования предметам. Количество школ-партнеров в 2023 г. достигло 80 и продолжает увеличиваться, а количество школьников, обучающихся в физико-математической школе, достигло 1525 и также продолжает расти.

### *Заключение*

Приведены статистический анализ данных о количестве выпускников школ 9-х и 11-х классов, статистический ретроспективный анализ динамики выбираемости и результатов ЕГЭ в период с 2019 по 2024 г. в Рязанской области.

Анализ показывает, что начиная с 2020 г. наряду с резким увеличением количества бюджетных мест по техническим направлениям подготовки и специальностям на фоне дефицита педагогических кадров наблюдается также и стремительное ухудшение качества подготовки в школах [20], что приводит к значительному уменьшению количества абитуриентов, а в перспективе 1–3 лет – к резкому снижению потенциала восполнения инженерных кадров.

Сложившаяся в 2023 г. критическая ситуация с обеспечением приема затронула не только региональные вузы, где «недобор» уже стал обыденностью, но и ведущие столичные университеты. Последствия приемной кампании 2023 г. привели к ряду фундаментальных сдвигов, таких как обеспечение возможности пересдачи одного предмета ЕГЭ (начиная с 2024 г.), пересмотр уровня сложности контрольно-измерительных материалов ЕГЭ, появлению Распоряжения Правительства РФ от 19 ноября 2024 г. № 3333-р «Комплексный план мероприятий по повышению качества математического и естественно-научного образования на период до 2030 года».

Открытым остается вопрос о качестве подготовки абитуриентов. Снижение уровня сложности КИМ ЕГЭ позволяет абитуриентам преодолевать минимальные пороги по предметам для поступления в вузы, но повышает ли это качество подготовки абитуриентов? Дообучение уже студентов до уровня

приемлемого для восприятия сложных технических дисциплин становится проблемой вуза [2].

В соответствии с полученными прогнозными значениями следует ожидать количество преодолевших 39 баллов по профильной математике в 2025 г. на уровне 1823 человек, а по физике – 779 человек.

### *Список литературы*

1. Об утверждении приоритетных направлений проектов технологического суверенитета и проектов структурной адаптации экономики Российской Федерации и Положения об условиях отнесения проектов к проектам технологического суверенитета и проектам структурной адаптации экономики Российской Федерации, о представлении сведений о проектах технологического суверенитета и проектах структурной адаптации экономики Российской Федерации и ведении реестра указанных проектов, а также о требованиях к организациям, уполномоченным представлять заключения о соответствии проектов требованиям к проектам технологического суверенитета и проектам структурной адаптации экономики Российской Федерации : постановление Правительства РФ № 603 от 15 апреля 2023 г. // Правительство России. URL: <http://government.ru/docs/48272/> (дата обращения: 03.02.2025).
2. Частота кадров: почему российским компаниям не хватает инженеров // Известия. URL: <https://iz.ru/1738941/kseniia-nabatkina-iana-shturma/chastota-kadrov-pochemu-rossiiskim-kompaniiam-ne-khvataet-inzhenerov/> (дата обращения: 24.12.2024).
3. Дефицит инженеров стал в России рекордным // Новые известия. URL: <https://newizv.ru/news/2024-07-26/defitsit-inzhenerov-stal-v-rossii-rekordnym-432160> (дата обращения: 03.02.2025).
4. Об утверждении Концепции технологического развития на период до 2030 года (вместе с «Концепцией технологического развития на период до 2030 года») : распоряжение Правительства РФ № 1315-р от 20.05.2023 (ред. от 21.10.2024) // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202305250050> (дата обращения: 24.12.2024).
5. О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года : указ Президента РФ № 309 от 07.05.2024 // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202405070015> (дата обращения: 24.12.2024).
6. Поручение Правительства Российской Федерации от 7 февраля 2024 г. по развитию вузов, обеспечивающих подготовку инженерных кадров и научных разработок для создания технологического суверенитета // Правительство России. URL: <http://government.ru/docs/50803/> (дата обращения: 24.12.2024).
7. Комплексный план мероприятий по повышению качества математического и естественно-научного образования на период до 2030 года : распоряжение Правительства РФ № 3333-р от 19 ноября 2024 г. // Правительство России. URL: <http://government.ru/docs/all/156334/> (дата обращения: 24.12.2024).
8. Рязанская область испытывает дефицит квалифицированных кадров // Рязанская газета. URL: <https://rg62.info/2023/12/04/ryazanskaya-oblast-ispytyvaet-deficit-kvalificirovannyh-kadrov/> (дата обращения: 03.02.2025).
9. С 2020 года в вузах России растёт количество бюджетных мест для подготовки инженерных кадров // Российское образование. URL: <https://ruobraz.ru/news/s-2020-goda-v-vuzakh-rossii-rastet-kolichestvo-byudzhethnykh-mest-dlya-podgotovki-inzhenernykh-kadrov/> (дата обращения: 03.02.2025).
10. Об установлении минимального количества баллов единого государственного экзамена по общеобразовательным предметам, соответствующим специальности или направлению подготовки, по которым проводится прием на обучение

- в образовательных организациях, находящихся в ведении Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, на 2022/23 учебный год : приказ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 713 от 05.08.2021 // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202110010029?index=2> (дата обращения: 03.02.2025).
11. Пацей Н. В., Шиман Д. В., Наркевич А. С., Сухорукова И. Г. Методы очистки и подготовки информации для решения задач интеллектуального анализа // Интеграция и развитие научно-технического и образовательного сотрудничества – взгляд в будущее : сб. ст. II Междунар. науч.-техн. конф. «Минские научные чтения – 2019» (г. Минск, 11–12 декабря 2019 г.) : в 3 т. Минск : БГТУ, 2020. Т. 3. С. 136–138.
  12. Кулаичев А. П. Методы и средства комплексного статистического анализа данных : учеб. пособие. 5-е изд., перераб. и доп. М. : ИНФРА-М, 2025. 484 с. (Высшее образование) doi: 10.12737/25093
  13. Хруничев Р. В. Прикладные статистические методы анализа : учеб. пособие. Рязань : Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2023. 80 с.
  14. Солонин С. И. Метод гистограмм : учеб. пособие. Екатеринбург : ЦНОТ ИТОО УрФУ, 2014. 97 с.
  15. Об утверждении Порядка приема на обучение по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры : приказ Министерства науки и высшего образования РФ № 1076 от 21 августа 2020 г. (с изм. и доп. от 25.01.2021, 13.08.2021, 26.08.2022, 10.02.2023, 16.11.2023) // Гарант.Ру. 2025. URL: <https://base.garant.ru/74541661/#friends> (дата обращения: 15.01.2025).
  16. Что происходит в российском образовании: 6 трендов из статистики // Skillbox. Образование 4.0. URL: <https://skillbox.ru/media/education/cto-proiskhodit-v-gossiyskom-obrazovanii-6-trendov-iz-statistiki/> (дата обращения: 04.02.2025).
  17. Сводный отчет по форме федерального статистического наблюдения № СПО-1 «Сведения об образовательной организации, осуществляющей образовательную деятельность по образовательным программам среднего профессионального образования» на начало 2024/25 учебного года // Минпросвещения России. URL: [https://edu.gov.ru/activity/statistics/secondary\\_prof\\_edu](https://edu.gov.ru/activity/statistics/secondary_prof_edu) (дата обращения: 04.02.2025).
  18. За два года меньше ребят стали сдавать ЕГЭ по профильной математике и физике // Skillbox. Образование 4.0. URL: <https://skillbox.ru/media/education/za-dva-goda-menshe-rebyat-stali-sdavati-egje-po-profilnoy-matematike-i-fizike/> (дата обращения: 04.02.2025).
  19. Министры образования поработали над ошибками // Коммерсантъ. Российское образование. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5720583> (дата обращения: 04.02.2025).
  20. В России растет нехватка учителей // БФМ.РУ. 2025. URL: <https://www.bfm.ru/news/565855> (дата обращения: 15.01.2025).

### *References*

1. On approval of priority areas of technological sovereignty projects and projects of structural adaptation of the Economy of the Russian Federation and the Regulations on the Conditions for Classifying projects as Projects of Technological Sovereignty and Projects of Structural Adaptation of the Economy of the Russian Federation, on providing information on projects of technological sovereignty and projects of structural adaptation of the Economy of the Russian Federation and maintaining a register of these projects, as well as on requirements for organizations, authorized to submit opinions on the compliance of projects with the requirements for projects of technological sovereignty and projects of structural adaptation of the economy of the Russian Federation : Decree

- of the Government of the Russian Federation No. 603 dated April 15, 2023. *Pravitel'stvo Rossii = Government of Russia*. (In Russ.). Available at: <http://government.ru/docs/48272/> (accessed 03.02.2025).
2. Frame rate: why Russian companies lack engineers. *Izvestiya = Izvestia*. (In Russ.). Available at: <https://iz.ru/1738941/kseniia-nabatkina-iana-shturma/chastota-kadrov-pochemu-rossiiskim-kompaniiam-ne-khvataet-inzhenerov/> (accessed 24.12.2024).
  3. The shortage of engineers has become a record in Russia. *Novye izvestiya = Novye Izvestia*. (In Russ.). Available at: <https://newizv.ru/news/2024-07-26/defitsit-inzhenerov-stal-v-rossii-rekordnym-432160> (accessed 03.02.2025).
  4. On approval of the Concept of Technological Development for the period up to 2030 (together with the "Concept of Technological Development for the period up to 2030") : Decree of the Government of the Russian Federation No. 1315-r dated 05/20/2023 (as amended on 10/21/2024). *Ofitsial'nyy internet-portal pravovoy informatsii = Official Internet Portal of Legal Information*. (In Russ.). Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202305250050> (accessed 24.12.2024).
  5. On the national development Goals of the Russian Federation for the period up to 2030 and for the future up to 2036: Decree of the President of the Russian Federation No. 309 dated 05/07/2024. *Ofitsial'nyy internet-portal pravovoy informatsii = Official Internet portal of Legal Information*. (In Russ.). Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202405070015> (accessed 24.12.2024).
  6. Instruction of the Government of the Russian Federation dated February 7, 2024 on the development of universities providing training of engineering personnel and scientific developments for the creation of technological sovereignty. *Pravitel'stvo Rossii = Government of Russia*. (In Russ.). Available at: <http://government.ru/docs/50803/> (accessed 24.12.2024).
  7. Comprehensive action plan for improving the quality of mathematical and natural science education for the period up to 2030 : Decree of the Government of the Russian Federation No. 3333-r dated November 19, 2024. *Pravitel'stvo Rossii = Government of Russia*. (In Russ.). Available at: <http://government.ru/docs/all/156334/> (accessed 24.12.2024).
  8. The Ryazan region is experiencing a shortage of qualified personnel. *Ryazanskaya gazeta = Ryazanskaya Gazeta*. (In Russ.). Available at: <https://rg62.info/2023/12/04/ryazanskaya-oblast-ispytyvaet-deficit-kvalificirovannyh-kadrov/> (accessed 03.02.2025).
  9. Since 2020, the number of budget places for training engineering personnel has been growing in Russian universities. *Rossiyskoe obrazovanie = Russian Education*. (In Russ.). Available at: <https://ruobraz.ru/news/s-2020-goda-v-vuzakh-rossii-rastet-kolichestvo-byudzhethnykh-mest-dlya-podgotovki-inzhenernykh-kadrov/> (accessed 03.02.2025).
  10. On the establishment of the minimum number of points of the unified state exam in general education subjects corresponding to the specialty or field of study for which admission to study in educational organizations under the jurisdiction of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the 2022/23 academic year: Order of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 713 dated 08/05/2021. *Ofitsial'nyy internet-portal pravovoy informatsii = The official Internet portal of legal information*. (In Russ.). Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202110010029?index=2> (accessed 03.02.2025).
  11. Patsey N.V., Shiman D.V., Narkevich A.S., Sukhorukova I.G. Methods of cleaning and preparing information for solving intellectual analysis problems. *Integratsiya i razvitie nauchno-tekhnicheskogo i obrazovatel'nogo sotrudnichestva – vzglyad v budushchee: sb. st. II Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Minskije nauchnye chteniya – 2019» (g. Minsk, 11–12 dekabrya 2019 g.): v 3 t. = Integration and development of scientific, technical and educational cooperation – a look into the future : collection of art. II International Scientific and Technical Conference "Minsk Scientific Readings – 2019" (Minsk, December 11–12, 2019) : in 3 volumes*. Minsk: BGTU, 2020;3:136–138. (In Russ.)

12. Kulaichev A.P. *Metody i sredstva kompleksnogo statisticheskogo analiza dannykh: ucheb. posobie. 5-e izd., pererab. i dop. = Methods and means of complex statistical data analysis : textbook. 5th ed., revised and additional.* Moscow: INFRA-M, 2025:484. (In Russ.). doi: 10.12737/25093
13. Khrunichev R.V. *Prikladnye statisticheskie metody analiza: ucheb. posobie = Applied statistical methods of analysis : textbook.* Ryazan': Ryazan. gos. radiotekhn. un-t, 2023:80. (In Russ.)
14. Solonin S.I. *Metod gistogramm: ucheb. posobie = The histogram method : textbook.* Ekaterinburg: TsNOT ITOO UrFU, 2014:97. (In Russ.)
15. On approval of the Admission Procedure for higher Education educational programs – Bachelor's degree programs, specialty programs, Master's degree programs: Order of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 1076 dated August 21, 2020 (as amended and supplemented from 25.01.2021, 13.08.2021, 26.08.2022, 10.02.2023, 16.11.2023). *Garant.Ru.* 2025. (In Russ.). Available at: <https://base.garant.ru/74541661/#friends> (accessed 15.01.2025).
16. What is happening in Russian education: 6 trends from statistics. *Skillbox. Obrazovanie 4.0 = Skillbox. Education 4.0.* (In Russ.). Available at: <https://skillbox.ru/media/education/chto-proiskhodit-v-rossiyskom-obrazovanii-6-trendov-iz-statistiki/> (accessed 04.02.2025).
17. Summary report on the Federal statistical observation form No. SPO-1 "Information on an educational organization engaged in educational activities in secondary vocational education programs" for the beginning of the 2024/25 academic year. *Minprosveshcheniya Rossii = Ministry of Education of the Russian Federation.* (In Russ.). Available at: [https://edu.gov.ru/activity/statistics/secondary\\_prof\\_edu](https://edu.gov.ru/activity/statistics/secondary_prof_edu) (accessed 04.02.2025).
18. In two years, fewer children began to take the Unified State Exam in specialized mathematics and physics. *Skillbox. Obrazovanie 4.0 = Skillbox. Education 4.0.* (In Russ.). Available at: <https://skillbox.ru/media/education/za-dva-goda-menshe-rebyat-stali-sdat-ege-po-profilnoy-matematike-i-fizike/> (accessed 04.02.2025).
19. The Ministers of Education have worked on the mistakes. *Kommersant". Rossiyskoe obrazovanie = Kommersant. Russian education.* (In Russ.). Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/5720583> (accessed: 04.02.2025).
20. The shortage of teachers is growing in Russia. *BFM.RU.* 2025. (In Russ.). Available at: <https://www.bfm.ru/news/565855> (accessed 15.01.2025).

### **Информация об авторах / Information about the authors**

#### **Борис Васильевич Костров**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой электронных  
вычислительных машин,  
Рязанский государственный  
радиотехнический университет  
имени В. Ф. Уткина  
(Россия, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1)  
E-mail: kostrov.b.v@evm.rsreu.ru

#### **Boris V. Kostrov**

Doctor of technical sciences, professor,  
head of the sub-department of electronic  
computing machines,  
Ryazan State Radio Engineering  
University named after V.F. Utkin  
(59/1 Gagarina street, Ryazan, Russia)

#### **Роберт Вячеславович Хруничев**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры электронных  
вычислительных машин,  
Рязанский государственный  
радиотехнический университет  
имени В. Ф. Уткина  
(Россия, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1)  
E-mail: hrunichev\_robert@mail.ru

#### **Robert V. Khrunichev**

Candidate of technical sciences,  
associate professor of the sub-department  
of electronic computing machines,  
Ryazan State Radio Engineering  
University named after V.F. Utkin  
(59/1 Gagarina street, Ryazan, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 06.02.2025**

**Поступила после рецензирования/Revised 11.03.2025**

**Принята к публикации/Accepted 15.03.2025**

## СЕГМЕНТАЦИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПЛАНТОГРАММ СРЕДСТВАМИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

**В. В. Михайлишин**

Федеральный научно-образовательный центр медико-социальной экспертизы  
и реабилитации имени Г. А. Альбрехта Министерства труда и социальной защиты  
Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия  
mikhailishin\_v@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Компьютерная плантография является одним из методов диагностики состояния стоп. В ходе расчета клинико-функциональных показателей при проведении данного исследования одним из этапов является выделение точек, лежащих на границе зоны контакта стопы с опорной поверхностью. Ввиду стремления снизить нагрузку на специалистов при проведении этой процедуры и развития технологий искусственного интеллекта актуальной задачей является разработка модели сегментации зон контакта на плантограммах как одного из этапов автоматизации проведения данного исследования. Цель исследования – разработать и апробировать модель сегментации опорной зоны стопы на снимках компьютерной плантографии средствами искусственного интеллекта. *Материалы и методы.* В исследовании использован датасет, содержащий 500 снимков компьютерной плантографии разных пациентов. *Результаты.* По результатам обучения модели yolol1x-seg (модель сегментации снимков) были получены высокие показатели в задачах детекции и сегментации зон контакта совместно в переднем и среднем отделах стопы и отдельно в заднем отделе стопы. Метрики качества работы модели составили: mAP50 – 0,9727, mAP50-95 – 0,8293, точность – 0,9849, полнота – 0,9684 в задаче детекции сегментируемой области; mAP50 – 0,9727, mAP50-95 – 0,8482, точность – 0,9849, полнота – 0,9688 в задаче семантической сегментации. Полученные показатели подтверждают способность модели эффективно выделять и сегментировать общую зону контакта в переднем и среднем отделах стопы, а также зону контакта в заднем отделе стопы. *Выводы.* Интеграция данной модели в системы поддержки принятия врачебных решений обеспечит ускорение процесса анализа снимков и снижение трудозатрат специалистов, что позволит оптимизировать проведение научных исследований и повысить качество медицинских услуг.

**Ключевые слова:** стопа, компьютерная плантография, искусственный интеллект, семантическая сегментация, зоны контакта, зоны ишемии

**Для цитирования:** Михайлишин В. В. Сегментация электронных плантограмм средствами искусственного интеллекта // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 1. С. 75–83. doi: 10.21685/2227-8486-2025-1-6

## SEGMENTATION OF ELECTRONIC PLANOGRAMS BY MEANS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

**V.V. Mikhailishin**

Federal Scientific and Educational Centre of Medial and Social Expertise  
and Rehabilitation named after G.A. Albrecht of the Ministry of Labour  
and Social Protection of the Russian Federation, St. Petersburg, Russia  
mikhailishin\_v@mail.ru

**Abstract.** *Background.* Computer plantography is one of the methods of diagnosing the condition of the feet. During the calculation of clinical and functional parameters during the study, one of the stages is to identify points lying on the border of the foot's contact zone with the support surface. In the form of active development of artificial intelligence technologies, an urgent task is to develop a model for segmentation of contact zones as one of the stages of automation of this research. The purpose of the work is to develop and evaluate a segmentation model of the foot support zone in computer plantography images using artificial intelligence. *Materials and methods.* The study used a dataset containing 500 images of computer plantography of different patients. *Results.* Based on the results of training the yolo11x-seg model (image segmentation model), high performance was achieved in detecting and segmenting contact zones in the anterior and middle parts of the foot and separately in the posterior part of the foot. The quality metrics of the model were: mAP50 0,9727, mAP50-95 0,8293, accuracy 0,9849, completeness 0,9684 in the segmented area detection task, and mAP50 0,9727, mAP50-95 0,8482, accuracy 0,9849, completeness 0,9688 in the semantic segmentation task. The obtained indicators reflect the ability of the model to effectively identify and segment the common contact area in the forefoot and middle part of the foot, as well as the contact area in the posterior part of the foot. *Conclusions.* The integration of this model into medical decision support systems will speed up the process of image analysis and reduce the labor costs of specialists, which will optimize research and improve the quality of medical services.

**Keywords:** foot, computer plantography, artificial intelligence, semantic segmentation, contact zones, ischemia zones

**For citation:** Mikhailishin V.V. Segmentation of electronic planograms by means of artificial intelligence. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2025;(1):75–83. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-1-6

### Введение

Компьютерная плантография – это диагностический метод, который заключается в получении цифрового снимка подошвенной поверхности стопы в опоре. Он используется для диагностики, в том числе скрининговой, ортопедических заболеваний стопы, а также позволяет индивидуально подбирать ортопедические изделия, включая ортезы и ортопедическую обувь [1, 2].

При проведении данного исследования особое значение имеет точное определение области стопы, соприкасающейся с опорой, для использования этих данных при проведении оценки функционального состояния стопы. В частности, они необходимы для расчета индекса стопы по методикам В. А. Штригера и И. М. Чижина [3, 4]. Эти данные используются для определения линейного показателя высоты продольного свода, угла Кларка, индекса Шиппо-Смирка и Штели [5, 6].

В настоящее время наблюдается процесс интеграции технологий искусственного интеллекта в анализ медицинских изображений, что позволяет оптимизировать работу клинических специалистов [7, 8]. В числе прочего они позволяют эффективно автоматизировать задачи сегментации медицинских снимков, облегчая выделение ключевых областей для последующего анализа [9]. Ввиду этого актуальной задачей является автоматизация сегментации снимков компьютерной плантографии с применением данных технологий.

Цель исследования – разработать и апробировать модель сегментации опорной зоны стопы на снимках компьютерной плантографии средствами искусственного интеллекта.

### *Материалы и методы*

В исследовании использовался набор данных, включающий плантограммы 500 человек в возрасте старше 18 лет, собранные в период с 2014 по 2024 г. с использованием комплексов Diapod и Ortmann Pro Diagnostics. Для повышения релевантности выборки в анализ были включены как мужчины (26 %), так и женщины (74 %), среди которых 78 % имели деформации стоп (74 % – плоскостопие, 16 % – вальгусная деформация первого пальца), а 22 % составляли пациенты без выявленных патологий. Предобработка снимков проводилась по разработанному алгоритму, согласно которому каждая стопа была выравнена по вертикальной оси и помещена на отдельные снимки одинакового разрешения с контрастным черным фоном. На заключительном этапе производилось отражение снимков правой стопы по горизонтали [10].

Аннотирование исходного датасета включало разметку зоны контакта (ишемии, опоры) совместно в переднем и среднем отделе стопы, а также отдельно в заднем отделе стопы.

Для семантической сегментации снимков компьютерной плантографии была обучена модель YOLOv11-Seg, основанная на архитектуре YOLO и оптимизированная для задач сегментации изображений. Модели данной архитектуры демонстрируют высокую эффективность в семантической сегментации медицинских изображений [11]. Для их разработки, обучения и оценки использован язык программирования Python совместно с библиотекой Ultralytics.

Для оценки качества работы моделей использовались метрики, адаптированные под задачи сегментации масок и детекции объектов:

– mAP50(B) – усредненная средняя точность (mean Average Precision) для ограничивающих рамок (Bounding Box) и сегментационных масок (Mask) при пороге IoU 0,5;

– mAP50-95 – более строгая метрика, усредненная по диапазону порогов IoU от 0,5 до 0,95 с шагом 0,05.

Для расчета mAP50 и mAP50-95 использовалась метрика Intersection over Union (IoU), определяющая степень пересечения предсказанных и истинных рамок или масок. Объект считался правильно предсказанным, если IoU превышал заданный порог. Усреднение по порогам в mAP50-95 позволяет получить более полную оценку качества модели, учитывающую разные пороги точности.

Метрики точности (Precision) и чувствительности (Recall) использовались для оценки соотношения истинно положительных, ложноположительных и ложнонегативных предсказаний. Истинно положительными считались рамки или маски, где IoU с истинным объектом превышал установленный порог. Ложноположительные включали предсказания, которые не соответствовали ни одному истинному объекту либо имели IoU ниже порога. Ложнонегативными считались объекты, которые не были обнаружены моделью.

### *Результаты и обсуждение*

На первом этапе исследования была проведена предобработка и разметка исходных снимков компьютерной плантографии, по результатам которой в исходный набор вошла 1000 унифицированных изображений стоп.

Датасет был разделен на тренировочную и валидационную выборки для проведения кросс-валидации. На рис. 1 представлен пример размеченного изображения.



Рис. 1. Пример предобработанного снимка компьютерной плантографии с нанесенной разметкой:  
1 – область зоны контакта в переднем и среднем отделах стопы;  
2 – в заднем отделе стопы

В качестве основы для обучения была выбрана модель yolo11x-seg, обладающая высокой эффективностью и универсальностью при выполнении задач семантической сегментации изображений. Обучение проводилось на протяжении 100 эпох с использованием пакетов (batch), включающих по 30 изображений и входных данных с разрешением 640×640 пикселей. Такой выбор параметров обеспечил сбалансированное соотношение между вычислительными затратами и качеством предсказаний модели.

Для улучшения обобщающей способности модели в процессе обучения применялся генератор данных, который модифицировал изображения в каждом пакете. В рамках этой обработки в случайном порядке, но в заданных пределах изменялись яркость, контрастность и масштаб изображения. Дополнительно с определенной вероятностью выполнялись операции поворота, смещения, масштабирования и объединения нескольких изображений в соответствии с заданными параметрами. Пример результатов такой обработки представлен на рис. 2.

На рис. 3 представлены графики изменения функции потерь (loss) модели в задачах детекции объектов и семантической сегментации, полученные на тренировочной и валидационной выборках в процессе обучения.

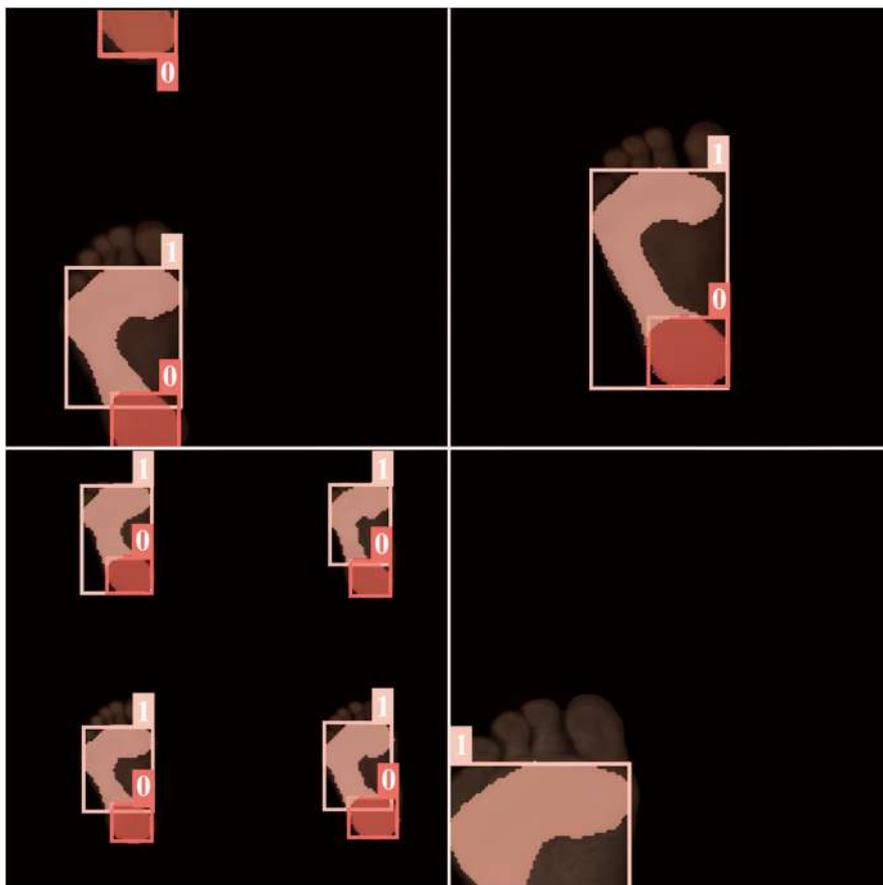


Рис. 2. Пример обработанных снимков генератором в пакете:  
 1 – область зоны контакта в переднем и среднем отделах стопы;  
 2 – в заднем отделе стопы

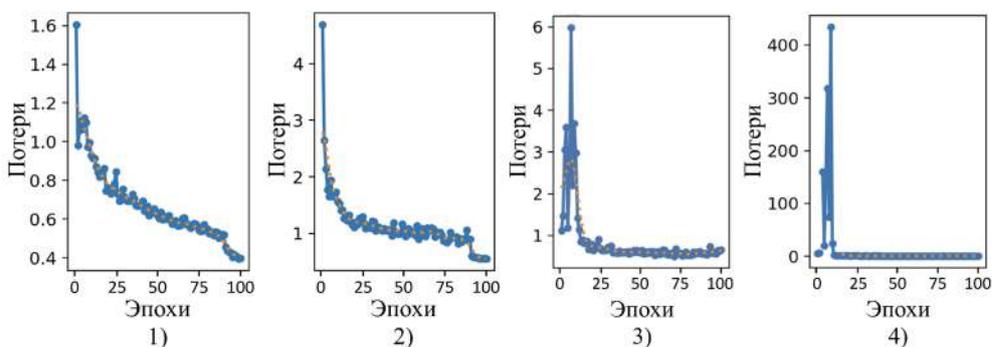


Рис. 3. Динамика изменения значения функции потерь в процессе обучения:  
 1 и 2 – на тренировочной выборке (1 – для задачи детекции объектов;  
 2 – для семантической сегментации); 3 и 4 – на валидационной выборке  
 (3 – для задачи детекции объектов; 4 – для семантической сегментации)

Для задач детекции и семантической сегментации на графиках наблюдалось снижение функции потерь как на тренировочной, так и на валидационной выборках, что свидетельствует о сходимости модели и ее способности

к обобщению данных. На начальных этапах обучения значения функции потерь уменьшались наиболее интенсивно, после чего происходили их стабилизация и выход на плато, что указывает на достижение моделью состояния оптимальной обученности без признаков переобучения. Это подтверждает корректность настройки гиперпараметров и эффективное обучение модели на предоставленных данных.

На рис. 4 представлена динамика изменения метрик mAP50 и mAP50-95 в процессе обучения модели на валидационной выборке для задач детекции и семантической сегментации.

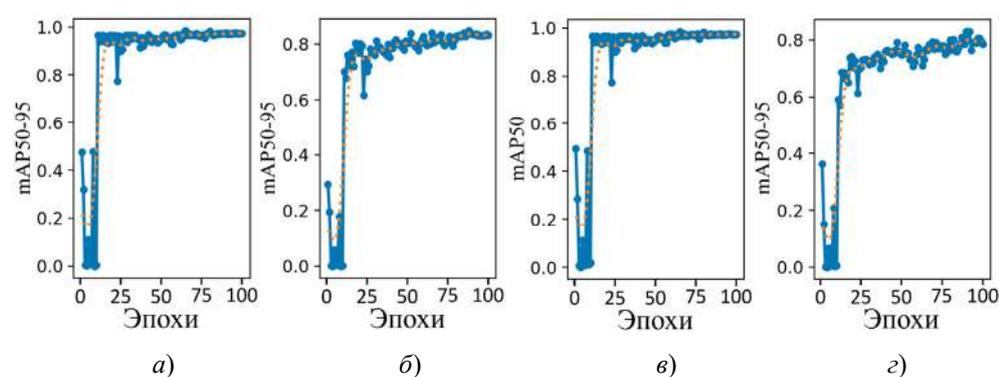


Рис. 4. Динамика изменения метрик в процессе обучения:  
*а* и *б* – для задачи семантической сегментации; *в* и *г* – для задачи детекции объектов

По результатам анализа динамики метрик на графиках выявлено, что во всех случаях наблюдался рост метрик в первые 25 эпох, после чего их рост замедлялся, достигая плато. Значения метрик mAP50 (*а* и *в*) для обеих задач после достижения плато находились в диапазоне 0,9–0,98, тогда как для метрики mAP50-95 (*б* и *г*) показатели стабилизировались в диапазоне 0,7–0,8, что связано с большей строгостью данной метрики.

Итоговые метрики разработанных моделей ИИ на валидационном наборе данных указаны в табл. 1.

Таблица 1

Метрики качества работы модели искусственного интеллекта  
 в задачах семантической сегментации и детекции  
 объектов на снимках компьютерной плантографии

Задача	mAP50	mAP50-95	Точность	Полнота
Детекция объектов	0,9727	0,8293	0,9849	0,9684
Семантическая сегментация	0,9727	0,8482	0,9849	0,9688

Согласно полученным метрикам разработанная модель искусственного интеллекта продемонстрировала высокое качество работы в задачах детекции объектов и семантической сегментации зоны контакта на снимках компьютерной плантографии. Для обеих задач показатели mAP50 составляют 0,9727, а метрика mAP50-95 показывает несколько более низкие значения (0,8293 для детекции и 0,8482 для сегментации), что указывает на небольшое снижение качества при учете всех порогов IoU. При этом показатели точности

и полноты для обеих задач остаются практически одинаковыми и превышают 0,96, подтверждая надежность модели. Пример сегментации снимка проиллюстрирован на рис. 5.



Рис. 5. Пример сегментации зон контакта на плантограмме моделью искусственного интеллекта:

- 1 – зона контакта в переднем и среднем отделах стопы;  
2 – в заднем отделе стопы

### *Заключение*

Разработанная модель семантической сегментации зон контакта на плантограммах, основанная на технологиях искусственного интеллекта, продемонстрировала высокие показатели качества работы ( $mAP_{50} = 0,9727$ ,  $mAP_{50-95} = 0,8482$ , точность – 0,9849, полнота – 0,9688), что подтверждает ее применимость для определения зон контакта с целью расчета диагностических показателей.

Созданная модель искусственного интеллекта обладает высоким потенциалом для научных исследований и клинической практики благодаря достигнутому сокращению длительности разметки снимков высококвалифицированным специалистом.

### *Список литературы*

1. Маненков М. П., Радченко О. Р. Участие специалиста по оказанию медицинской помощи несовершеннолетним обучающимся в формировании здоровьесберегающей среды общеобразовательной организации (на примере скрининга и профилактики

- плоскостопия) // Медико-фармацевтический журнал Пульс. 2024. Т. 26, № 2. С. 25–33. doi: 10.26787/nydha-2686-6838-2024-26-2-25-33 EDN: CMLZPH
2. Веденина А. С., Ткачук И. В., Смирнова Л. М. [и др.]. Скрининг функциональных нарушений стоп с помощью компьютерной плантографии и подометрии // Медицинская техника. 2014. № 2. С. 21–24. EDN: SBZLTP
  3. Патент России № 2253363. Способ диагностики состояния отделов стопы / Гавриков К. В., Плешаков И. А., Калужский С. И. [и др.]. 2005. Бюл. № 16.
  4. ГОСТ Р 52623.1–2008. Технологии выполнения простых медицинских услуг функционального обследования : [утвержден и введен приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 4 декабря 2008 г. № 359-ст]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200068115> (дата обращения: 01.02.2025).
  5. Веденина А. С., Смирнова Л. М. Оценка функционального состояния стопы с использованием плантографии // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2008. № 5 (82). С. 136–139. EDN: KAPBFX
  6. Pita-Fernández S. [et al.]. Validity of footprint analysis to determine flatfoot using clinical diagnosis as the gold standard in a random sample aged 40 years and older // Journal of epidemiology. 2015. Т. 25, № 2. С. 148–154.
  7. Rajpurkar P., Lungren M. P. The current and future state of AI interpretation of medical images // New England Journal of Medicine. 2023. Vol. 388, № 21. P. 1981–1990.
  8. Ali O. [et al.]. A systematic literature review of artificial intelligence in the healthcare sector: Benefits, challenges, methodologies, and functionalities // Journal of Innovation & Knowledge. 2023. Vol. 8, № 1. P. 100333.
  9. Yang R., Yu Y. Artificial convolutional neural network in object detection and semantic segmentation for medical imaging analysis // Frontiers in oncology. 2021. Vol. 11. P. 638182.
  10. Михайлишин В. В., Смирнова Л. М., Черкашин С. О. Цифровая обработка электронных плантограмм с применением технологий искусственного интеллекта как этап автоматизации плантографических исследований // Цифровая обработка сигналов. 2024. № 3. С. 19–24. EDN: IDROCH
  11. Su Y. [et al.]. YOLO-LOGO: A transformer-based YOLO segmentation model for breast mass detection and segmentation in digital mammograms // Computer Methods and Programs in Biomedicine. 2022. Vol. 221. P. 106903.

### *References*

1. Manenkov M.P., Radchenko O.R. The participation of a specialist in providing medical care to underage students in the formation of a health-saving environment of a general education organization (using the example of screening and prevention of flat feet). *Mediko-farmatsevticheskiy zhurnal Pul's = Medical and Pharmaceutical journal Pulse*. 2024;26(2):25–33. (In Russ.). doi: 10.26787/nydha-2686-6838-2024-26-2-25-33 EDN: CMLZPH
2. Vedenina A.S., Tkachuk I.V., Smirnova L.M. et al. Screening of functional disorders of the feet using computer plantography and podometry. *Meditinskaya tekhnika = Medical equipment*. 2014;(2):21–24. (In Russ.). EDN: SBZLTP
3. Patent Russian Federation № 2253363. *Sposob diagnostiki sostoyaniya otdelov stopy = A method for diagnosing the condition of the foot departments*. Gavrikov K.V., Ple-shakov I.A., Kaluzhskiy S.I. et al. 2005. Bull. № 16. (In Russ.)
4. GOST R 52623.1–2008. Technologies for performing simple medical services of functional examination : [approved and introduced by Order No. 359-st of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 4, 2008]. (In Russ.). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200068115> (accessed 01.02.2025).
5. Vedenina A.S., Smirnova L.M. Assessment of the functional state of the foot using plantography. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki =*

- Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Technical sciences.* 2008;(5):136–139. (In Russ.). EDN: KAPBFX
6. Pita-Fernández S. et al. Validity of footprint analysis to determine flatfoot using clinical diagnosis as the gold standard in a random sample aged 40 years and older. *Journal of epidemiology.* 2015;25(2):148–154.
  7. Rajpurkar P., Lungren M.P. The current and future state of AI interpretation of medical images. *New England Journal of Medicine.* 2023;388(21):1981–1990.
  8. Ali O. et al. A systematic literature review of artificial intelligence in the healthcare sector: Benefits, challenges, methodologies, and functionalities. *Journal of Innovation & Knowledge.* 2023;8(1):100333.
  9. Yang R., Yu Y. Artificial convolutional neural network in object detection and semantic segmentation for medical imaging analysis. *Frontiers in oncology.* 2021;11:638182.
  10. Mikhaylishin V.V., Smirnova L.M., Cherkashin S.O. Digital processing of electronic planograms using artificial intelligence technologies as a stage of automation of plantographic research. *Tsifrovaya obrabotka signalov = Digital signal processing.* 2024;(3):19–24. (In Russ.). EDN: IDROCH
  11. Su Y. et al. YOLO-LOGO: A transformer-based YOLO segmentation model for breast mass detection and segmentation in digital mammograms. *Computer Methods and Programs in Biomedicine.* 2022;221:106903.

### **Информация об авторах / Information about the authors**

#### **Виктор Валерьевич Михайлишин**

младший научный сотрудник  
лаборатории инновационных  
и экспертно-реабилитационных  
технологий,  
Федеральный научно-образовательный  
центр медико-социальной экспертизы  
и реабилитации имени Г. А. Альбрехта  
Министерства труда и социальной  
защиты Российской Федерации  
(Россия, г. Санкт-Петербург,  
ул. Бестужевская, 50)  
E-mail: mikhailishin\_v@mail.ru

#### **Viktor V. Mikhailishin**

Junior researcher at the laboratory  
of innovative and expert rehabilitation  
technologies,  
Federal Scientific and Educational Centre  
of Medial and Social Expertise  
and Rehabilitation named after G.A. Albrecht  
of the Ministry of Labour and Social  
Protection of the Russian Federation  
(50 Bestuzhevskaya street,  
St. Petersburg, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /  
The author declares no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received** 27.01.2025

**Поступила после рецензирования/Revised** 20.02.2025

**Принята к публикации/Accepted** 15.03.2025

## МЯГКОЕ УПРАВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

**И. В. Трундаев**

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия  
ivan\_t98@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Рассматривается проблема управления экономической системой, представленной нелинейной моделью, в условиях неопределенности. *Материалы и методы.* Экономическая система описывается нелинейной моделью, включающей случайный фактор и управляющее воздействие со стороны государства. В рамках этой модели построены алгоритмы управления на основе экспертных знаний, направленные на обеспечение сбалансированного и устойчивого развития. *Результаты.* Проведены исследование предложенной динамической модели, описывающей циклы в экономике, и сравнительный анализ алгоритма управления с использованием четкого и нечеткого алгоритмов управления. *Выводы.* Выделены определенные преимущества предложенного нечеткого алгоритма управления нелинейной модели на основе экспертных знаний, что может быть полезно при разработке управления системами большей размерности, где использование классических методов может быть недостаточно обоснованно или целесообразно.

**Ключевые слова:** нелинейная модель, мягкое управление, нечеткая логика, нечеткие множества, регулирование в экономике, экспертные системы

**Для цитирования:** Трундаев И. В. Мягкое управление нелинейной экономической системой // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 1. С. 84–100. doi: 10.21685/2227-8486-2025-1-7

## SOFT CONTROL OF A NON-LINEAR ECONOMIC SYSTEM

**I.V. Trundaev**

Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia  
ivan\_t98@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The paper considers the problem of managing an economic system represented by a nonlinear model under conditions of uncertainty. *Materials and methods.* The economic system is described by a nonlinear model that includes a random factor and a controlling influence from the state. Within the framework of this model, expert knowledge-based management algorithms are built to ensure balanced and sustainable development. *Results.* A study of the proposed dynamic model describing cycles in the economy and a comparative analysis of the control algorithm using precise and fuzzy control algorithms are carried out. *Conclusions.* Certain advantages of the proposed fuzzy control algorithm for a nonlinear model based on expert knowledge are highlighted, which can be useful in developing control systems of higher dimension, where the use of classical methods may not be sufficiently justified or appropriate.

**Keywords:** nonlinear model, soft control, fuzzy logic, fuzzy sets, regulation in economics, expert systems

**For citation:** Trundaev I.V. Soft control of a non-linear economic system. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(1):84–100. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-1-7

### ***Введение***

Известно множество моделей экономических циклов [1]. Существуют работы, где в циклах могут возникать различные стохастические возмущения [2, 3]. Соответственно, в зависимости от целей выбирается некоторое управление для адекватной обработки стохастики [4]. Такие возмущения используются для моделирования систем, которые основаны на экономических предположениях, допускающих наличие неопределенности при взаимодействии элементов системы.

Иногда целесообразнее выбирать нечеткие вычисления, когда в модели подразумевается такая неопределенность, которая делает затруднительным или невозможным использование аппарата теории вероятностей для построения удовлетворительного управления. В частности, стоит отметить следующие методы, которые часто используются в работах, включающие регулирование экономических систем: нечеткие правила и нечеткие регуляторы [5, 6].

В настоящей работе исследована динамическая модель экономической системы с фактором, подверженным неопределенности. Управление системой осуществляется через государственное воздействие. Предложены алгоритмы управления, в том числе с нечеткой логикой, на основе экспертных знаний о нелинейной модели. Проведен сравнительный анализ предложенных алгоритмов. Выявлены определенные преимущества мягкого управления.

Результаты исследования будут полезны для разработки управляющих алгоритмов в других моделях не только схожего класса, но и в моделях большей размерности.

### ***Нелинейная модель экономической системы***

Рассмотрим динамическую модель деловых циклов Гудвина. Предпосылками модели являются следующие предположения:

- 1) устойчивый технический прогресс;
- 2) устойчивый рост численности рабочей силы;
- 3) только два фактора производства – труд и капитал;
- 4) все величины реальные, т.е. уже учитывается влияние инфляции, и «нетто», когда промежуточные доходы и расходы вычитаются из конечного годового объема производства;
- 5) вся заработная плата потребляется, вся прибыль сохраняется и инвестируется;
- 6) соотношение капиталовложений и выпуска постоянно;
- 7) реальная ставка заработной платы повышается по мере приближения к полной занятости [7].

Оставаясь в целом в рамках указанных предположений, модифицируем некоторые из них, делая модель более реалистичной.

Так, мы допускаем, что численность населения может не только расти, но и монотонно убывать или быть вовсе неизменной.

Далее, существуют факторы, которые сложно учесть и смоделировать при расчете роста инвестиций. На скорость изменения могут влиять ожидания экономических субъектов, способы финансирования инвестиций в основной капитал, различные экономико-политические события. С учетом этого в описании инвестиционного процесса мы включим неопределенность.

Наконец, на реальную ставку заработной платы может воздействовать государство. Этот фактор мы также включаем в предлагаемую модель.

В итоге получаем следующую систему уравнений:

$$a = a_0 e^{\alpha t}, \quad (1)$$

$$N = N_0 e^{\beta t}, \quad (2)$$

$$I = \dot{K} = (Y - wL) - \delta K - \frac{\varepsilon K}{\lambda} = (1 - \omega)Y - \delta K - \frac{\varepsilon K}{\lambda}, \quad (3)$$

где  $a$  – показатель производительности труда, количество единиц продукции на одного работника в год;  $a_0$  и  $\alpha$  – положительные постоянные;  $N$  – общая численность рабочей силы;  $N_0$  (положительная) и  $\beta$  – константы;  $I$  – инвестиции за вычетом амортизации;  $K$  – капитал (точки над переменными в этой формуле и далее будут показывать производные по времени);  $Y$  – объем производства за год;  $w$  – реальная заработная плата на единицу рабочей силы;  $L$  – количество занятых работников;  $\delta$  – постоянная норма амортизации;  $\omega$  – доля заработной платы в экономике ( $\omega > 0$ );  $\lambda$  – уровень занятости ( $\lambda > 0$ );  $\varepsilon$  – коэффициент потери, который отображает убыток в инвестициях из-за ожиданий экономических субъектов или способа финансирования.

Будем считать, что  $\varepsilon$  меняет свое значение через промежуток времени  $\Delta t_\varepsilon$  и что данные по  $\varepsilon$  получены из нормального распределения  $N(\mu, \sigma^2)$ . При отсутствии различного рода неопределенностей в инвестициях в данном случае приемлемо, что исследовано в работах [8–10].

Все показатели выше и далее являются функциями от времени  $t$  (кроме постоянных).

Будем считать  $(1 - \omega)$  долей чистой прибыли.

Величина

$$v = \frac{K}{Y} \quad (4)$$

постоянна.

Далее, будем считать, что изменение зарплаты происходит не только под влиянием экономических факторов, но и регулируется государством.

Таким образом, имеем

$$\frac{\dot{w}}{w} = \Phi(\lambda) + \frac{u}{\omega}, \quad (5)$$

где  $\Phi(\lambda)$  – возрастающая функция Филлипа [7];  $u$  – управляющее воздействие со стороны государства на темпы изменения реальной заработной платы на единицу рабочей силы.

Воздействие можно произвольно менять через промежуток времени  $\Delta t$ . Государственная политика и ее влияние на реальные заработные платы и на долю заработной платы в экономике были исследованы в некоторых работах [11, 12].

Уровень занятости  $\lambda$  представим как отношение

$$\lambda = \frac{L}{N}. \quad (6)$$

Используем производственную функцию Леонтьева для описания объема производства с использованием (4):

$$Y = \min \left\{ \frac{K}{v}, aL \right\}. \quad (7)$$

Полагая полное использование капитала, получим равенство между аргументами  $\min$  (7):

$$Y = \frac{K}{v} = aL. \quad (8)$$

Из формулы (3) имеем

$$\frac{wL}{Y} = \omega. \quad (9)$$

Подставляя (8) в (9), получаем долю заработной платы в экономике  $\omega$  как отношение заработной платы на единицу рабочей силы к производительности труда:

$$\omega = \frac{w}{a}. \quad (10)$$

Дифференцируя формулу (8) по времени, можно найти темпы роста выпуска. Далее, комбинируя формулы (3) и (8), получаем

$$\frac{\dot{Y}}{Y} = \frac{\dot{K}}{K} = \frac{(1-\omega)Y - \delta K - \frac{\varepsilon K}{\lambda}}{vY} = \frac{1-\omega}{v} - \delta - \frac{\varepsilon}{\lambda}. \quad (11)$$

Определим темп изменения доли заработной платы, дифференцируя выражение (11):

$$\frac{\dot{\omega}}{\omega} = \frac{\dot{w}}{w} - \frac{\dot{a}}{a}. \quad (12)$$

Дифференцируя (1) и (2), получаем

$$\frac{\dot{a}}{a} = \alpha, \quad \frac{\dot{N}}{N} = \beta. \quad (13)$$

Подставим (5) и (13) в (12):

$$\frac{\dot{\omega}}{\omega} = \Phi(\lambda) - \alpha + \frac{u}{\omega}, \quad (14)$$

где  $\Phi(\lambda)$  – возрастающая функция Филлипса.

Дифференцируя (6), найдем темпы изменения уровня занятости:

$$\frac{\dot{\lambda}}{\lambda} = \frac{\dot{L}}{L} - \frac{\dot{N}}{N}. \quad (15)$$

Дифференцируя  $L$  из (8) по времени, найдем следующее:

$$\frac{\dot{L}}{L} = \frac{\dot{Y}}{Y} - \frac{\dot{a}}{a}.$$

Подставим в (15) формулы (11) и (13), тогда

$$\frac{\dot{L}}{L} = \frac{1-\omega}{v} - \delta - \alpha - \frac{\varepsilon}{\lambda}. \quad (16)$$

Подставим (13) и (16) в (15):

$$\frac{\dot{\lambda}}{\lambda} = \frac{\dot{Y}}{Y} - \frac{\dot{a}}{a} - \frac{\dot{N}}{N} = \frac{1-\omega}{v} - \alpha - \beta - \delta - \frac{\varepsilon}{\lambda}. \quad (17)$$

Из (14) и (17), выражая  $\dot{\omega}$  и  $\dot{\lambda}$ , составляем систему

$$\begin{cases} \dot{\lambda} = \lambda \left( \frac{1-\omega}{v} - \alpha - \beta - \delta \right) - \varepsilon, \\ \dot{\omega} = \omega (\Phi(\lambda) - \alpha) + u. \end{cases} \quad (18)$$

#### Постановка задачи

Как покажем далее, у системы (18) при отсутствии управляющего воздействия  $u$  может быть особая точка «неустойчивый фокус». Тогда время, которое требуется для прохождения по фазовой траектории из некоторой точки  $A$  с положительными координатами в точку  $B$  с хотя бы одной нулевой координатой, конечно. Обозначим данное время как  $T$ .

Пусть  $T_{Alg}$  – минимальное время, которое требуется системе (18) в фазовом пространстве, чтобы пройти из начального положения  $A$  в такую конечную точку  $B$ , что нарушается условие  $\lambda, \omega > 0$ , при таком алгоритме управления, что  $\sum_{t=0}^{T_{Alg}} |u| \neq 0$ .

Необходимо выбрать такое управление воздействием  $u$ , чтобы  $T_{Alg} \rightarrow \max$  при  $T_{Alg} > T$ . Если есть несколько алгоритмов, которые дают одинаковое время существования системы  $T_{Alg}$ , то более эффективным будет считаться тот, у которого  $\sum_{t=0}^{T_{Alg}} |u|$  меньше.

Проблема в работе сводится к нахождению алгоритма, который увеличит «время жизни» системы (18) при заданных ограничениях. Возникает экстремальная задача. При прочих равных будет отдаваться предпочтение тому управлению, которое минимизирует затраты государства на экономическое воздействие.

Будем считать, что правительство соразмерно тратит средства на управляющее воздействие  $u$ . Чем больше  $u$ , тем больше тратит своих ресурсов государство.

Решение данной задачи имеет определенные перспективы. Прогнозирование и предотвращение кризисных явлений является одной из важнейших проблем, стоящих перед любым правительством, а адекватное и соразмерное реагирование на возникающие экономические угрозы является приоритетным при выборе стратегии регулирования экономики.

### *Материалы и методы*

#### *Поведение экономической системы*

Модель (18), как и нелинейная модель Гудвина, представлена схематично. Вообще говоря, доля заработной платы может не влиять явно на занятость, а реальные зарплаты, где мы и задали управляющее воздействие, могут влиять на безработицу непрямо. Достаточно сослаться на работу [13], где во второй главе Кейнс говорит о том, что, возможно, работники в своих требованиях исходят из минимума денежной, а не реальной заработной платы: «...если предложение труда является функцией одной лишь реальной заработной платы, то кривая предложения труда должна изменяться с каждым изменением цен».

Но данная модель имеет определенные перспективы, так как относительно простые уравнения позволяют выявить некоторые общие закономерности. На основании нелинейной модели (18) далее будет продемонстрировано использование нечеткого управления для повышения времени жизни экономической системы при возникновении некоторого случайного фактора. Данное управление может быть использовано при разработке алгоритмов воздействия в более сложных моделях.

В качестве  $\Phi(\lambda)$  будем использовать линейную функцию Филлипса

$$\Phi(\lambda) = -\varphi_0 + \varphi_1\lambda,$$

где  $\varphi_0$  и  $\varphi_1$  – положительные константы.

Поведение системы (18) без  $\varepsilon$  и  $u$  достаточно хорошо изучено (модель «хищник – жертва» Лотки – Вольтерра [14]). Если рассматривать начальную точку с положительными координатами, то ее можно классифицировать как «центр». Фазовый и кинетический портреты могут выглядеть так, как это представлено на рис. 1, 2.

При построении рис. 1, 2 использованы следующие значения параметров:

$$\alpha = 0,04; \beta = -0,13; \nu = 100; \delta = 0,01; \varphi_0 = 0; \varphi_1 = 0,01. \quad (19)$$

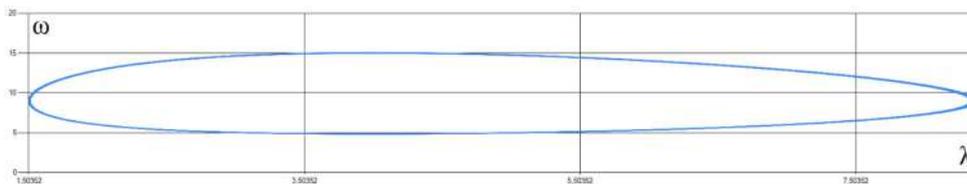


Рис. 1. Фазовый портрет уравнений Лотки – Вольтерра с начальной точкой (5,5)

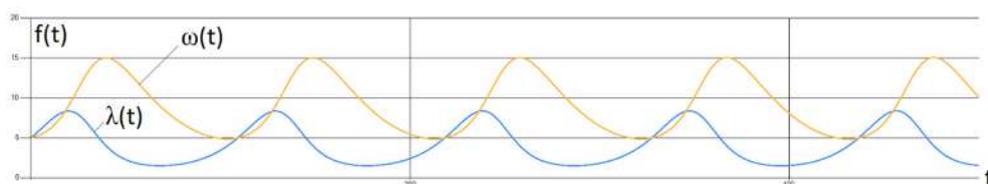


Рис. 2. Кинетический портрет уравнений Лотки – Вольтерра с начальной точкой (5,5)

Эти значения будут использоваться в примерах и в дальнейшем.

При появлении некоторого дополнительного фактора  $\varepsilon$  поведение системы может измениться. Исследуем особые точки системы

$$\begin{cases} \dot{\lambda} = \lambda \left( \frac{1-\omega}{v} - \alpha - \beta - \delta \right) - \varepsilon, \\ \dot{\omega} = \omega (\varphi_1 \lambda - \varphi_0 - \alpha). \end{cases} \quad (20)$$

Для краткости положим

$$\frac{1}{v} - \alpha - \beta - \delta = k$$

и будем предполагать, что  $k > 0$ . Найдем особые точки. Решая систему

$$\begin{cases} \lambda \left( \frac{1-\omega}{v} - \alpha - \beta - \delta \right) - \varepsilon = 0, \\ \omega (\varphi_1 \lambda - \varphi_0 - \alpha) = 0, \end{cases}$$

получим первую и вторую точки

$$(\lambda, \omega)_1 = \left( \frac{\varepsilon}{k}, 0 \right), (\lambda, \omega)_2 = \left( \frac{\alpha + \varphi_0}{\varphi_1}, kv - \frac{\varphi_1 v \varepsilon}{\varphi_0 + \alpha} \right).$$

Используем якобиан системы

$$J(\lambda, \omega) = \begin{pmatrix} k - \frac{\omega}{v} & -\frac{\lambda}{v} \\ \varphi_1 \omega & \varphi_1 \lambda - \varphi_0 - \alpha \end{pmatrix}$$

для дальнейшего исследования.

Первая точка может быть либо неустойчивым узлом, либо седлом. Вид второй точки может быть классифицирован иначе.

Рассмотрим такую систему (20), у которой вторая точка будет неустойчивым фокусом. Покажем, что такая система будет при значении параметров (19) и некотором  $\varepsilon$ . Сейчас положим, что некоторый фактор  $\varepsilon$  не меняется со временем.

В общем случае характеристическое уравнение для второй точки принимает вид

$$\lambda^2 - \frac{\varphi_1 \varepsilon}{\varphi_0 + \alpha} \lambda + k(\varphi_0 + \alpha) - \varphi_1 \varepsilon = 0,$$

где  $\lambda$  – собственное значение.

Подставляя заданные параметры, найдем такие значения  $\varepsilon$ , при которых  $\operatorname{Re} \lambda_i > 0$  и  $\operatorname{Im} \lambda_i \neq 0$ . При значениях параметров (19) значения  $\varepsilon$  находятся в объединении промежутков  $(-0,567; 0)$  и  $(0; 0,407)$ .

На рис. 3, 4 представлены фазовые и кинетические портреты системы (20) при  $\varepsilon = 0,02$ .

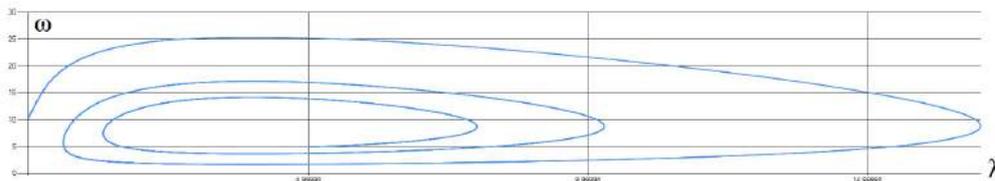


Рис. 3. Фазовый портрет уравнений (3) с начальной точкой (5,5)

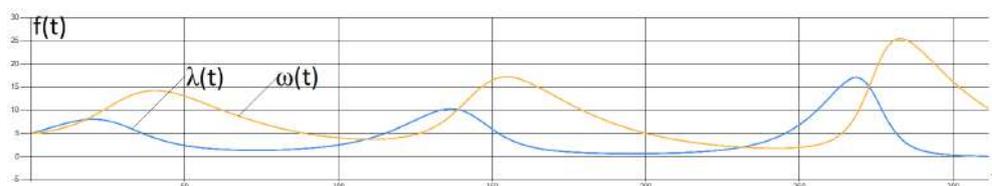


Рис. 4. Кинетический портрет уравнений (3) с начальной точкой (5,5)

Увеличение амплитуды колебаний приводит фазовую траекторию экономической системы в точку, нарушающую ограничения.

#### Управление

Рассмотрим систему (18). Можно оказывать воздействие через  $u$  на скорость изменения  $\omega$ , неявно регулируя  $\lambda$ . Для изменения управляющего воздействия алгоритм получает значения  $\lambda$  и  $\omega$  через  $\Delta t$ .

Реализуем управление в (18) на основе экспертных знаний о системе без фактора  $\varepsilon$  (см. рис. 1, 2).

Необходимо уменьшить амплитуду колебаний  $\lambda$ . Будем считать с некоторым упреждением, что  $\lambda$  должен находиться в интервале (3, 8). Значение  $\omega$  не должно сильно превышать  $\lambda$ . Нельзя понижать  $\omega$  до значения меньше 2.

Алгоритм управления в некоторый момент времени  $t$  (через промежуток  $\Delta t$ ) получает значения  $\lambda_t$  и  $\omega_t$ . На выход алгоритм выдает значение  $u$ .

Выход алгоритма  $u$  распределяется на полуинтервал времени  $D = [t, t + \Delta t)$  так, чтобы  $\int_t^{t+\Delta t-n} u(x) dx = u$  и  $\forall t_1, t_2 \in D (u(t_1) = u(t_2))$ .

#### Алгоритм A0

При отсутствии конкретного алгоритма управления будем считать  $u = 0$  (в дальнейшем такой подход будем называть A0).

#### Алгоритм A1

Сначала сформулируем правила управления отдельно на основе наших предположений.

Правило 1: если  $(\lambda_i < 3)$ , то  $u = -1$ .

Правило 2: если  $(\lambda_i < \omega_i)$ , то  $u = -1$ .

Правило 3: если  $(\lambda_i > 8)$ , то  $u = 1$ .

Объединим правила следующим образом, добавив ограничение  $(\omega_i > 2)$ .

Правило 4:

– если  $((\lambda_i < 3) \vee (\lambda_i < \omega_i)) \wedge (\omega_i > 2)$ , то  $u = -1$ ;

– иначе если  $(\lambda_i > 8)$ , то  $u = 1$ ;

– иначе  $u = 0$ .

#### Алгоритм А2

Фаззифицируем получаемые значения  $\lambda_i$  и  $\omega_i$ . Зададим посылки и заключения в импликациях (правило 1 – правило 2) как нечеткие множества. Применим нечеткие правила к входным значениям. Дефаззифицируем результат в  $u$ .

За фаззификацию примем процедуру преобразования действительного числа в нечеткое число (вычисляем степень принадлежности действительных чисел входным нечетким множествам). Под нечетким числом будем понимать нечеткое множество множества действительных чисел, которое обладает следующими свойствами: выпуклость, нормальность, ядро состоит только из одной точки (ядро – четкое подмножество области определения, содержащее все элементы, принадлежащие некоторому множеству со степенью, равной 1). За дефаззификацию примем преобразование нечеткого множества в действительное число (см. подробнее в работе [15]).

Фаззифицируем  $\lambda_i$  и  $\omega_i$ , где функции принадлежности построены на основе гауссовой функции

$$\mu_A(a) = e^{-\left(\frac{a-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad (21)$$

где  $A$  – нечеткое множество некоторого полученного значения;  $\mu$  – само полученное значение;  $\sigma = 1$ .

Пусть  $X$  – это фаззифицированное значение  $\lambda_i$ , а  $Y$  – фаззифицированное значение  $\omega_i$ .

Для работы с нечеткими правилами будем использовать импликацию Гогена

$$\xrightarrow{G} (A(x), B(y)) = \begin{cases} 1, & A(x) = 0, \\ \min\left(\frac{B(y)}{A(x)}, 1\right), & A(x) \neq 0, \end{cases} \quad (22)$$

где  $A$  и  $B$  – некоторые нечеткие множества.

#### Нечеткое правило 1

Пользуясь правилом 1 «если  $(\lambda_i < 3)$ , то  $u = -1$ », обозначим посылку «меньше 3» нечетким множеством  $L3$ , где функция принадлежности

$$\mu_{L3}(x) = (\text{arcctg}(x - 3)) / \pi.$$

Обозначим заключение в правиле 1 как нечеткое число  $U_{-2}$  с ядром  $-2$  и с функцией принадлежности (21). Под нечетким числом будем понимать нечеткое множество множества действительных чисел, которое обладает следующими свойствами: выпуклость, нормальность, ядро состоит только из одной точки.

Отношение на парах чисел  $x$  и  $u$  зададим через импликацию Гогена (22)

$$\mu_{\frac{L3, U_{-2}}{G}}(x, u) = \frac{\mu_{L3}(x) \mu_{U_{-2}}(u)}{G}.$$

Найдем нечеткое управляющее воздействие  $U$ , которое необходимо совершить, как образ данного отношения:

$$U = \frac{L3, U_{-2}}{G} \rightarrow (X). \quad (23)$$

Примем функцию

$$\mu_{\frac{L3, U_{-2}}{G}}(u) = \max_{x \in \mathbb{R}} \left( \mu_X(x) \mu_{\frac{L3, U_{-2}}{G}}(x, u) \right) = \max_{x \in \mathbb{R}} \left( \mu_X(x) \min \left( \frac{\mu_{U_{-2}}(u)}{\mu_{L3}(x)}, 1 \right) \right)$$

в качестве функции принадлежности множества  $U$ .

Подобную функцию принадлежности будем применять и в остальных нечетких правилах.

### Нечеткое правило 2

Введем в терминах нечетких множеств правило 2 «если  $(\lambda_t < \omega_t)$ , то  $u = -1$ », обозначив посылку « $\lambda$  меньше  $\omega$ » нечетким множеством  $X_Y$  со следующей функцией принадлежности:

$$\mu_{X_Y}(x) = \left( \arctg(x) + \frac{\pi}{2} \right) / \pi.$$

Обозначим заключение в правиле 2 как нечеткое число  $U_{-1}$  с ядром  $-1$ . В качестве аргумента передается разность нечетких чисел  $Y - X$ . Найдем нечеткое управляющее воздействие  $U$

$$U = \frac{X_Y, U_{-1}}{G} \rightarrow (Y - X). \quad (24)$$

Разность  $Y - X$  вычисляется на основе принципа расширения.

### Нечеткое правило 3

Введем условие  $(\omega_t > 2)$ . Зададим правило «если  $(\omega_t > 2)$ , то  $u = -1$ ». Обозначим посылку в таком правиле как  $B2$ , где функция принадлежности имеет вид

$$\mu_{B2}(x) = \left( \arctg(x - 2) + \frac{\pi}{2} \right) / \pi.$$

Обозначим заключение как нечеткое число  $U_{-1}$ . Найдем нечеткое управляющее воздействие  $U$

$$U = \frac{B2, U_{-1}}{G} \rightarrow (Y). \quad (25)$$

*Нечеткое правило 4*

Пользуясь правилом 3 «если  $(\lambda_i > 8)$ , то  $u = 1$ », обозначим посылку «больше 8» нечетким множеством  $B8$ , где функция принадлежности имеет вид

$$\mu_{B8}(x) = \left( \arctg(x - 8) + \frac{\pi}{2} \right) / \pi.$$

Обозначим заключение в правило 3 как нечеткое число  $U_1$  с ядром 1 с помощью (21). Найдем нечеткое управляющее воздействие  $U$

$$U = \frac{B8, U_1}{G} \rightarrow (X). \tag{26}$$

Объединим правила (23)–(26) следующим образом:

$$U = \left( \frac{L3, U_2}{G} \rightarrow (X) \vee \frac{XY, U_{-1}}{G} \rightarrow (Y - X) \vee \frac{B2, U_{-1}}{G} \rightarrow (Y) \right) \wedge \frac{B8, U_1}{G} \rightarrow (X). \tag{27}$$

За дизъюнкцию взята функция «максимум», за конъюнкцию – произведение.

Далее проводим дефаззификацию  $U$  методом центра тяжести, результат будет являться выходным значением алгоритма.

**Результаты**

Сравним время  $T$  «жизни» системы (18) без управления с управлением  $T_{A1}$  и с управлением  $T_{A2}$ . Для этого запустим несколько тестов, где сравним при прочих равных параметрах эффективность алгоритмов.

Будем считать алгоритм более эффективным, если время существования  $T_{Alg}$  системы с этим алгоритмом больше времени существования системы при ином алгоритме или при его отсутствии. В случае одинакового времени будем считать лучшим тот алгоритм, у которого  $\sum_{t=0}^{T_{Alg}} |u|$  меньше.

Полученные результаты можно проиллюстрировать численным экспериментом (основные расчеты были проведены на языке C# с использованием библиотеки [16]). Примем следующие значения параметров. Начальная точка (5,5). Максимальное время существования системы ограничим значением 500 и  $\Delta t_\varepsilon = 1$ . Будем считать, что  $\varepsilon$  не меняется внутри каждого теста, как и  $\Delta t$ . В первом тесте  $\varepsilon = 0,1$  и  $\Delta t = 1$ , далее в каждом тесте  $\varepsilon$  и  $\Delta t$  будем перебирать их значения с изменением 0,1. Отметим результаты в табл. 1, где значение 1 в ячейке показывает успешность алгоритма относительно остальных, а 0, соответственно, неэффективность соответствующего управления.

Таблица 1

Результаты сравнения алгоритмов при неизменном  $\varepsilon$  внутри теста

	$\Delta t=1$			$\Delta t=2$			$\Delta t=3$			$\Delta t=4$			$\Delta t=5$			$\Delta t=6$		
	A1	A2	A0															
$\varepsilon = 0$	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
$\varepsilon = 0,1$	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
$\varepsilon = 0,2$	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
$\varepsilon = 0,3$	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0
$\varepsilon = 0,4$	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0
$\varepsilon = 0,5$	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1
$\varepsilon = 0,6$	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
$\varepsilon = 0,7$	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
$\varepsilon = 0,8$	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
$\varepsilon = 0,9$	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
$\varepsilon = 1$	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
$\Sigma$	8	2	1	7	3	1	3	7	1	3	7	1	2	8	1	0	10	1

Обратим внимание, что при малых  $\Delta t$  эффективнее алгоритм A1. Однако при повышении  $\Delta t$  эффективность нечеткого алгоритма возрастает в сравнении с остальными. Когда информация приходит редко и мы не обладаем более полными знаниями о системе, нечеткая логика может оказаться предпочтительнее.

Проведем дополнительное тестирование. Используем все предыдущие параметры, но рассмотрим поведение алгоритмов, когда фактор  $\epsilon$  получен из нормального распределения  $N(\mu, \sigma^2)$ . Через  $\Delta t$   $\epsilon$  может менять свое значение.

Будем изменять  $\mu$  от 0 до 1 с шагом 0,1 и  $\sigma$  от 0 до 1 с таким же шагом, а также  $\Delta t$  от 1 до 3 с шагом 1. Запускать системы будем по несколько раз внутри каждого теста. Отметим результаты в таблицах, где значение в ячейке показывает количество успешных попыток алгоритма относительно остальных.

Рассмотрим поведение алгоритмов при  $\sigma = 0,1$ .

По табл. 2 видно, что по эффективности алгоритмы A1 и A2 почти схожи (при некотором преобладании A2). Сравним результаты, когда изменяется стандартное отклонение.

Таблица 2

Результаты сравнения алгоритмов при неизменном  $\sigma$

$\sigma = 0,1$	$\Delta t=1$			$\Delta t=2$			$\Delta t=3$			$\Delta t=4$			$\Delta t=5$			$\Delta t=10$		
	A1	A2	A0	A1	A2	A0												
$\mu=0$	0	2	8	0	2	8	0	2	8	0	2	8	0	2	8	0	0	10
$\mu=0,1$	0	10	0	0	10	0	0	10	0	0	10	0	2	8	0	0	8	2
$\mu=0,2$	5	5	0	0	10	0	0	10	0	5	5	0	4	6	0	0	10	0
$\mu=0,3$	1	9	0	4	6	0	3	7	0	7	3	0	8	2	0	0	9	1
$\mu=0,4$	7	3	0	7	3	0	4	5	1	9	1	0	8	2	0	0	10	0
$\mu=0,5$	7	3	0	6	4	0	2	8	0	5	5	0	0	8	2	1	7	2
$\mu=0,6$	5	5	0	4	6	0	0	8	2	2	6	2	1	6	3	1	7	2
$\mu=0,7$	4	5	1	3	5	2	2	6	2	2	6	2	2	6	2	2	5	3
$\mu=0,8$	5	2	3	4	2	4	4	2	4	4	2	4	3	2	5	3	2	5
$\mu=0,9$	6	1	3	5	1	4	5	1	4	4	1	5	3	1	6	3	1	6
$\mu=1$	4	3	3	4	3	3	4	3	3	4	3	3	4	3	3	4	3	3
$\Sigma$	44	48	18	37	52	21	24	62	24	42	44	24	35	46	29	14	62	34

По табл. 3 (когда обновлять управляющее воздействие  $u$  можно часто  $\Delta t = 3$ ) эффективность алгоритма A2 падает уже при небольшом стандартном отклонении, в то время как алгоритм A1 начинает успешнее работать.

По табл. 4 (при редком обновлении  $u$ ) не повторяется тенденция увеличения эффективности A2 при неизменном  $\epsilon$  (см. табл. 1), но все равно видно преимущество алгоритма A2 перед A1 и A0 на основе нечеткой логики даже при достаточно большом стандартном отклонении (в отличие от результатов табл. 3). Отмечается снижение эффективности при увеличении стандартного отклонения, что является естественным для многих алгоритмов.

Таблица 3

Результаты сравнения алгоритмов при неизменном  $\Delta t = 3$

$\Delta t=3$	$\sigma=0,1$			$\sigma=0,2$			$\sigma=0,3$			$\sigma=0,4$			$\sigma=0,5$			$\sigma=0,6$		
	A1	A2	A0															
$\mu=0$	0	2	8	0	6	4	0	9	1	3	7	0	5	5	0	6	4	0
$\mu=0,1$	0	10	0	3	7	0	6	4	0	7	3	0	10	0	0	8	2	0
$\mu=0,2$	0	10	0	10	0	0	8	2	0	6	4	0	8	2	0	5	3	2
$\mu=0,3$	3	7	0	5	5	0	4	5	1	4	5	1	5	3	2	7	2	1
$\mu=0,4$	4	5	1	4	5	1	6	2	2	7	2	1	7	1	2	5	2	3
$\mu=0,5$	2	8	0	4	5	1	4	5	1	4	5	1	5	4	1	6	2	2
$\mu=0,6$	0	8	2	2	5	3	1	6	3	3	3	4	3	3	4	4	3	3
$\mu=0,7$	2	6	2	4	3	3	3	4	3	4	3	3	4	3	3	4	2	4
$\mu=0,8$	4	2	4	4	2	4	4	2	4	5	2	3	3	4	3	3	4	3
$\mu=0,9$	5	1	4	4	1	5	3	4	3	3	4	3	3	3	4	4	3	3
$\mu=1$	4	3	3	3	4	3	3	3	4	3	3	4	3	3	4	3	4	3
$\Sigma$	24	62	24	43	43	24	42	46	22	49	41	20	56	31	23	55	31	24

Результаты сравнения алгоритмов при неизменном  $\Delta t = 10$

$\Delta t=10$	$\sigma=0,1$			$\sigma=0,2$			$\sigma=0,3$			$\sigma=0,4$			$\sigma=0,5$			$\sigma=0,6$		
	A1	A2	A0															
$\mu=0$	0	0	10	1	3	6	3	1	6	3	2	5	4	3	3	3	3	4
$\mu=0,1$	0	8	2	2	6	2	1	4	5	1	6	3	1	5	4	1	3	6
$\mu=0,2$	0	10	0	0	9	1	0	7	3	2	4	4	0	5	5	0	3	7
$\mu=0,3$	0	9	1	0	7	3	0	6	4	0	5	5	0	6	4	2	4	4
$\mu=0,4$	0	10	0	0	9	1	0	7	3	1	5	4	2	4	4	2	4	4
$\mu=0,5$	1	7	2	4	4	2	3	4	3	3	4	3	3	5	2	3	4	3
$\mu=0,6$	1	7	2	2	6	2	2	6	2	1	6	3	2	5	3	3	5	2
$\mu=0,7$	2	5	3	3	4	3	3	4	3	3	3	4	4	3	3	4	3	3
$\mu=0,8$	3	2	5	3	2	5	4	2	4	4	2	4	3	4	3	2	5	3
$\mu=0,9$	3	1	6	4	1	5	3	4	3	3	4	3	3	3	4	4	3	3
$\mu=1$	4	3	3	3	4	3	3	3	4	3	3	4	3	3	4	3	4	3
$\Sigma$	14	62	34	22	55	33	22	48	40	24	44	42	25	46	39	27	41	42

**Обсуждение**

Для понимания результатов продемонстрируем следующие графики (рис. 5–7) поведения алгоритма A1 при  $\Delta t = 2$ ,  $\varepsilon = 0,1$  и неизменном  $\varepsilon$  (т.е. без распределения  $N(\mu, \sigma^2)$ ). Остальные параметры сохранены.

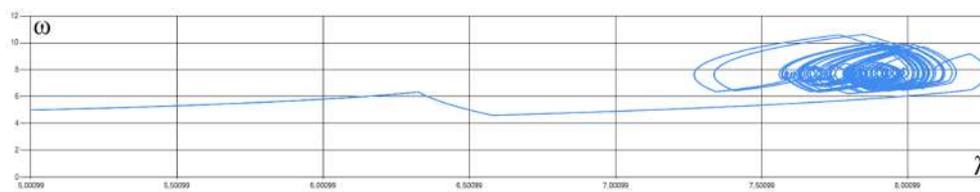


Рис. 5. Фазовый портрет уравнений (18) при неизменном значении  $\varepsilon$  и с алгоритмом A1

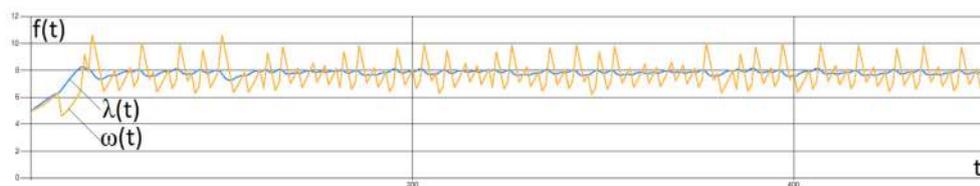


Рис. 6. Кинетический портрет уравнений (18) при неизменном значении  $\varepsilon$  и с алгоритмом A1

По фазовой траектории видно, что изменился характер циклов в экономике в системе (18) относительно системы (20). На рис. 6 наблюдаются резкие изменения  $\omega$  относительно  $\lambda$ . Такое поведение объясняется характером управления (рис. 7) – при малом изменении  $\lambda$  управляющее воздействие  $u$  серьезно меняет свое значение из-за строгих логических проверок в условии и дискретных значениях управляющего воздействия  $u$  ( $-1, 0$  или  $1$ ).

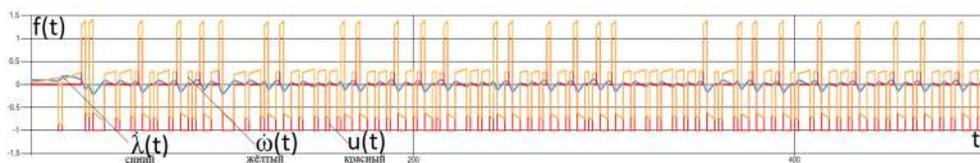


Рис. 7. Графики управляющего воздействия и производных  $\lambda$  и  $\omega$  уравнений (18) при неизменном значении  $\varepsilon$  и с алгоритмом A1

Рассмотрим теперь при тех же параметрах поведение алгоритма A2 (рис. 8–10).

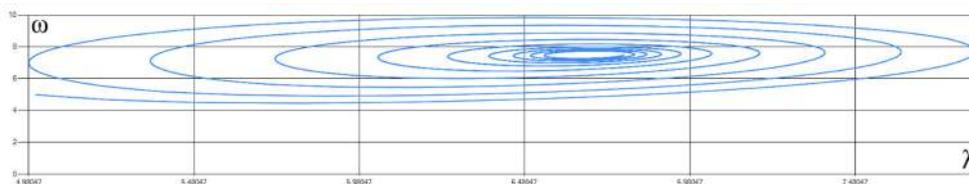


Рис. 8. Фазовый портрет уравнений (18) при неизменном значении  $\varepsilon$  и с алгоритмом A2

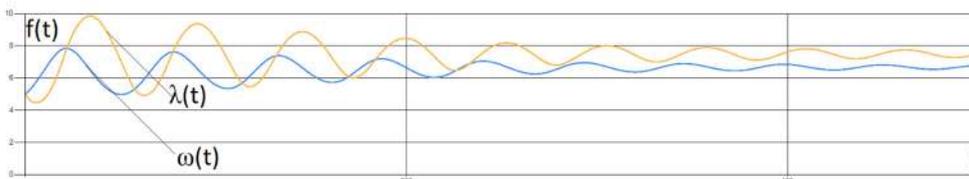


Рис. 9. Кинетический портрет уравнений (18) при неизменном значении  $\varepsilon$  и с алгоритмом A2

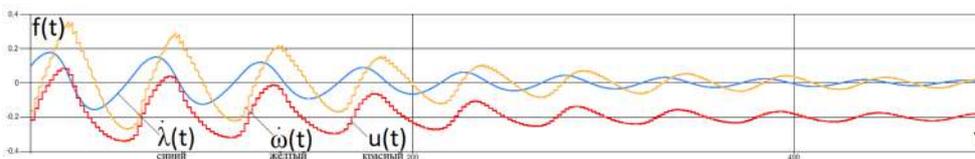


Рис. 10. Графики управляющего воздействия и производных  $\lambda$  и  $\omega$  уравнений (18) при неизменном значении  $\varepsilon$  и с алгоритмом A2

По фазовой траектории видно, что появился устойчивый фокус. Благодаря управлению A2 колебания  $\lambda$  и  $\omega$  превращаются в затухающие, что делает невозможным перемещение фазовой траектории в точку остановки (где  $\lambda \leq 0$  или  $\omega \leq 0$ ). Это происходит из-за того, что алгоритм на основе мягкого управления изменяет  $u$  более плавно. Управляющее воздействие благодаря нечеткой форме записи правил позволяет адекватно реагировать на возникающий фактор  $\varepsilon$ .

### Заключение

Способность адекватно реагировать на случайные изменения некоторых факторов является важной частью работы с экономическими системами в условиях неопределенности.

В данной работе показана нелинейная модель экономической системы, включающей в себя случайный фактор и управляющее воздействие со стороны государства. Для данной системы предложены алгоритмы управления на основе экспертных знаний о модели Гудвина. Был проведен сравнительный анализ алгоритмов управления на классической логике и на нечеткой.

Предложенные в данной работе алгоритмы управления экономической системой показывают определенные перспективы в управлении более сложными системами. Результаты численных экспериментов продемонстрировали

преимущества нечетких правил на основе экспертных знаний. Данные выводы сделаны на основе сравнения эффективности алгоритмов по времени удержания  $T_{Alg}$  фазовой траектории в допустимой области и по суммарным затратам со стороны государства  $u$ . Сравнительный анализ алгоритмов проводился при следующих различных параметрах: период корректировки управляющего воздействия, значение коэффициента потери  $\varepsilon$  как постоянная величина и как переменная (тогда дополнительно рассматривались следующие параметры: стандартное отклонение и математическое ожидание распределения данных по  $\varepsilon$ , промежуток времени  $\Delta t_\varepsilon$  изменения  $\varepsilon$ ).

Был разработан алгоритм, позволяющий давать соразмерный ответ на возникающие возмущения. Мягкие методы позволили не только увеличить «время жизни» экономической системы (18) при параметрах (19), но и уменьшить использование государственных средств.

Полученные результаты могут быть также интересны, когда необходимо осуществлять государственное регулирование экономической системой при ограниченных резервах.

### Список литературы

1. Cafferata A., Dávila-Fernández M. J., Sordi S. (Ir) rational explorers in the financial jungle: Modelling Minsky with heterogeneous agents // *Journal of Evolutionary Economics*. 2021. Vol. 31, № 4. P. 1157–1188.
2. Berger T., Hienzsch S. Which Global Cycle? A Stochastic Factor Selection Approach for Global Macro-Financial Cycles // *Studies in Nonlinear Dynamics & Econometrics*. 2024. doi: 10.1515/snde-2023-0093
3. Kang D. N., Marmer V. Modeling long cycles // *Journal of Econometrics*. 2024. Vol. 242, № 1. P. 105751.
4. Neck R., Blueschke D., Blueschke-Nikolaeva V. Optimal fiscal policy in times of uncertainty: a stochastic control approach // *Empirica*. 2024. P. 1–22.
5. Yakovenko I. Fuzzy stochastic automation model for decision support in the process inter-budgetary regulation // *Mathematics*. 2020. Vol. 9, № 1. P. 67.
6. Xie X., Chen Y. H. Robust control design for an uncertain macroeconomic dynamical system with unknown characteristics and inequality control constraint // *Complexity*. 2021. Vol. 2021, № 1. P. 8826480.
7. Goodwin R. M. A Growth Cycle: Socialism, Capitalism and Economic Growth // *Essays in economic dynamics*. London : Palgrave Macmillan UK, 1967. P. 165–170.
8. Jin Z., Liu G., Yang H. Optimal consumption and investment strategies with liquidity risk and lifetime uncertainty for Markov regime-switching jump diffusion models // *European Journal of Operational Research*. 2020. Vol. 280, № 3. P. 1130–1143.
9. Avramov D. [et al.]. Sustainable investing with ESG rating uncertainty // *Journal of financial economics*. 2022. Vol. 145, № 2. P. 642–664.
10. Alfaro I., Bloom N., Lin X. The finance uncertainty multiplier // *Journal of Political Economy*. 2024. Vol. 132, № 2. P. 577–615.
11. Drautzburg T., Fernández-Villaverde J., Guerron-Quintana P. Politics and Income Distribution // *Economic Insights*. 2022. Vol. 7, № 2. P. 11–18.
12. Paraje G. [et al.]. The effects of the Chilean food policy package on aggregate employment and real wages // *Food Policy*. 2021. Vol. 100. P. 102016.
13. Keynes J. M. The general theory of employment // *The quarterly journal of economics*. 1937. Vol. 51, № 2. P. 209–223.
14. Арнольд В. И. «Жесткие» и «мягкие» математические модели. М. : МЦНМО, 2004. 32 с.

15. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 798 с.
16. Материалы для лекций по курсу AIML. URL: <https://github.com/air-labs/AIML> (дата обращения: 01.10.2024).

### References

1. Cafferata A., Dávila-Fernández M.J., Sordi S. (Ir) rational explorers in the financial jungle: Modelling Minsky with heterogeneous agents. *Journal of Evolutionary Economics*. 2021;31(4):1157–1188.
2. Berger T., Hienzsch S. Which Global Cycle? A Stochastic Factor Selection Approach for Global Macro-Financial Cycles. *Studies in Nonlinear Dynamics & Econometrics*. 2024. doi: 10.1515/snede-2023-0093
3. Kang D.N., Marmer V. Modeling long cycles. *Journal of Econometrics*. 2024; 242(1):105751.
4. Neck R., Blueschke D., Blueschke-Nikolaeva V. Optimal fiscal policy in times of uncertainty: a stochastic control approach. *Empirica*. 2024:1–22.
5. Yakovenko I. Fuzzy stochastic automation model for decision support in the process inter-budgetary regulation. *Mathematics*. 2020;9(1):67.
6. Xie X., Chen Y.H. Robust control design for an uncertain macroeconomic dynamical system with unknown characteristics and inequality control constraint. *Complexity*. 2021;2021(1):8826480.
7. Goodwin R.M. A Growth Cycle: Socialism, Capitalism and Economic Growth. *Essays in economic dynamics*. London: Palgrave Macmillan UK, 1967:165–170.
8. Jin Z., Liu G., Yang H. Optimal consumption and investment strategies with liquidity risk and lifetime uncertainty for Markov regime-switching jump diffusion models. *European Journal of Operational Research*. 2020;280(3):1130–1143.
9. Avramov D. et al. Sustainable investing with ESG rating uncertainty. *Journal of financial economics*. 2022;145(2):642–664.
10. Alfaro I., Bloom N., Lin X. The finance uncertainty multiplier. *Journal of Political Economy*. 2024;132(2):577–615.
11. Drautzburg T., Fernández-Villaverde J., Guerron-Quintana P. Politics and Income Distribution. *Economic Insights*. 2022;7(2):11–18.
12. Paraje G. et al. The effects of the Chilean food policy package on aggregate employment and real wages. *Food Policy*. 2021;100:102016.
13. Keynes J.M. The general theory of employment. *The quarterly journal of economics*. 1937;51(2):209–223.
14. Arnold V.I. «Zhestkie» i «myagkie» matematicheskie modeli = "Hard" and "soft" mathematical models. Moscow: MTsNMO, 2004:32. (In Russ.)
15. Pegat A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie = Fuzzy modeling and control*. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2013:798. (In Russ.)
16. *Materialy dlya leksiy po kursu AIML = Materials for lectures on the AIML course*. (In Russ.). Available at: <https://github.com/air-labs/AIML> (accessed 01.10.2024).

### Информация об авторах / Information about the authors

**Иван Вячеславович Трундаев**  
аспирант кафедры математики  
и анализа данных,  
Финансовый университет  
при Правительстве  
Российской Федерации  
(Россия, г. Москва,  
Ленинградский пр-т, 49/2)  
E-mail: [ivan\\_t98@mail.ru](mailto:ivan_t98@mail.ru)

**Ivan V. Trundaev**  
Postgraduate student  
of the sub-department  
of mathematics and data analysis,  
Financial University  
under the Government  
of the Russian Federation  
(49/2 Leningradsky avenue,  
Moscow, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /  
The author declares no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 01.10.2024**

**Поступила после рецензирования/Revised 28.02.2025**

**Принята к публикации/Accepted 15.03.2025**

## МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ КОМАНДЫ ПРОЕКТА НА БАЗЕ МЕТОДОВ ДИСКРЕТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

С. М. Бекетов<sup>1</sup>, М. В. Дергачев<sup>2</sup>, С. Г. Редько<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт Петербург, Россия

<sup>1</sup>salbek.beketov@spbpu.com, <sup>2</sup>dergachev.mv@edu.spbstu.ru, <sup>3</sup>redko\_sg@spbstu.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Исследование посвящено разработке модели формирования оптимального состава команд для проектов в целом и для инновационных в частности, которые являются основой экономического прогресса в современном информационном обществе. Проблема заключается в необходимости повышения эффективности и результативности проектов за счет оптимизации состава команд. Целью исследования является создание математической модели формирования команд проектов, учитывающей такие факторы, как квалификация, производительность и инновационный потенциал участников. *Материалы и методы.* Методологическую и инструментальную основу исследования составили метод дискретной оптимизации, основы кибернетики, а также математического моделирования. В работе рассматриваются существующие подходы к формированию команд, в основном базирующиеся на опыте и наблюдениях, на личностных качествах или взаимоотношениях между членами команды. *Результаты.* В результате была построена модель формирования команды проекта на основе алгоритма, позволяющего минимизировать затраты на персонал при сохранении высокой эффективности. Практическое применение данной модели демонстрируется на примере IT-проектов, что показывает возможности оптимизации человеческих ресурсов в данной отрасли. Модель обеспечивает оптимальный состав команды на проект с учетом минимизации расходов на трудовые ресурсы при выполнении требуемой производительности на проект в целом. Данный подход способствует экономическому прогрессу проектно-ориентированных предприятий. *Выводы.* Исследование направлено на улучшение методов и моделей управления проектами и может быть полезно руководителям проектов, специалистам по кадрам и руководству компаний, стремящихся внедрить методы оптимизации состава команд при реализации проектов. Внедрение разработанной модели может способствовать повышению прогнозируемости проектов, что особенно актуально в условиях растущей сложности и масштабов современных проектов.

**Ключевые слова:** проект, формирование команды, команда проекта, оптимизация, дискретная оптимизация, оптимальный состав

**Финансирование:** исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание № 075-03-2024-004 от 17.01.2024).

**Для цитирования:** Бекетов С. М., Дергачев М. В., Редько С. Г. Модель формирования команды проекта на базе методов дискретной оптимизации // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 1. С. 101–113. doi: 10.21685/2227-8486-2025-1-8

## MODEL FOR THE FORMATION OF A PROJECT TEAM COMPOSITION BASED ON DISCRETE OPTIMIZATION METHODS

S.M. Beketov<sup>1</sup>, M.V. Dergachev<sup>2</sup>, S.G. Redko<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia  
<sup>1</sup>salbek.beketov@spbpbu.com, <sup>2</sup>dergachev.mv@edu.spbstu.ru, <sup>3</sup>redko\_sg@spbstu.ru

**Abstract.** *Background.* The research is devoted to the development of a model for the formation of optimal team composition for projects in general, and for innovative ones in particular, which are the basis of economic progress in the modern information society. The problem lies in the need to improve the efficiency and effectiveness of projects by optimizing the composition of teams. The aim of the study is to create a mathematical model for the formation of project teams, taking into account factors such as qualifications, productivity and innovative potential of participants. *Materials and methods.* The methodological and instrumental basis of the research was made up of general scientific and special optimization methods, the basics of cybernetics, and mathematical modeling. *Results.* The paper examines existing approaches to team building and develops an algorithm that minimizes personnel costs while maintaining high efficiency. The practical application of the model is demonstrated by the example of IT projects, which shows the possibilities of optimizing human resources and increasing productivity. The model ensures the optimal composition of the project team, which in turn contributes to the economic progress of project-oriented enterprises. *Conclusions.* The research is aimed at improving project management methods and models and may be useful for project managers, HR specialists and company management seeking to implement methods to optimize the composition of teams in the implementation of projects. The implementation of the developed model can help to increase the predictability and manageability of projects, which is especially important in the context of the growing complexity and scale of modern projects.

**Keywords:** project, team formation, project team, optimization, discrete optimization, optimal composition

**Financing:** the study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State assignment № 075-03-2024-004 dated January 17, 2024).

**For citation:** Beketov S.M., Dergachev M.V., Redko S.G. Model for the formation of a project team composition based on discrete optimization methods. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(1):101–113. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-1-8

### Введение

В современном информационном обществе реализуемые проекты (IT, научно-исследовательские, инновационные и т.д.) являются основным двигателем прогресса и экономического развития. Такие проекты влияют на многие сферы жизни, включая научную и бизнес-сферу [1]. Это объясняется тем, что проекты зачастую способствуют созданию новых продуктов, услуг, технологий и методов управления, что, в свою очередь, стимулирует экономический рост, улучшает качество жизни и повышает конкурентоспособность на рынке.

Формирование эффективных команд для реализации проектов приобретает стратегическое значение в связи с растущей сложностью современных задач и увеличением уровня конкуренции. Эффективность команды напрямую влияет на успех проекта, поскольку качество выполнения задач, соблюдение

сроков и управление ресурсами в значительной степени зависят от качественного подбора участников команды и их компетентности [2, 3].

Вопрос оптимизации процесса формирования команды становится важной составляющей для успешной реализации проектов. Необходимо достигать максимальных результатов при ограниченных ресурсах, таких как время, бюджет и человеческие ресурсы. Путем улучшения подходов к набору и формированию команд предприятие может привлечь наиболее квалифицированных сотрудников, что, в свою очередь, приближает его к достижению стратегических целей [4]. Таким образом, эффективное формирование команды представляет собой актуальную задачу, которая требует внимания и научного подхода для разработки оптимальных стратегий и методов.

Существующие подходы к формированию команд для инновационных проектов часто базируются на опыте и наблюдениях, что может привести к неполным или неоптимальным результатам [5, 6]. В связи с этим возникает потребность в создании инструмента, способного оптимизировать процесс формирования команды, учитывая разнообразные факторы, влияющие на ее успех.

Существует множество подходов к моделированию формирования команды инновационного проекта. Например, представленная в статье [7] модель описывает процесс решения проблем группой агентов, у каждого из которых есть свои инструменты и навыки их применения, с учетом вероятностей успеха этих инструментов. Модель анализирует, как различные типы агентов могут эффективно использовать свои инструменты для решения задач, учитывая, что вероятность успеха инструмента не зависит от агента, но их навыки применения инструментов различаются.

В статье [8] представлен эволюционный алгоритм формирования команды. Модель основывается исключительно на моделировании взаимоотношений и поведения членов команды при выполнении своих обязанностей и достижении желаемой цели команды. Она не учитывает различные компетенции сотрудников, их инновационный потенциал и ограничения по сроку и стоимости проекта, что ограничивает точность модели.

Модель, представленная в статье [9], учитывает личностные качества участников команды, такие как честность, эмоциональность и др., и профессиональные – знания, умения и навыки. Однако данная статья фокусируется на командах типа agile и в ней не представлена конкретная математическая модель.

В статье [10] представлена модель формирования команды, основанная на мультиагентном обучении с подкреплением (СОРА). Модель СОРА формирует команду, оценивая характеристики агентов, такие как уровень навыков и физическое состояние, через симуляции и стратегическое обучение, где тренер координирует действия агентов и минимизирует коммуникацию. Этот процесс позволяет создавать оптимальные составы команд для выполнения различных задач, обеспечивая способность модели адаптироваться к новым условиям и агентам. Несмотря на это, модель не учитывает возможности наличия различных профессиональных ролей агентов, в связи с чем ее применение ограничено. Кроме того, полученные наборы команд подбирались при условии выполнения одной задачи всеми участниками команды.

Таким образом, новизна исследования заключается в разработке и обосновании подхода к постановке задачи оптимизации, направленной на формирование

проектных команд. В отличие от традиционных подходов, предлагаемая задача формализована с учетом комплекса ограничений и целей. Предложенная модель также одновременно учитывает множество параметров, таких как производительность, квалификация, должность и инновационный показатель сотрудников. Данный подход расширяет возможности решения задачи оптимизации формирования состава проектных команд и отражает реалии современных проектных процессов.

Помимо высокой степени неопределенности проектов при формировании команды существует множество переменных и ограничений, которые требуют оптимального распределения ресурсов [11]. В этом контексте использование методов дискретной оптимизации становится актуальным, поскольку они позволяют эффективно моделировать сложные системы с дискретными переменными и находить оптимальные решения в условиях ограниченных ресурсов [12, 13].

Разработка модели формирования команды инновационного проекта на базе методов дискретной оптимизации не только позволит решить конкретную практическую задачу, но и внести значительный вклад в развитие научной дисциплины и улучшение качества научных исследований в этой области.

### *Материалы и методы*

Дискретная оптимизация представляет собой фундаментальную область исследования, занимающую важное место в решении задач оптимизации, где переменные принимают дискретные значения, а решения сосредоточены на дискретных множествах [14]. Область находит широкое применение в различных сферах, таких как транспортное планирование, производственный менеджмент, сетевое проектирование и др.

Базовые принципы дискретной оптимизации вытекают из основ кибернетики, теории исследования операций и применения математических моделей в управлении [15]. Применение методов дискретной оптимизации в управлении командами проектов позволяет эффективно выбирать наилучшие решения на основе ограничений и требований проекта, учитывая дискретность переменных и применяя математические модели и методы анализа данных [16].

Процесс дискретной оптимизации включает разработку и применение методов математического моделирования, анализа данных и оптимизации для решения задач управления. Методы дискретной оптимизации могут быть применены для оптимизации процессов подбора и распределения персонала, а также для прогнозирования будущих потребностей в ресурсах команды [17].

В качестве примера задачи дискретной оптимизации можно рассмотреть классическую задачу о коммивояжере. В этой задаче требуется найти самый выгодный маршрут для коммивояжера, проходящий через каждый город ровно один раз с минимальной стоимостью. Подход иллюстрирует способность дискретной оптимизации решать задачи маршрутизации и распределения ресурсов в условиях ограничений и дискретности переменных.

Метод дискретной оптимизации является хорошим инструментом для решения задач управления, включая формирование команды инновационного проекта. Дискретная оптимизация обеспечивает возможность решения различных задач в управлении проектами, что важно для достижения поставленных целей и обеспечения успеха проекта.

### Результаты

В данном исследовании представлена математическая модель, нацеленная на эффективное формирование команды для реализации инновационных проектов в организации. Модель использует методы дискретной оптимизации для обеспечения оптимального распределения ресурсов и сокращения затрат на заработную плату сотрудников, необходимых для выполнения задач.

Математическая задача моделирования включает целевую функцию, зависящую от количества сотрудников на различных должностях и с различной квалификацией, их заработной платы, а также времени, необходимого для завершения проекта. Модель также позволяет учитывать такие критерии, как эффективность работы сотрудника, необходимая производительность и инновационный показатель сотрудников разной должности. Формулировка данной задачи представляется следующим образом:

$$\min : E(N) = \sum_i \sum_j (N_{ij} \cdot S_{ij} \cdot T),$$

при условии

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_j (N_{ij} \cdot P_{ij} \cdot T) \geq P_{i\_req}, \\ \sum_i (I_j \cdot N_{ij}) \geq I_{j\_req}, \\ N_{ij} \leq N_{ij\_max}, \\ N_{ij} \in \mathbb{Z}. \end{array} \right.$$

Функция  $E(N)$  – целевая функция расходов на трудовые ресурсы. Целевая функция выражает общие расходы на проект, учитывая количество сотрудников на различных должностях с различной квалификацией, их заработную плату и время, необходимое для завершения проекта.

Индекс  $j$  обозначает различные уровни квалификации (например, начинающий, опытный, эксперт и т.д.), а индекс  $i$  указывает на различные должности в организации (например, менеджер, разработчик, аналитик и т.д.).  $N_{ij}$  будет представлять собой переменную, обозначающую количество сотрудников, занимающих должность  $i$  с квалификацией  $j$ .

Переменная  $S_{ij}$  – заработная плата сотрудника  $i$  должности  $j$  квалификации. На основе платформы онлайн-рекрутинга в России возможно обоснование заработных плат для каждой должности соответствующей квалификации.

Срок реализации проекта  $T$  считается неоднородным, количество измеряется в часах. Каждый проект имеет сроки выполнения, которые также учитываются при подборе работников. Формирование срока реализации проекта может зависеть от субъективной оценки, личных ощущений, опыта лица, принимающего решения.

Переменная  $P_{ij}$  количественно оценивает результативность или эффективность работы сотрудника на конкретной должности с определенным уровнем квалификации за определенное количество времени. Более высокие значения  $P_{ij}$  указывают на более высокую эффективность или производительность в выполнении задач в заданный временной интервал.

Переменная  $N_{ij\_max}$  представляет собой максимальное количество сотрудников на должности  $i$  с квалификацией  $j$  в организации. Она определяется количеством персонала в штате компании и является ограничением для численности персонала на каждой конкретной должности и уровне квалификации.

Переменная  $P_{i\_req}$  представляет собой необходимую производительность сотрудников на должности  $i$  для успешной реализации проекта. Эта величина определяется требованиями проекта к результатам работы и эффективности исполнения задач на конкретной должности, измеряется в человеко-часах. Данный показатель основывается на экспертных оценках на моменте инициации проекта и устанавливает, сколько человеко-часов на какой тип работы необходимо.

Переменная  $I_j$  представляет собой инновационный показатель сотрудника с квалификацией  $j$ . Этот показатель отражает способность сотрудника к генерации новых идей, принятию новаторских подходов к решению задач, а также его готовность и способность к внедрению изменений и улучшений в рабочие процессы и проекты.

Инновационный показатель  $I_j$  может оцениваться на основе таких критериев, как творческий потенциал (способность сотрудника к генерации новых идей, нахождению нестандартных решений и креативному мышлению); готовность к изменениям (способность адаптироваться к новым условиям, открытость к инновациям и готовность к экспериментам); результативность во внедрении (эффективность сотрудника в претворении своих идей в жизнь, способность к реализации инноваций и достижению позитивных результатов); степень использования новых технологий и методов (активное применение современных технологий, методов и инструментов в работе).

Оценка инновационного показателя помогает компании определить потенциал сотрудника в области развития и внедрения новых идей, что является ключевым фактором в развитии организации. Это также может быть полезным при формировании команды для проектов, где требуется активное использование новаторских подходов и решений [18].

Для объективной оценки инновационного показателя могут применяться такие подходы, как стандартизированные анкеты для выявления уровня креативности, готовности к изменениям и использования технологий; метод кейсов, который направлен на предоставление сотрудникам практических ситуаций с последующим анализом их решений на предмет инновационности и оригинальности; оценка на основе КРІ (ключевых показателей эффективности), например, количество реализованных идей, их влияние на результаты компании, использование новых методов работы; экспертная оценка, где возможно привлечение независимых экспертов для анализа проектов сотрудников и уровня их инновационности, а также 360-градусная обратная связь от коллег, руководителей и подчиненных для всестороннего анализа поведения сотрудника с точки зрения инновационности.

Необходимый инновационный показатель проекта  $I_{j\_req}$  является важным и новым аспектом в процессе формирования команды для реализации проектов. Данный показатель необходим для оценки потенциала и успешности проекта. Существуют работы, которые посвящены оценке данного показателя, доказывающие его влияние на успешность предприятия [19, 20], что делает

актуальным учет данного показателя, несмотря на его возможную сложность оценки.

Таким образом, предложенная математическая модель направлена на оптимизацию расходов на персонал в процессе выполнения проектов в организации. Она учитывает несколько ключевых факторов, таких как заработная плата, производительность и инновационный вклад сотрудников, а также ограничения на количество и квалификацию персонала.

Целевая функция представляет собой сумму расходов на персонал за время выполнения проекта, выраженную через произведение количества сотрудников каждой должности и квалификации на их заработную плату и время выполнения проекта. Основная цель заключается в минимизации этой суммы для снижения общих расходов на персонал.

Модель учитывает ограничения, связанные с производительностью и квалификацией персонала. Для каждой должности требуется достижение определенного уровня суммарной производительности, необходимого для успешного выполнения проекта. Аналогично для каждой квалификации устанавливается требуемый уровень инновационного вклада. Эти ограничения выражаются через соответствующие суммы произведений производительности и инновационных показателей на количество сотрудников.

Разработанная модель построена в программе Microsoft Excel с использованием надстройки «Поиск решения», которая помогает найти решение с помощью изменения значений целевых ячеек [21]. Апробация модели осуществляется на проектах IT-компании. В структуре компании имеется четкая дифференциация функциональных обязанностей между тремя основными профессиональными ролями: аналитиком, разработчиком и тестировщиком. Данный троичный подход обеспечивает эффективное выполнение каждого этапа жизненного цикла проекта, начиная от изучения требований и формулирования концепции до разработки программного кода и его тестирования на соответствие заранее установленным критериям качества [22].

Аналитики в этой структуре выполняют ключевую роль в изучении и анализе требований клиентов или заказчиков, формулировании функциональных и технических спецификаций, а также в уточнении требований в процессе коммуникации с другими членами команды. Они обеспечивают понимание конечных целей проекта и являются мостом между заказчиками и разработчиками. Разработчики занимаются преобразованием концептуальных и технических спецификаций, созданных аналитиками, в функциональные программные продукты или приложения. Они владеют навыками программирования и обеспечивают реализацию проекта в соответствии с установленными стандартами и требованиями качества. Тестировщики играют важную роль в обеспечении качества разрабатываемого программного продукта. Они разрабатывают и выполняют тестовые сценарии, выявляют дефекты и ошибки в конечном продукте.

Специалисты в области информационных технологий разделяются также на три основных уровня квалификации: Junior, Middle и Senior, в зависимости от опыта работы, инновационного показателя, уровня ответственности и навыков, требуемых для выполнения профессиональных обязанностей. IT-специалисты Junior обычно имеют менее двух лет опыта работы и выполняют базовые задачи, такие как разработка программного обеспечения, техническая

поддержка и системное администрирование. Они чаще нуждаются в руководстве и поддержке со стороны более опытных коллег, и их компетенции в решении проблем и управлении проектами обычно менее развиты по сравнению с более опытными специалистами. Специалисты Middle в IT-сфере, как правило, имеют опыт работы от 2 до 5 лет и обладают определенным уровнем экспертизы в своей области. Они берут на себя более сложные задачи, такие как архитектура программного обеспечения, анализ данных и управление проектами. Специалисты среднего уровня обычно лучше понимают потребности бизнеса и способны действовать более самостоятельно. IT-специалисты Senior являются высококвалифицированными профессионалами с обширным опытом работы в IT-отрасли, обычно более 5 лет. Они занимают руководящие позиции, такие как IT-менеджеры, архитекторы программного обеспечения и технические директора. Специалисты старшего уровня обладают передовыми навыками в решении сложных проблем, стратегическом планировании и критическим мышлением. У них обширный опыт работы с различными технологиями, и они способны управлять крупными проектами и командами [23].

В табл. 1 приведены исходные данные рассматриваемой компании для разработанной модели.

Таблица 1

Исходные данные модели

Должность $i$ и квалификация $j$	$P_{ij}$ , усл. ед.	$S_{ij}$ , руб/час	$N_{ij\_max}$ , чел
Аналитик, Junior	0,8	400	2
Аналитик, Middle	1	500	2
Аналитик, Senior	1,2	700	1
Разработчик, Junior	0,8	600	2
Разработчик, Middle	1	700	3
Разработчик, Senior	1,2	1000	2
Тестировщик, Junior	0,8	500	2
Тестировщик, Middle	1	600	1
Тестировщик, Senior	1,2	800	1

Экспертным методом определены инновационные показатели для каждой квалификации: для Junior – 0,1, для Middle – 0,4, для Senior – 1. В качестве входных данных для входящего в систему проекта по техническому заданию: срок реализации составляет 320 часов, необходимая производительность аналитической работы – 600 человеко-часов, для разработки – 1200, для тестировочной – 700, необходимый инновационный показатель по проекту равен 4 единицам.

На основе прогонки модели были получены следующие результаты. Для оптимального формирования команды проекта потребуется: 1 аналитик Middle, 1 аналитик Senior, 1 разработчик Junior, 3 разработчика Middle, 1 тестировщик Middle и 1 тестировщик Senior. При таком штате расходы сведутся к минимуму, а именно к значению в 1 728 000 руб.

Таким образом, предложенный состав команды обеспечивает оптимальное соотношение между расходами на сотрудников, необходимой производительностью, инновационным потенциалом сотрудников и сроком реализации.

Распределение часов работы между членами команды соответствует их квалификации и сложности задач.

### *Заключение*

Проекты (ИТ, научно-технические, инновационные) представляют собой важный двигатель прогресса и экономического развития в современном информационном обществе. Эффективность команды оказывает прямое влияние на успех проекта, что подчеркивает стратегическое значение формирования эффективных коллективов для их реализации. Существующие подходы к формированию команд зачастую опираются на опыт и наблюдения, что может привести к неоптимальным результатам. В данном контексте разработка модели формирования команды на основе методов дискретной оптимизации представляет собой перспективный подход для повышения эффективности работы команды и снижения затрат на проект.

Разработанная модель формирования команды проекта с использованием методов дискретной оптимизации, представленная в данной статье, отличается от моделей в рассмотренных исследованиях применением инновационного потенциала сотрудника для вычисления оптимального состава команды. Модель также учитывает различные уровни профессиональных компетенций и их требования для реализации проекта.

Исследование внесло вклад в разработку модели формирования команды проекта и подтвердило перспективность учета инновационного показателя при формировании команды проекта. Дальнейшее развитие модели требует учета дополнительных факторов (взаимодействие членов команды и их способность срабатывать друг с другом, личные и психологические аспекты сотрудников и т.д.), влияющих на эффективность команды, добавление динамичности в разработанную модель, детального изучения подсчета инновационного показателя, а также разработки методического обеспечения для ее практического применения.

Практическая значимость модели заключается в возможности использования ее для оптимизации процесса формирования команды в проектах, что позволит повысить эффективность работы команд и снизить общие затраты на проект. Однако стоит отметить, что представленная модель является упрощенной и возможно ее дальнейшее развитие и усовершенствование в других исследованиях.

Данная модель формирования команды проекта полезна множеству заинтересованных сторон. В первую очередь она является ценным инструментом для менеджмента компаний, поскольку позволит им оптимизировать процесс формирования команд, что, в свою очередь, повысит шансы на успешное завершение проектов и улучшит финансовые показатели компании. Модель будет полезна исследователям и разработчикам, которые смогут использовать ее для дальнейших исследований в области оптимизации командных процессов и для создания новых методических подходов к управлению командами. Участники проектов также найдут в модели ценный инструмент для оптимизации состава и структуры своих команд, что поможет им улучшить внутреннюю координацию, повысить производительность и достичь поставленных целей более эффективно. Таким образом, модель формирования команды проекта на базе методов дискретной оптимизации представляет собой полезный

инструмент для широкого круга заинтересованных сторон, способствуя повышению эффективности и успешности реализации разрабатываемых проектов.

### *Список литературы*

1. Beketov S. M., Pospelov K. N., Redko S. G. A human capital simulation model in innovation projects // *Control Sciences*. 2024. № 3. P. 16–25. doi: 10.25728/cs.2024.3.2
2. Ежова Л. С., Воронин А. В., Румянцева П. П. Формирование эффективной команды проекта как условие успешной реализации проекта // *Актуальные вопросы современной экономики*. 2020. № 8. С. 269–276.
3. Вицелярова К. Н. Методика оценки эффективности и результативности проектов // *Естественно-гуманитарные исследования*. 2021. № 5. С. 48–52.
4. Евдочук Д. Д., Красникова А. С. Формирование команды инновационного проекта // *Управление научно-техническими проектами*. 2020. С. 91–95.
5. Могиленская Ю. С. Социально-психологические условия создания эффективной управленческой команды // *Синергия наук*. 2021. № 63. С. 156–164.
6. Кудрявцев Н. Г., Кудин Д. В., Беликова М. Ю., Темербекова А. А. Исследование влияния темпераментных групп ТИМов участников проектной команды на эффективность реализации программных компонент комплексного учебного проекта при использовании метода проектных интерфейсов // *Информатизация образования и методика электронного обучения: цифровые технологии в образовании*. 2021. С. 262–267.
7. Bendor J., Page S. E. Optimal team composition for tool-based problem solving // *Journal of Economics & Management Strategy*. 2019. Vol. 28, № 4. P. 734–764.
8. Dehghani M., Trojovský P. Teamwork optimization algorithm: A new optimization approach for function minimization/maximization // *Sensors*. 2021. Vol. 21, № 13. P. 4567.
9. Zainal P., Razali D., Mansor Z. Team formation for agile software development: a review // *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.* 2020. T. 10, № 2. P. 555–561.
10. Liu B. [et al.]. Coach-player multi-agent reinforcement learning for dynamic team composition // *International Conference on Machine Learning*. 2021. P. 6860–6870.
11. Гужина Г. Н., Гужин А. А. Формирование команды проекта как фактор эффективности проектного менеджмента современной организации // *Управленческий учет*. 2021. № 9-2. С. 356–364.
12. Булыгина О. В., Иванова О. А. Инструменты формирования команды поддержки изменений на основе методов роевого интеллекта // *Системный анализ в проектировании и управлении*. 2021. Т. 25, № 3. С. 82–87.
13. El-Ashmawi W. H., Ali A. F., Tawhid M. A. An improved particle swarm optimization with a new swap operator for team formation problem // *Journal of Industrial Engineering International*. 2019. T. 15. P. 53–71.
14. Леонтьев В. К. Дискретная оптимизация // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2007. Т. 47, № 2. С. 338–352.
15. Тебекин А. В., Тебекин П. А., Тебекина А. А. Школа количественного подхода к управлению и возможности использования ее положений для развития современного менеджмента // *Журнал исследований по управлению*. 2018. Т. 4, № 8. С. 52–61.
16. Бекетов С. М., Зубкова Д. А., Редько С. Г. Сравнение методов оптимизации в имитационных моделях сложных организационно-технических систем // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024. Т. 12, № 3. doi: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.027
17. Адамец Д. Ю., Буркова И. В. О подходе к решению задач календарного планирования повышения зрелости управления проектами в области энерготехнологий // *Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2019)*. 2019. С. 208–210.

18. Климовских Н. В., Рябова В. Э. Оценка инновационного потенциала персонала организации // Экономика и бизнес: теория и практика. 2021. № 10. С. 80.
19. Каракулин А. Ю., Ершова И. Г. Методический подход управления инновационным потенциалом персонала // Вестник Академии знаний. 2020. № 6. С. 145–151.
20. Иванов И. Н., Орлова Л. В., Иванов С. И. Инновационный потенциал персонала как фактор конкурентоспособности организации // Управление персоналом и интеллектуальными ресурсами в России. 2021. Т. 10, № 2. С. 31–35.
21. Урубков А. Р., Федотов И. В. Методы и модели оптимизации управленческих решений : учеб. пособие. М. : Дело РАНХиГС, 2015. 240 с.
22. Никулина Н. О., Малахова А. И., Баталова В. И. Методика оценки вклада участников проектной команды в достижение целей ИТ-проекта // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 2. С. 94–104.
23. Ушакова Ю. О. Теоретические аспекты сущности четвертой промышленной революции и Интернета вещей // Социальное пространство. 2019. № 2. С. 3.

### References

1. Beketov S.M., Pospelov K.N., Redko S.G. A human capital simulation model in innovation projects. *Control Sciences*. 2024;(3):16–25. doi: 10.25728/cs.2024.3.2
2. Ezhova L.S., Voronin A.V., Rumyantseva P.P. Formation of an effective project team as a condition for successful project implementation. *Aktual'nye voprosy sovremennoy ekonomiki = Current issues of the modern economy*. 2020;(8):269–276. (In Russ.)
3. Vitselyarova K.N. Methodology for evaluating the effectiveness and efficiency of projects. *Estestvenno-gumanitarnye issledovaniya = Natural Sciences and Humanities Research*. 2021;(5):48–52. (In Russ.)
4. Evdochuk D.D., Krasnikova A.S. Formation of an innovation project team. *Upravlenie nauchno-tekhnicheskimi proektami = Management of scientific and technical projects*. 2020:91–95. (In Russ.)
5. Mogilenskaya Yu.S. Socio-psychological conditions for creating an effective management team. *Sinerhiya nauk = Synergy of Sciences*. 2021;(63):156–164. (In Russ.)
6. Kudryavtsev N.G., Kudin D.V., Belikova M.Yu., Temerbekova A.A. Investigation of the influence of temperamental groups of team members of the project team on the effectiveness of the implementation of program components of a comprehensive educational project when using the project interface method. *Informatizatsiya obrazovaniya i metodika elektronnoy obucheniya: tsifrovyye tekhnologii v obrazovanii = Informatization of education and e-learning methodology: digital technologies in education*. 2021:262–267. (In Russ.)
7. Bendor J., Page S.E. Optimal team composition for tool-based problem solving. *Journal of Economics & Management Strategy*. 2019;28(4):734–764.
8. Dehghani M., Trojovský P. Teamwork optimization algorithm: A new optimization approach for function minimization/maximization. *Sensors*. 2021;21(13):4567.
9. Zainal P., Razali D., Mansor Z. Team formation for agile software development: a review. *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.* 2020;10(2):555–561.
10. Liu B. et al. Coach-player multi-agent reinforcement learning for dynamic team composition. *International Conference on Machine Learning*. 2021:6860–6870.
11. Guzhina G.N., Guzhin A.A. Project team formation as a factor of effectiveness of project management in a modern organization. *Upravlencheskiy uchet = Managerial accounting*. 2021;(9-2):356–364. (In Russ.)
12. Bulygina O.V., Ivanova O.A. Tools for forming a change support team based on swarm intelligence methods. *Sistemnyy analiz v proektirovanii i upravlenii = System analysis in design and management*. 2021;25(3):82–87. (In Russ.)

13. El-Ashmawi W.H., Ali A.F., Tawhid M.A. An improved particle swarm optimization with a new swap operator for team formation problem. *Journal of Industrial Engineering International*. 2019;15:53–71.
14. Leont'ev V.K. Discrete optimization. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki = Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2007;47(2):338–352. (In Russ.)
15. Tebekin A.V., Tebekin P.A., Tebekina A.A. The school of quantitative approach to management and the possibility of using its provisions for the development of modern management. *Zhurnal issledovaniy po upravleniyu = Journal of Management Studies*. 2018;4(8):52–61. (In Russ.)
16. Beketov S.M., Zubkova D.A., Red'ko S.G. Comparison of optimization methods in simulation models of complex organizational and technical systems. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, optimization, and information technology*. 2024;12(3). doi: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.027
17. Adamets D.Yu., Burkova I.V. On the approach to solving the tasks of calendar planning to increase the maturity of project management in the field of energy technologies. *Intellektual'nye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte. Komp'yuternoe i matematicheskoe modelirovanie (ISUZhT-2019) = Intelligent control systems in railway transport. Computer and mathematical modeling (ISMST-2019)*. 2019;208–210. (In Russ.)
18. Klimovskikh N.V., Ryabova V.E. Assessment of the innovative potential of the organization's personnel. *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika = Economics and Business: theory and practice*. 2021;(10):80. (In Russ.)
19. Karakulin A.Yu., Ershova I.G. Methodological approach to personnel innovation potential management. *Vestnik Akademii znaniy = Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2020;(6):145–151. (In Russ.)
20. Ivanov I.N., Orlova L.V., Ivanov S.I. The innovative potential of personnel as a factor of competitiveness of the organization. *Upravlenie personalom i intellektual'nymi resursami v Rossii = Personnel and intellectual resources management in Russia*. 2021;10(2):31–35. (In Russ.)
21. Urubkov A.R., Fedotov I.V. *Metody i modeli optimizatsii upravlencheskikh resheniy: ucheb. posobie = Methods and models of optimization of managerial decisions : textbook*. Moscow: Delo RANKhiGS, 2015:240. (In Russ.)
22. Nikulina N.O., Malakhova A.I., Batalova V.I. Methodology for assessing the contribution of project team members to achieving the goals of an IT project. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management*. 2021;(2):94–104. (In Russ.)
23. Ushakova Yu.O. Theoretical aspects of the essence of the Fourth Industrial Revolution and the Internet of Things. *Sotsial'noe prostranstvo = Social Space*. 2019;(2):3. (In Russ.)

#### **Информация об авторах / Information about the authors**

**Сальбек Мустафаевич Бекетов**

аналитик, ассистент лаборатории цифрового моделирования  
индустриальных систем  
Высшей школы проектной деятельности  
и инноваций в промышленности,  
Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого  
(Россия, г. Санкт-Петербург,  
ул. Политехническая, 29)  
E-mail: salbek.beketov@spbpu.com

**Salbek M. Beketov**

Analyst, assistant of the laboratory  
of digital modeling of industrial systems  
of the Graduate School of Project  
Management and Innovation in Industry,  
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic  
University  
(29 Politehnicheskaja street,  
St. Petersburg, Russia)

**Максим Владимирович Дергачев**

магистрант  
Высшей школы проектной деятельности  
и инноваций в промышленности,  
Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого  
(Россия, г. Санкт-Петербург,  
ул. Политехническая, 29)  
E-mail: dergachev.mv@edu.spbstu.ru

**Maksim V. Dergachev**

Master degree student of the Graduate  
School of Project Management  
and Innovation in Industry,  
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic  
University  
(29 Politehnicheskaja street,  
St. Petersburg, Russia)

**Сергей Георгиевич Редько**

доктор технических наук, профессор,  
старший научный сотрудник, директор  
Высшей школы проектной деятельности  
и инноваций в промышленности,  
Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого  
(Россия, г. Санкт-Петербург,  
ул. Политехническая, 29)  
E-mail: redko\_sg@spbstu.ru

**Sergey G. Redko**

Doctor of technical sciences, professor,  
senior researcher, director of the Graduate  
School of Project Management  
and Innovation in Industry,  
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic  
University  
(29 Politehnicheskaja street,  
St. Petersburg, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 10.10.2024**

**Поступила после рецензирования/Revised 13.12.2024**

**Принята к публикации/Accepted 15.03.2025**

## МЕТОДИКА ДОКЛИНИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК УЗЛА ПОДВИЖНОСТИ ЭНДОПРОТЕЗОВ ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**М. А. Ксенофонов**

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
maksenofontov@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Актуальность темы обусловлена потребностью в доклиническом исследовании пар трения эндопротезов тазобедренного сустава, направленном на оптимизацию лечебно-диагностических процессов эндопротезирования тазобедренного сустава человека. Целью работы является разработка и апробация методики исследования медико-биологических процессов функционирования эндопротезов тазобедренного сустава, позволяющая оценить прочность и износостойкость пар трения. *Материалы и методы.* В методике исследования использовано регрессионное математическое моделирование напряжений узла подвижности эндопротеза тазобедренного сустава на основе медико-биологических процессов функционирования тазобедренного сустава и сравнительное испытание объемного износа пар трения. *Результаты.* Разработанные имитационные и математические модели медико-биологических процессов функционирования тазобедренного сустава позволили оценить надежность конструкций пар трения из углеситалла. Оценка полученных данных напряжений выявила высокую надежность узла подвижности с парой трения из углеситалла. Объемный износ пары трения из углеситалла меньше, чем у керамической пары трения, на 31,8 %. *Выводы.* Математические и имитационные модели позволяют определять параметры нагружения узлов подвижности эндопротезов тазобедренного сустава. В результате исследования запас прочности пары трения из углеситалла составил 4,5, что говорит о высокой надежности конструкции. Определение объемного износа позволяет установить возможность новых пар трения снижать риск развития послеоперационных осложнений. Объемный износ пары трения из углеситалла меньше, чем пары трения из керамики, на 31,8 %. Полученные в результате исследования данные позволят оптимизировать лечебно-диагностический процесс эндопротезирования тазобедренного сустава человека за счет предоставления данных о прочности и износостойкости эндопротезов на предоперационном этапе.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, эндопротез тазобедренного сустава, углеситалл, пара трения

**Для цитирования:** Ксенофонов М. А. Методика доклинического исследования характеристик узла подвижности эндопротезов тазобедренного сустава на основе математического моделирования // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 1. С. 114–124. doi: 10.21685/2227-8486-2025-1-9

## METHODOLOGY OF PRECLINICAL CHARACTERISTICS STUDYING THE MOBILITY NODE OF HIP JOINT ENDOPROSTHESES BASED ON MATHEMATICAL MODELING

**M.A. Ksenofontov**

Penza State University, Penza, Russia  
maksenofontov@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The relevance of the topic is due to the need for preclinical research of friction pairs of hip endoprostheses, aimed at optimizing the treatment and diagnostic processes of human hip arthroplasty. The aim of the work is to develop and test a methodology for studying the medical and biological processes of functioning of hip endoprostheses, which allows assessing the strength and wear resistance of friction pairs. *Materials and methods.* The research methodology uses regression mathematical modeling of stresses in the mobility unit of the hip endoprosthesis based on the medical and biological processes of functioning of the hip joint and a comparative test of volumetric wear of friction pairs. *Results.* The developed simulation and mathematical models of medical and biological processes of functioning of the hip joint made it possible to assess the reliability of the designs of friction pairs made of carbosital alloy. Evaluation of the obtained stress data revealed high reliability of the mobility unit with a friction pair made of carbosital alloy. Volumetric wear of the friction pair made of carbosital-ceramic is 31.8 % less than that of the ceramic friction pair. *Conclusions.* Mathematical and simulation models allow us to determine the loading parameters of the mobility units of hip endoprostheses. As a result of the study, the safety margin of the friction pair made of carbosital-ceramic was 4.5, which indicates high reliability of the design. Determination of volumetric wear allows us to determine the ability of new friction pairs to reduce the risk of postoperative complications. Volumetric wear of the friction pair made of carbosital-ceramic is 31.8 % less than that of the ceramic friction pair. The data obtained as a result of the study will optimize the treatment and diagnostic process of human hip arthroplasty by providing data on the strength and wear resistance of endoprostheses at the preoperative stage.

**Keywords:** mathematical modeling, hip endoprosthesis, carbosital, friction pair

**For citation:** Ksenofontov M.A. Methodology of preclinical characteristics studying the mobility node of hip joint endoprostheses based on mathematical modeling. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2025;(1):114–124. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-1-9

### **Введение**

В современном эндопротезировании тазобедренного сустава нерешенными остаются проблемы, связанные с асептической нестабильностью, остеолитизмом, вывихами, износом полиэтиленового вкладыша пары трения и др. [1, 2]. Решение данных проблем связано с усовершенствованием технических характеристик эндопротезов тазобедренного сустава [3, 4]. Тем не менее изменение технических характеристик при разработке новых конструкций и узлов подвижности эндопротезов требует подтверждения их эффективности в клинических условиях, но оценить эффективность можно не ранее чем через 10–15 лет [5].

Следовательно, необходимо проводить доклиническую оценку эффективности предлагаемых новых материалов и конструкций эндопротезов. Большинство доклинических исследований новых хирургических методик,

материалов, лекарственных препаратов и других медицинских изделий проводятся на лабораторных животных [6]. Однако исследовать прочность и износостойкость эндопротезов тазобедренного сустава на животных невозможно, так как нет животных с похожей биомеханикой движений и нагрузки тазобедренного сустава человека. Соответственно, существует необходимость в доклинической оценке работоспособности разрабатываемых конструкций, которая определяется напряженно-деформированным состоянием биомеханической системы при физиологических нагрузках. Для этого широко применяется имитационное моделирование, которое стало эффективно благодаря современным программным комплексам [7].

Достоверную информацию можно получить при изучении механобиологических математических моделей, описывающих медико-биологические процессы функционирования искусственных суставов человека, а также их структуру и механические свойства [8]. В связи с этим особую важность приобретают доклинические исследования новых конструкций и материалов эндопротезов путем имитационного и математического моделирования с учетом медико-биологических процессов функционирования сустава, которое позволит проанализировать новую конструкцию на предмет возможности ее использования в условиях физиологических нагрузок [9]. Это позволит оптимизировать лечебно-диагностический процесс эндопротезирования суставов человека и улучшить клинические результаты [10].

### *Материалы и методы*

Доклиническая оценка основывалась на исследовании основных факторах, воздействующих на эндопротез тазобедренного сустава во время эксплуатации. К таким факторам были отнесены нагрузка, угол приложения нагрузки и зазор между головкой и вкладышем, так как эти факторы напрямую влияют на напряжения в конструкции узла подвижности эндопротеза, с последующим исследованием объемного износа пары трения. Для оценки влияния основных факторов на напряжения в конструкции узла подвижности была предложена методика испытания, позволяющая поэтапно исследовать надежность и износостойкость узла подвижности эндопротезов тазобедренного сустава (рис. 1).

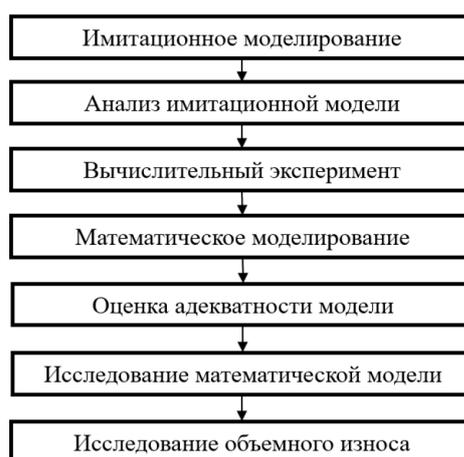


Рис. 1. Схема методики исследования

Схематично эндопротез и направление приложения нагрузки представлены на рис. 2.

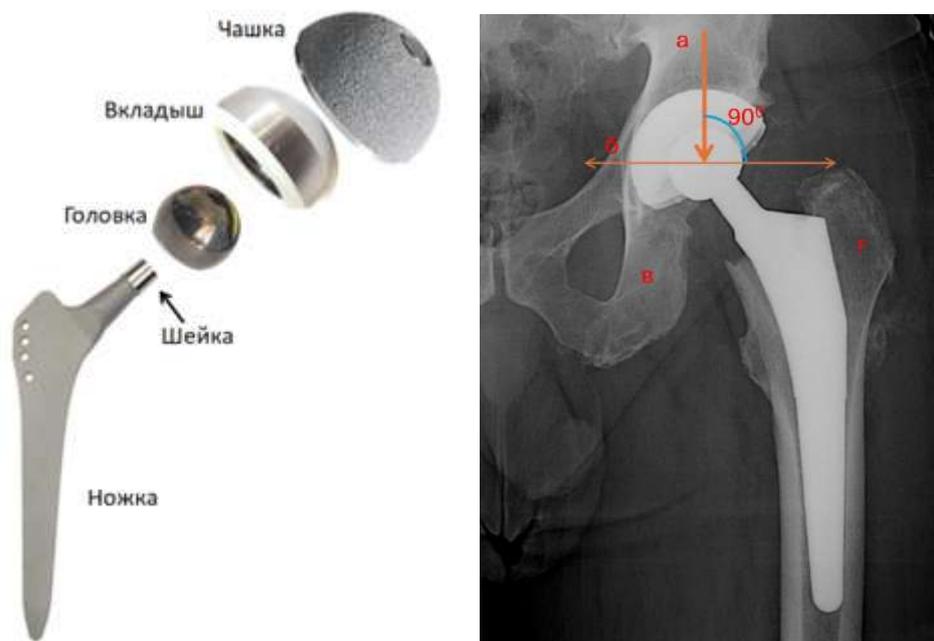


Рис. 2. Внешний вид и направление приложения нагрузки на эндопротез тазобедренного сустава:  
 $a$  – направление приложения нагрузки;  $b$  – горизонтальная ось, проходящая через геометрический центр головки;  $v$  – тазовая кость;  $z$  – бедренная кость

Первый этап методики включал имитационное моделирование напряжений в конструкции узла подвижности. Моделирование проводилось в среде Ansys. При проведении расчетов были заданы параметры угла приложения нагрузки от  $0^\circ$  (вертикальное приложение нагрузки) до  $45^\circ$ , так как в этом диапазоне приходится основная нагрузка на тазобедренный сустав. Зазор между головкой и вкладышем варьировался от 0,15 до 0,35 мм, так как в процессе износа материалов пары трения меняется зазор между головкой и вкладышем, что напрямую влияет на напряжения в конструкции узла подвижности. Нагрузка, действующая на узел подвижности, равнялась 2250 Н. Параметр нагрузки задавался в соответствии с ГОСТ Р ИСО 14242-3–2013.

На втором этапе методики проводился анализ результатов имитационного моделирования. Обработка результатов производилась с использованием методики многофакторного регрессионного анализа на основе центрального композиционного ротatableного равномерного планирования с последующим построением математической модели.

На третьем этапе проводился вычислительный эксперимент. В качестве основных факторов воздействия на узел подвижности при вычислительном эксперименте были приняты:

- нагрузка  $F$ , Н;
- угол приложения нагрузки  $A$ , град;
- зазор между головкой и вкладышем  $L$ , мм.

Параметром оптимизации являлось относительное напряжение  $\sigma_{\text{бм}}$  в конструкции узла подвижности с парой трения из углеситалла по Баландину.

Относительные напряжения по Баландину могут быть определены по зависимости

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \sqrt{\sigma_p \sigma_c - (\sigma_c - \sigma_p) \sigma_0 \left( \sigma_0 = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \right)},$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения;  $\sigma_0$  – среднее напряжение [11].

Уровни и интервалы варьирования факторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Кодовое обозначение факторов	Уровни факторов					Интервалы варьирования факторов
		-2	-1	0	+1	+2	
Значение факторов							
Угол приложения нагрузки $A$ , град	$x_1$	5	15	25	35	45	10
Нагрузка $F$ , Н	$x_2$	1950	2100	2250	2400	2550	150
Зазор между головкой и вкладышем $L$ , мм	$x_3$	0,05	0,15	0,25	0,35	0,45	0,1

Для построения математической модели, описывающей влияние на относительное напряжение ( $\sigma_{\text{бм}}$ ) по Баландину значимых факторов, таких как нагрузка ( $F$ , Н), угол приложения нагрузки ( $A$ , град), зазор между головкой и вкладышем ( $L$ , мм), была использована методика Бокса – Уилсона [12].

Для расчета математической модели была разработана программа ЭВМ, которая автоматически составляла план эксперимента, выводила результат исследования и оценивала адекватность математической модели.

Адекватность моделей определялась с помощью критерия Фишера  $F$ , который рассчитывался по соотношению

$$F_N = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_b^2},$$

где  $S_{\text{ад}}^2$  – остаточная дисперсия;  $S_b^2$  – дисперсия воспроизводимости.

Расчетное значение критерия Фишера  $F_N$  сравнивалось с табличным  $F_T$ .

Если расчетное значение критерия Фишера меньше критического, то модель адекватна. При неадекватности модели проводят дополнительные эксперименты с целью выявления причин неадекватности модели.

После расчетов была построена регрессионная математическая модель, отражающая зависимость напряжений в конструкции узла подвижности эндопротеза тазобедренного сустава от выбранных факторов.

Заключительным этапом исследования, необходимым для оценки износоустойчивости, было сравнительное исследование объемного износа узлов подвижности с парами трения из углеситалла и керамики. Объемный износ – это

важная характеристика пары трения эндопротеза тазобедренного сустава, отражающая длительность функционирования эндопротеза при физиологических нагрузках в тазобедренном суставе. В испытании использовалась керамическая головка и вкладыш фирмы Zimmer (диаметр головки 28 мм) и головка и вкладыш из углеситалла (диаметр головки 28 мм). Исследование выполнялось на установке, собранной специально для проведения данного испытания, и регламентировалось ГОСТ Р ИСО 14242-3–2013. Парам трения необходимо пройти не менее 5 млн циклов движения при нагрузке в 2250 Н.

### Результаты и обсуждение

При оценке распределения относительных напряжений по Баландину учитывалось, что превышение показателя относительных напряжений единицы. Результаты полученных значений относительных напряжений по Баландину приведены в табл. 2.

Таблица 2

Полученные максимальные значения относительных напряжений в имитационной модели головки и вкладыша с парой трения из углеситалла

Зазор между головкой и вкладышем, мм	Угол приложения нагрузки, град		
	0°	22,5°	45°
0,15	0,129	0,155	0,175
0,25	0,149	0,222	0,202
0,35	0,150	0,196	0,220

При всех варьируемых параметрах значения напряжений в паре трения из углеситалла не превысили предела прочности материалов, что говорит о высокой надежности конструкции при функционировании в тазобедренном суставе. Минимальный запас прочности составил 4,5.

Графически результаты имитационного моделирования в среде Ansys представлены на рис. 3.

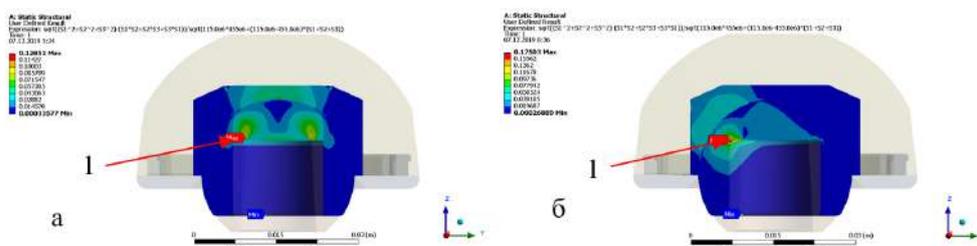


Рис. 3. Распределение относительных напряжений по Баландину в деталях узла подвижности из углеситалла, зазор 0,15 мм:

*а* – угол приложения нагрузки 0°; *б* – угол приложения нагрузки 45°;

*1* – зона максимального напряжения

После статистической обработки результатов опытов вычислительного эксперимента были получены полиномиальные зависимости влияния основных факторов на относительное напряжение  $\sigma_{\text{бм}}$  по Баландину в кодовых координатах:

$$\sigma_{6M} = 0,227 + 0,022x_1 + 0,032x_2 + 0,016x_3 + 0,003x_1x_2 - 0,002x_1x_3 + 0,003x_2x_3 + 0,001x_3^2. \quad (1)$$

После перехода к натуральным координатам выражение (1) приняло вид

$$\sigma_{6M} = -0,143 - 0,0027A + 0,0001F - 0,1875L + 0,000002AF + 0,0015AL + 0,0002FL + 0,13L^2. \quad (2)$$

Для оценки влияния отдельных технологических факторов (угол приложения нагрузки ( $A$ ), нагрузка ( $F$ ) и зазор между головкой и вкладышем ( $L$ )) на параметры оптимизации были получены частные зависимости. Полученные частные зависимости позволяют оценить влияние отдельных факторов на относительное напряжение по Баландину.

Адекватность математической модели оценивалась по методике обработки результатов вычислительного эксперимента на основе критерия Фишера по сравнению отношений дисперсий адекватности и воспроизводимости. Сходимость же имитационных и математических моделей можно оценить по графику на рис. 4, построенному на основе данных имитационной модели.

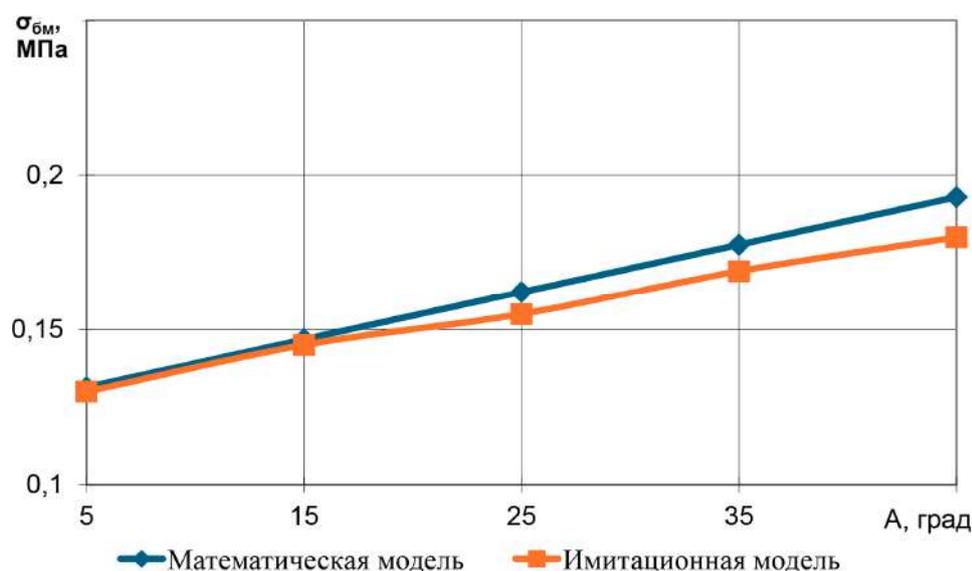


Рис. 4. Сравнительная зависимость относительных напряжений по Баландину в деталях узла подвижности из эндопротеза с парой трения из углеситалла от угла приложения нагрузки: зазор между головкой и вкладышем 0,15 мм; нагрузка 2250 Н

При соответствующих значениях видно хорошую адекватность математической и имитационной моделей. Это визуально отображает корректность оценки адекватности по критерию Фишера в соответствии с методикой обработки результатов вычислительного эксперимента.

Имитационное и математическое моделирование позволило провести оценку надежности узла подвижности дополняя друг друга. Имитационные модели позволяют широко проанализировать сущность процесса функционирования узла подвижности, но требуют больших затрат времени на процесс проведения анализа. Математические модели значительно выигрывают в скорости

использования, но имеют ограниченный предел значимости пределов варьирования входных факторов, в пределах 20 % зоны от исходных значений.

Медико-биологический процесс функционирования тазобедренного сустава включает в себя процесс движения в суставе при высоких нагрузках, следовательно, пара трения подвергается объемному износу в процессе функционирования искусственного сустава. При оценке объемного износа пары трения из углеситалла было принято решение сравнить с объемным износом керамической пары трения, как с наиболее близкой по трибологическим характеристикам.

За время испытания объемного износа обе пары трения прошли необходимые 5 млн циклов, требуемые по условию испытания. Потеря массы керамической головки составила 0,009 г, керамического вкладыша – 0,013 г. Головка из углеситалла потеряла 0,006 г, вкладыш – 0,009 г. Суммарно потеря массы углеродной пары трения меньше, чем у керамической пары трения на 31,8 % (табл. 3).

Таблица 3

Результаты измерений объемного износа пар трения из углеситалла и керамики

Показатель	Керамическая пара трения		Пара трения из углеситалла	
	Головка	Вкладыш	Головка	Вкладыш с металлическим адаптером
Масса, г	36,304	33,269	23,756	64,862
Потеря массы пары трения после испытания, г	0,009	0,013	0,006	0,009
Суммарная потеря массы пар трения, г	0,022		0,015	

Исходя из полученных данных были рассчитаны показатели объемного износа исследуемых пар трения и сравнены с другими парами трения, используемыми в эндопротезировании тазобедренного сустава (табл. 4).

Таблица 4

Скорость износа пар трения эндопротеза тазобедренного сустава

Пара трения	Объемный износ, мм <sup>3</sup> /млн циклов
Керамика – Полиэтилен	4,09 [13]
Металл – Полиэтилен	6,71 [14]
Керамика – Керамика	1,52
Углеситалл – Углеситалл	1,43

Пара трения из углеситалла имеет наименьший показатель объемного износа среди используемых в эндопротезировании тазобедренного сустава пар трения. В соответствии с тем, что риск развития осложнений, связанных с износом материалов пар трения имеет прямую зависимость от объемного износа, снижение данного показателя приведет к снижению риска развития остеолитизиса и асептического расшатывания [15].

### **Заключение**

Математическое и имитационное моделирование медико-биологических процессов функционирования тазобедренного сустава позволяет оценить возможность конструкции выдерживать физиологические нагрузки тазобедренного сустава.

В результате исследования узел подвижности эндопротеза тазобедренного сустава с парой трения из углеситалла обеспечивает низкий уровень напряжений в конструкции и высокий запас прочности конструкции, равный 4,5, что говорит о высокой надежности пары трения из углеситалла в эндопротезировании тазобедренного сустава человека.

Полученная регрессионная математическая модель позволяет на доклиническом этапе исследования эндопротезов тазобедренного сустава оценить надежность узлов подвижности из различных материалов. Разработанная программа ЭВМ позволит автоматизировать процессы расчета математической модели, что упростит и ускорит получение результатов доклинического исследования.

Низкий показатель объемного износа узла подвижности с парой трения из углеситалла позволяет снизить риски развития послеоперационных осложнений, связанных с износом материалов пар трения эндопротезов тазобедренного сустава.

Полученные в результате предложенной методики исследования данные позволят оптимизировать лечебно-диагностический процесс эндопротезирования тазобедренного сустава человека за счет предоставления данных о прочности и износостойкости эндопротезов на дооперационном этапе.

### **Список литературы**

1. Cong Y., Wang Y., Yuan T. [et al.]. Macrophages in aseptic loosening: Characteristics, functions, and mechanisms // *Front Immunol.* 2023. Vol. 14. doi: 10.3389/fimmu.2023/1122057
2. Yao K., Chen Y. Comprehensive evaluation of risk factors for aseptic loosening in cemented total knee arthroplasty: A systematic review and meta-analysis // *J Exp Orthop.* 2024. Vol. 11 (3). P. 12095. doi: 10.1002/jeo2.12095
3. Affatato S. Perspectives in Total Hip Arthroplasty: Advances in Biomaterials and Their Tribological Interactions // Elsevier Science. 2014. P. 182.
4. Aherwar A., Singh A. K., Patnaik A. Current and future biocompatibility aspects of biomaterials for hip prosthesis // *AIMS Bioeng.* 2015. Vol. 3. P. 23–43.
5. Yang T., Xie J., Hu Y. [et al.]. Mid- and long-term effectiveness of total hip arthroplasty with Ribbed femoral stem prosthesis in 354 cases // *Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery.* 2019. Vol. 33 (9). P. 1116–1120. doi: 10.7507/1002-1892.201901124
6. Ершова А. А., Макаренко Л. В. Доклинические исследования на лабораторных животных // *Актуальные проблемы ветеринарной медицины и биологической безопасности : материалы науч.-практ. конф.* 2024. С. 75–83.
7. Маслов Л. Б., Дмитрюк А. Ю., Жмайло М. А., Коваленко А. Н. Исследование прочности эндопротеза тазобедренного сустава из полимерного материала // *Российский журнал биомеханики.* 2022. Т. 26, № 4. С. 19–33. doi: 10.15593/RZhBiomeh/2022.4.02
8. Ambard D., Swider P. A predictive mechano-biological model of the bone-implant healing // *Eur. J. Mech. A-Solids.* 2006. Vol. 25. P. 927–937.

9. Котельников Г. П., Колсанов А. В., Николаенко А. Н. [и др.]. Анализ биомеханики проксимального межфалангового сустава после эндопротезирования // Гений ортопедии. 2023. Т. 29, № 5. С. 468–474.
10. Günther C., Winner B., Neurath M. F., Stappenbeck T. S. Organoids in gastrointestinal diseases: from experimental models to clinical translation // *Gut*. 2022. Vol. 71 (9). P. 1892–1908. doi: 10.1136/gutjnl-2021-326560
11. Спиридонов А. А., Васильев Н. Г. Планирование эксперимента : учеб. пособие. Свердловск : Свердловское изд. УПИ им. С. М. Кирова, 1975. 152 с.
12. Машиностроение : энциклопедия : в 40 т. Т. II-1. Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов / ред.-сост. Е. И. Мамаева ; отв. ред. Е. Т. Долбенко. М. : Машиностроение, 2010. 856 с.
13. Lee I., Shiroma E. J., Kamada M. [et. al.]. Association of Step Volume and Intensity With All-Cause Mortality in Older Women // *JAMA Intern Med*. 2019. Vol. 179, № 8. P. 1105–1112. doi: 10.1001/jamainternmed.2019.0899
14. Merola M., Affatato S. Materials for hip prostheses: A review of wear and loading considerations (Review) // *Materials (Basel)*. 2019. Vol. 12 (3). P. 495. doi: 10.3390/ma12030495
15. Stratton-Powell A. A., Pasko K. M., Brockett C. L., Tipper J. L. The Biologic Response to Polyetheretherketone (PEEK) Wear Particles in Total Joint Replacement: A Systematic Review // *Clin Orthop Relat Res*. 2016. Vol. 474 (11). P. 2394–2404. doi: 10.1007/s11999-016-4976-z

### *References*

1. Cong Y., Wang Y., Yuan T. et al. Macrophages in aseptic loosening: Characteristics, functions, and mechanisms. *Front Immunol*. 2023;14. doi: 10.3389/fimmu.2023/1122057
2. Yao K., Chen Y. Comprehensive evaluation of risk factors for aseptic loosening in cemented total knee arthroplasty: A systematic review and meta-analysis. *J Exp Orthop*. 2024;11(3):12095. doi: 10.1002/jeo2.12095
3. Affatato S. Perspectives in Total Hip Arthroplasty: Advances in Biomaterials and Their Tribological Interactions. *Elsevier Science*. 2014:182.
4. Aherwar A., Singh A.K., Patnaik A. Current and future biocompatibility aspects of biomaterials for hip prosthesis. *AIMS Bioeng*. 2015;3:23–43.
5. Yang T., Xie J., Hu Y. et al. Mid- and long-term effectiveness of total hip arthroplasty with Ribbed femoral stem prosthesis in 354 cases. *Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery*. 2019;33(9):1116–1120. doi: 10.7507/1002-1892.201901124
6. Ershova A.A., Makarenko L.V. Preclinical studies on laboratory animals. *Aktual'nye problemy veterinarnoy meditsiny i biologicheskoy bezopasnosti: materialy nauch.-prakt. konf. = Actual problems of veterinary medicine and biological safety : materials of the scientific and practical conference*. 2024:75–83. (In Russ.)
7. Maslov L.B., Dmitryuk A.Yu., Zhmaylo M.A., Kovalenko A.N. Investigation of the strength of the hip arthroplasty made of polymer material. *Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki = Russian Journal of Biomechanics*. 2022;26(4):19–33. (In Russ.). doi: 10.15593/RZhBiomeh/2022.4.02
8. Ambard D., Swider P. A predictive mechano-biological model of the bone-implant healing. *Eur. J. Mech. A-Solids*. 2006;25:927–937.
9. Kotel'nikov G.P., Kolsanov A.V., Nikolaenko A.N. et al. Biomechanics analysis of the proximal interphalangeal joint after endoprosthesis. *Geniy ortopedii = The genius of orthopedics*. 2023;29(5):468–474. (In Russ.)
10. Günther C., Winner B., Neurath M. F., Stappenbeck T.S. Organoids in gastrointestinal diseases: from experimental models to clinical translation. *Gut*. 2022;71(9):1892–1908. doi: 10.1136/gutjnl-2021-326560

11. Spiridonov A.A., Vasil'ev N.G. *Planirovanie eksperimenta: ucheb. posobie = Experiment planning : textbook*. Sverdlovsk: Sverdlovskoe izd. UPI im. S.M. Kirova, 1975:152. (In Russ.)
12. Mamaeva E.I. (ed.-comp.). *Mashinostroenie: entsiklopediya: v 40 t. T. II-1. Fiziko-mekhanicheskie svoystva. Ispytaniya metallicheskih materialov = Mechanical engineering : encyclopedia : in 40 volumes Vol. II-1. Physical and mechanical properties. Testing of metallic materials*. Moscow: Mashinostroenie, 2010:856. (In Russ.)
13. Lee I., Shiroma E.J., Kamada M. et. al. Association of Step Volume and Intensity With All-Cause Mortality in Older Women. *JAMA Intern Med*. 2019;179(8):1105–1112. doi: 10.1001/jamainternmed.2019.0899
14. Merola M., Affatato S. Materials for hip prostheses: A review of wear and loading considerations (Review). *Materials (Basel)*. 2019;12(3):495. doi: 10.3390/ma12030495
15. Stratton-Powell A.A., Pasko K.M., Brockett C.L., Tipper J.L. The Biologic Response to Polyetheretherketone (PEEK) Wear Particles in Total Joint Replacement: A Systematic Review. *Clin Orthop Relat Res*. 2016;474(11):2394–2404. doi: 10.1007/s11999-016-4976-z

#### ***Информация об авторах / Information about the authors***

**Михаил Анатольевич Ксенофонов**

старший преподаватель кафедры  
травматологии, ортопедии  
и военно-экстремальной медицины,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: maksenofontov@mail.ru

**Mikhail A. Ksenofontov**

Senior lecturer of the sub-department  
of traumatology, orthopedics  
and military extreme medicine,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /  
The author declares no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 17.10.2024**

**Поступила после рецензирования/Revised 12.03.2025**

**Принята к публикации/Accepted 15.03.2025**

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАБОТКИ ШКИВОВ БЕССТУПЕНЧАТОЙ ТРАНСМИССИИ ПРИ СЛОЖНОЙ ТРАЕКТОРИИ ЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА В КОМПЛЕКСЕ ПРОГРАММ ANSYS

А. А. Генералова<sup>1</sup>, А. А. Никулин<sup>2</sup>, Д. С. Бычков<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
<sup>1</sup>generalova\_aa@mail.ru, <sup>2</sup>artem.nikulin2003@yandex.ru, <sup>3</sup>deciptikon@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* На этапе разработки технологического процесса токарной обработки детали важно определить процессы, происходящие в результате воздействия инструмента на заготовку. Величины напряжений, давлений, сил и температурных деформаций, возникаемых в результате воздействия резца, главным образом определяют свойства детали, полученной в результате обработки. Важнейшим шагом на этапе технологической проработки детали является моделирование процесса резания. Компьютерное моделирование позволяет полностью симитировать процесс токарной обработки, учесть параметры вращения заготовки, режимы резания, силу тяжести и инерции заготовки в процессе вращения, вынужденные колебания и автоколебания, а также процесс стружкообразования. Цель исследования – разработка компьютерной модели при сложном пространственном перемещении режущего инструмента, позволяющей исследовать напряженно-деформированное и тепловое состояние процесса резания, условия стружкообразования, прогнозировать параметры качества поверхностного слоя, а также учитывать характеристики заготовки и режущего инструмента с последующей возможностью параметризации процесса. *Материалы и методы.* Теоретические и экспериментальные исследования базируются на геометрической и кинематической основе механики резания. С позиции кинематического подхода рассмотрены параметры режимов резания и сечения срезаемого слоя, координатные плоскости, углы режущего инструмента, а также характеристики деформации и скорости деформации срезаемого слоя. Для компьютерного моделирования использован конечно-элементный пакет Ansys Workbench, задача решалась в трехмерной постановке. Для моделирования пластической деформации и разрушения материала использована модель Джонсона – Кука, позволяющая учесть кинематическое упрочнение и адиабатический разогрев деформируемого материала. В качестве критерия стружкоотделения выбрано критическое значение деформации сдвига в слое, разделяющем заготовку и стружку. *Результаты.* Разработана компьютерная модель сложного перемещения режущего инструмента и разрушений вращающейся заготовки со стружкообразованием. *Выводы.* Полученные результаты компьютерной модели процесса точения и стружкообразования адекватны натурным исследованиям обработки.

**Ключевые слова:** моделирование обработки, численная модель, шкив, стружкообразование, поля напряжений, модель разрушения Джонсона – Кука

**Для цитирования:** Генералова А. А., Никулин А. А., Бычков Д. С. Моделирование обработки шкивов бесступенчатой трансмиссии при сложной траектории лезвийного инструмента в комплексе программ Ansys // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 1. С. 125–137. doi: 10.21685/2227-8486-2025-1-10

## SIMULATING MACHINING OF CONTINUOUSLY VARIABLE TRANSMISSION PULLEYS IN COMPLEX BLADE TOOL TRAJECTORY IN ANSYS SOFTWARE PACKAGE

A.A. Generalova<sup>1</sup>, A.A. Nikulin<sup>2</sup>, D.S. Bychkov<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup>generalova\_aa@mail.ru, <sup>2</sup>artem.nikulin2003@yandex.ru, <sup>3</sup>deceptikon@mail.ru

**Abstract.** *Background.* At the stage of developing the technological process of turning a part, it is important to identify the processes that occur as a result of the impact of the tool on the workpiece. The stresses, pressures, forces and temperature deformations resulting from the action of the cutter mainly determine the properties of the part obtained as a result of processing. The most important step at the stage of technological development of a part is the modeling of the cutting process. Computer modeling allows you to fully simulate the turning process, take into account the parameters of the workpiece rotation, cutting modes, gravity and inertia of the workpiece during rotation, forced vibrations and self-oscillations, as well as the chip formation process. The purpose of the study is to develop a computer model for complex spatial movement of a cutting tool, which makes it possible to study the stress-strain and thermal state of the cutting process, chip formation conditions, predict the quality parameters of the surface layer, and also take into account the characteristics of the workpiece and the cutting tool, with the subsequent possibility of parameterizing the process. *Materials and methods.* The theoretical and experimental studies carried out in the work are based on the basic principles of cutting theory, materials science, and material resistance. The virtual simulation was carried out in the Ansys Workbench software package. *Results.* A computer model of the complex movement of a cutting tool and the destruction of a rotating workpiece with chip formation has been developed. *Conclusions.* The obtained results of the computer model of the turning and chip forming process are adequate to field studies of processing.

**Keywords:** processing modeling, numerical model, pulley, chip formation, stress fields, Johnson – Cook fracture model

**For citation:** Generalova A.A., Nikulin A.A., Bychkov D.S. Simulating machining of continuously variable transmission pulleys in complex blade tool trajectory in Ansys software package. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2025;(1):125–137. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-1-10

### Введение

В настоящее время в автомобилестроении набирают обороты разработка и изготовление бесступенчатых трансмиссий. Основным механизмом в них является вариаторная передача, состоящая из конических шкивов и передаточного звена – ремня [1–4]. Конический шкив представляет собой сложную высоко-технологичную деталь, к качеству обработки которой предъявляются высочайшие требования. При обработке деталей такого типа важно подбирать такую подачу и частоту вращения, чтобы не возникло чрезмерных тепловых деформаций в процессе точения, которые влияют на геометрию будущей детали. Чтобы оценить влияние всех факторов на стружкообразование, необходимо создать параметрическую модель процесса в Ansys Workbench. Операция точения – один из самых распространенных и многофункциональных способов работы лезвийным инструментом. Токарной обработке посвящено большое

количество отечественных и зарубежных работ в области моделирования и исследования технологических операций [5–10]. Объектом исследования в публикуемых работах является модель прямолинейной заготовки или модель кольца, а движение режущего инструмента рассматривается лишь по прямой линии неподвижной заготовки или с прямолинейной подачей для вращающегося кольца.

Ansys – это многоцелевой пакет программ численного моделирования физических процессов и явлений в различных областях. Данный пакет позволяет решать задачи моделирования технологических процессов лезвийных и абразивных инструментов. Ansys позволяет значительно экономить временные ресурсы, материальные затраты на проведение дорогостоящих натурных исследований, а также получать и изучать такие параметры процессов, которые недоступны для прямого измерения: зоны внутренних напряжений и деформаций, тепловые процессы в заготовке и инструменте. Программный комплекс Ansys Workbench позволяет управлять процессами резания и абразивной обработки: гарантировать условия в процессе стружкообразования и обеспечивать характеристики износа инструмента, определять температурно-силовые параметры и характеристики, обеспечивать параметры качества деталей [5].

В программе Ansys Workbench существует ряд модулей для решение целого спектра задач. Самыми распространенными являются Static Structural – он позволяет рассматривать статическое воздействие нагрузки на объект, Modal – анализирует частоты колебаний при взаимодействии объектов, и Exsplicit Dynamics. Для создания модели токарной обработки использовался модуль Exsplicit Dynamics. Этот модуль позволяет детально рассмотреть контактное взаимодействие двух тел из различных материалов и оценить деформацию каждого из них в результате контакта. Структурная схема модели, раскрывающая связь расчетных модулей для моделирования стружкообразования в Ansys Workbench, представлена на рис. 1.

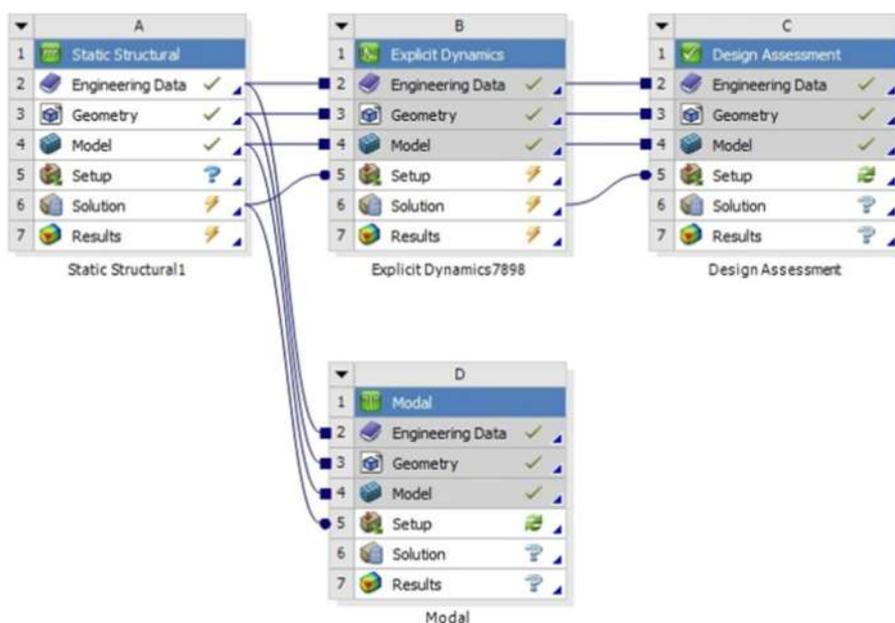


Рис. 1. Структурная схема модели Ansys Workbench

Основополагающим моментом при работе с программным комплексом Ansys Workbench является система координат. Ansys уделяет большое внимание этому аспекту, поскольку системы координат позволяют программе выполнять расчеты в стандартной глобальной декартовой системе координат, при этом предоставляя возможность задавать нагрузки, ограничения, направления материала, информацию о слоях, сечения балок, соединения, значения результатов и множество других важных аспектов модели в уникальных системах координат. В совокупности такой подход избавляет исследователей от необходимости выполнять преобразования систем координат. Во время расчета преобразование выполняется автоматически. Все системы координат обозначаются числом: 0–10 зарезервированы Ansys Mechanical для использования. Исследователи и инженеры могут использовать 11 и выше. По умолчанию в Ansys предусмотрено шесть систем координат: 0 – декартова, 1 – цилиндрическая по оси Z, 2 – сферическая, 4 – декартова, такая же, как 0, 5 – цилиндрическая по оси Y, 6 – цилиндрическая по оси X [11].

### *Материалы и методы*

Компьютерная модель ортогональной обработки плоской поверхности, выполненная в программном комплексе Ansys, представлена на рис. 2. Модель состоит из трех основных элементов: обрабатываемой заготовки, режущего инструмента и удаляемого слоя. В качестве материала заготовки выступает металлический брусок размерами 20×20×100 мм из стали 45. В качестве режущего инструмента выступает резец, передний угол которого равен 45°; задний угол – 60°; материал режущей пластины – твердый сплав T15K6. Подача инструмента продольная, ее численное значение – 0,1 мм. Глубина резания при обработке (вертикальное начальное смещение режущей кромки относительно верхней плоскости заготовки) составляет 1 мм. Модель линейной обработки включает в себя декартову систему координат. В качестве резца и заготовки выступают твердотельные модели. Заготовка зафиксирована от перемещений горизонтальной плоскостью основания. Перемещение резца линейное вдоль оси OX, заданное параметром Displacement. В качестве силового воздействия выступает сила резания, направленная от резца к заготовке вдоль оси OX.

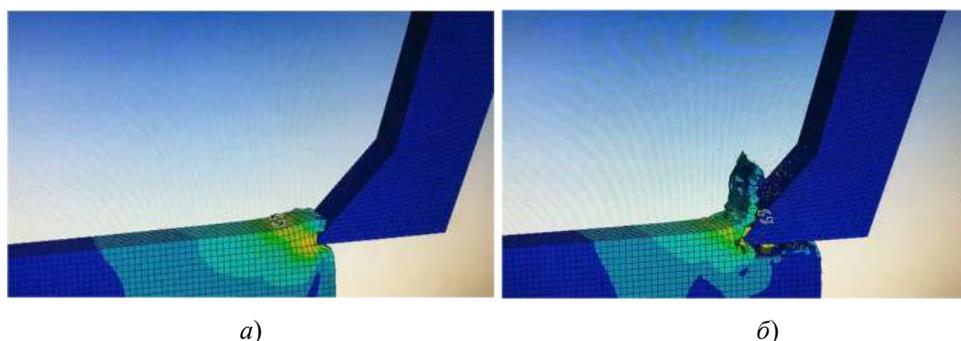


Рис. 2. Поля распределения напряжений по поверхности детали:  
*a* – в момент врезания резца; *б* – в момент отделения стружки

По эпюрам, представленным на рис. 2, можно определить напряжения, возникающие в заготовке в процессе стружкоотделения. В данном исследовании

напряжение проявляется именно в зоне взаимодействия резца с деталью, что является нормой. Если напряжения будут недостаточные, это может привести к пластическим деформациям материала детали и, как следствие, нарушению ее свойств и геометрии, а также к быстрому снижению остроты режущей части резца.

Однако, как отмечено выше, подобные модели исследований характерны для прямолинейного движения режущего инструмента. Токарная обработка широко применяется для вращающихся деталей, т.е. деталь вращается вокруг своей оси и обрабатывается с помощью режущего инструмента, который, как правило, имеет прямолинейное движение.

Обработка конической поверхности шкивов представляет собой сложный процесс, сочетающий вращательное движение заготовки и перемещение режущего инструмента. Так как шкив имеет образующую, то помимо продольной подачи необходимо учитывать также и поперечную подачу. Сложность заключается в перемещении суппорта. В данном случае он перемещается не только вдоль оси вращения заготовки, но и также вдоль радиуса. Комбинируя между собой два направления подачи, возможно получить требуемую образующую конуса, которая будет являться тангенсом угла наклона к оси вращения шкива. Необходимо интерпретировать функции станка для обработки конической поверхности при помощи базовых функций программы Ansys Workbench.

Создание 3D-моделей производится при помощи любых CAD-систем и импортируется в формат IGS для загрузки в дерево расчета модели. В данном случае моделирование токарного резца для обработки шкива вариаторной трансмиссии производилось в программе Kompas 3D. Для оценки процесса стружкообразования были смоделированы резцы с различной геометрией режущей части. Моделирование обработки осуществлялось резцом, показанным на рис. 3. Параметры режущей части выбранного резца составляют: главный угол в плане –  $45^\circ$ , передний угол –  $0^\circ$ , угол наклона главного лезвия –  $0^\circ$ ; радиус при вершине резца – 2 мм.

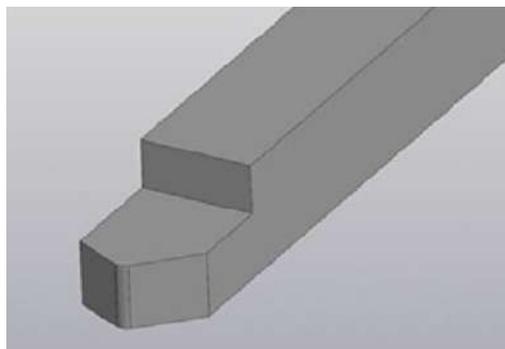


Рис. 3. Результат моделирования режущего инструмента

Перед настройкой расчетного модуля Explicit Dynamics необходимо создать цилиндрическую систему координат во вкладке Coordinate System в дереве расчетов. Это необходимо для того, чтобы при настройке модуля Explicit Dynamics задать в параметре Velocity угловой поворот заготовки относительно неподвижной системы координат, причем положение резца остается в полярной

системе координат, создаваемой Ansys Workbench по умолчанию. Совмещение двух систем координат в расчетной модели осуществляется по оси OZ. Следовательно, ось вращения патрона токарного станка, моделируемая в расчетной модели, проходит через ось OZ двух совмещенных систем координат. При этом связь между декартовыми и цилиндрическими координатами в расчетной модели описывается системой уравнений

$$\begin{cases} x = \rho \cos \varphi, \\ y = \rho \sin \varphi, \\ z = z, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\varphi$  – угол, образованный проекцией радиус-вектора точки на обрабатываемой поверхности детали при вращении заготовки по часовой стрелке. При этом точка проецируется на ось OX с положительным направлением ( $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ );  $\rho$  – радиус заготовки в рассматриваемый момент обработки (минимальное расстояние от оси OZ до рассматриваемой точки на поверхности заготовки):

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{y}{x}, \quad (2)$$

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (3)$$

После создания цилиндрической системы координат в расчетную модель необходимо внести ряд условий и ограничений. Они добавляются посредством выбора в контекстном меню модуля Explicit Dynamics вкладки Insert. При токарной обработке необходимо в первую очередь задать вращение заготовки. Это осуществляется при помощи параметра Velocity. При выборе данной вкладки в контекстном меню появляется ряд параметров. В первой строке выбирается геометрия, а конкретно необходимо выделить тело заготовки, устанавливаемой в токарный патрон. В следующей строке выбирается созданная ранее цилиндрическая система координат. Требуется задать вращение вокруг необходимой оси. Так как ось вращения токарного шпинделя совпадает с осью OZ, напротив данной строки указывается фактическая частота вращения, выраженная в рад/с. Значения осей OX и OY необходимо указать равными нулю, так как шпиндель токарного станка не имеет осевого перемещения. Перемещения заготовки вдоль этих координат осуществляются лишь за счет упругости материала.

В контекстном меню модуля Explicit Dynamics выбирается следующий немаловажный параметр Fixed. Без данного параметра невозможно выполнить расчет, так как при обработке заготовка будет перемещаться вдоль оси вращения шпинделя, не воспринимая силового воздействия от резца, поэтому во вкладке Geometry данного параметра выбирается технологическая база заготовки. Здесь для расчетной модели этой поверхностью выступает внутренняя грань шкива. Токарный патрон центрует заготовку при помощи трех обратных кулачков враспор. Упор заготовки во избежание осевого перемещения осуществляется при помощи торцевого бурта, формируемого при расточке кулачков. После настройки данного параметра в расчетной модели появится еще одно дополнительное ограничение, не позволяющее случайного перемещения заготовки шкива вдоль оси ее вращения.

Параметр Displacement в расчетной модели задает перемещение резца вдоль образующей шкива. Этот параметр предлагается использовать для моделирования обработки сложных конических поверхностей с любым углом наклона образующей. При этом модель токарной обработки идентична технологическому процессу, так как учитываются продольная  $S_x$  и поперечная  $S_y$  подачи инструмента. Для настройки данного параметра указывается перемещение резца относительно осей  $OX$  и  $OY$ , тем самым имитируется продольная и поперечная подачи. Смещение траектории перемещения резца относительно образующей шкива определяет глубину резания. Затем при помощи выбора плоскости обработки задается сила воздействия резца на заготовку. Эта сила должна быть направлена перпендикулярно касательной к конусной поверхности. Моделирование перемещения резца относительно заготовки показано на рис. 4.

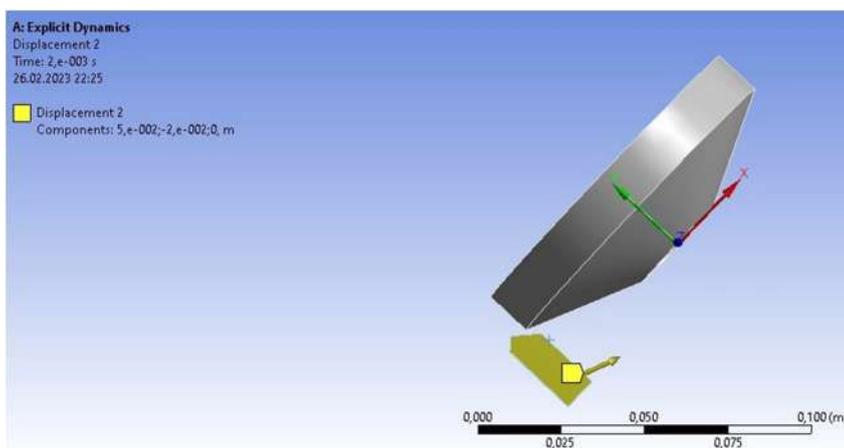


Рис. 4. Моделирование перемещения резца относительно заготовки

После внесенных ограничений указывается численное значение силового воздействия. В контекстном меню расчетного модуля это параметр Force. В данной модели оно проявляется путем воздействия силы резания, передаваемой от резца к заготовке шкива в процессе его вращения. Так как в данной модели выполняется обработка детали сложной геометрической формы, направление воздействия силы резания на заготовку шкива осуществляется перпендикулярно касательной, проведенной через рассматриваемую точку, в которой в данный момент расположен резец, во вкладке Geometry выбирается ось подачи. В данном случае выбирается образующая конической поверхности, она сочетает в себе продольную и поперечную подачи. После этого выбирается точка приложения силы. Она зависит от того, как выполняется обработка. Чаще всего обработка осуществляется от периферии к центру. Необходимо расположить элементы модели в расчетной области. Если обработка шкива начинается с периферии, то резец располагается на расстоянии 10 мм от наружного диаметра шкива, поэтому выбирается крайняя точка образующей, расположенная ближе к периферии заготовки. В строке Force указывается фактическая сила резания. Перед моделированием процесса обработки в Ansys составлена схема для определения указания режимов резания и параметров обработки (рис. 5).

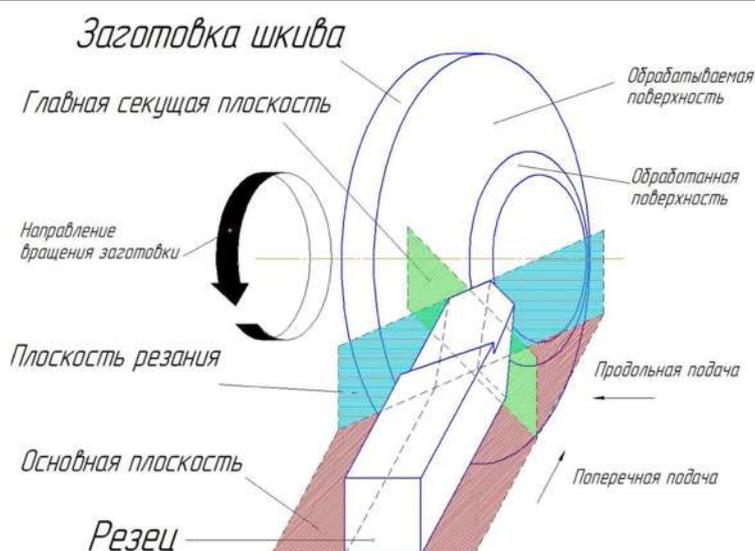


Рис. 5. Схема процесса обработки

Сила резания рассчитывается исходя из величины скорости резания. При этом при помощи поправочных коэффициентов корректируется ее значение, изменяемое за счет различных углов резца. Влияние на геометрию и качество поверхности при обработке шкива определяет радиальная составляющая силы резания  $P_z$ . Ее величина имеет немаловажное значение, так как при этом изменяется угол атаки резца на шкив и от этого зависят параметры стружкоотделения. Скорость резания зависит от подачи инструмента.

Для определения направления радиальной составляющей силы резания и дальнейшего указания вектора ее действия в Ansys составлена модель распределения сил в процессе обработки (рис. 6).

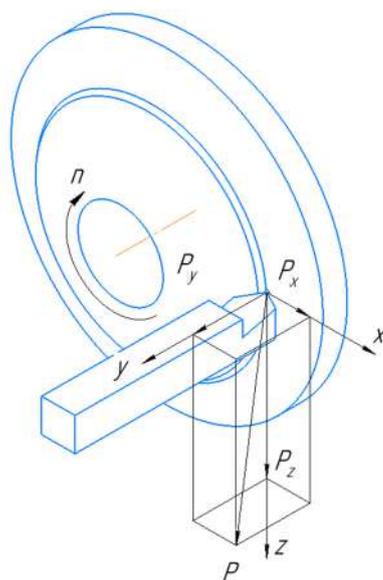


Рис. 6. Модель распределения сил в процессе обработки

Значение силы резания, необходимое для расчетной модели в Ansys Workbench, определяется по формуле

$$P_z = 9,81C_p t^x S^y v^n K_p, \quad (4)$$

где  $v$  – фактическая скорость резания;  $S$  – подача инструмента;  $t$  – глубина резания;  $C_p$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $n$  – коэффициенты резания, учитывающие геометрию и материал резца [12].

Формула (4) учитывает геометрию и материал резца. Для используемого резца из быстрорежущей стали сила резания  $P_z = 1114$  Н. Полученное значение загружается в дерево исследований при помощи поля ввода значений в параметре Force. В качестве объекта приложения силы выбирается коническая поверхность.

Физико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материалов, указываемые во вкладке Engineering Data, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материалов

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль Юнга, Па	Коэффициент Пуассона	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С)	Допускаемые напряжения при срезе, МПа
Сталь 45	7850	$2 \cdot 10^{11}$	0,29	486	85
Сплав T15K6	11700	$126 \cdot 10^{11}$	0,23	225	1100

Для моделирования отделения стружки от обрабатываемой поверхности в качестве критерия разрушения материала использована сопряженная модель Джонсона – Кука, учитывающая влияние трехосности напряжений, скорости деформации и температуры на деформацию до разрушения. Модель разрушения Джонсона – Кука широко применяется из-за простоты формулировки, калибровки и ряда параметров материала, предложенных Джонсоном и Холмквистом [7, 13]. Модель разрешения Джонсона – Кука описывает накопление повреждения каждого элемента на основе кумулятивного закона накопления поврежденности

$$D = \sum \frac{\Delta \bar{\epsilon}}{\epsilon_f}, \quad (5)$$

где  $\Delta \bar{\epsilon}$  – инкремент эффективной пластической деформации во время цикла интегрирования;  $\epsilon_f$  – эквивалентная деформация разрушения [7, 13].

Согласно модели Джонсона – Кука разрушение происходит, если параметр повреждения  $D$  превышает значение единицы  $D \geq 1$ . В законе накопления разрушений (5)  $\Delta \bar{\epsilon}$  представляет собой эквивалентное приращение деформации. Накопленная деформация обновляется при каждом шаге анализа. Эквивалентная деформация разрушения  $\epsilon_f$  определяется как

$$\epsilon_f = \left( D_1 + D_2 \exp \left( D_3 \frac{P}{q} \right) \right) \left( 1 + D_4 \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \left( 1 + D_5 \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right), \quad (6)$$

где  $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5$  – параметры разрушения материала;  $P$  – давление в рассматриваемом конечном элементе;  $q$  – напряжение Мизеса;  $\dot{\epsilon}$  – скорость пластической деформации;  $\dot{\epsilon}_0$  – скорость деформации при статических испытаниях;  $T_0$  и  $T_m$  – температура окружающей среды и температура плавления материала соответственно;  $T$  – текущая температура [7, 13].

Приложение Ansys Workbench содержит модель Джонсона – Кука и позволяет моделировать сложное поведение материала при динамическом нагружении. Параметры материала  $D_1, D_2, D_3$  характеризуют отношение гидростатического давления (или среднего напряжения к эквивалентному напряжению Мизеса); параметр  $D_4$  учитывает влияние скорости деформации на разрушение; параметр  $D_5$  определяет влияние температуры на деформацию при разрушении (табл. 2).

Таблица 2

Параметры модели Джонсона – Кука для стали 45, характеризующие условия разрушения

$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$
0,04	1,03	1,39	0,002	0,46

### Результаты и обсуждение

После запуска расчетного модуля получена модель лезвийной обработки со стружкообразованием. Для визуализации напряжений, возникающих в процессе, на тело заготовки нанесена графическая эпюра. На рис. 7,а представлена модель процесса токарной обработки детали с глубиной резания  $t = 0,8$  мм. На рис. 7,б представлена модель процесса токарной обработки детали с глубиной резания  $t = 1,5$  мм.

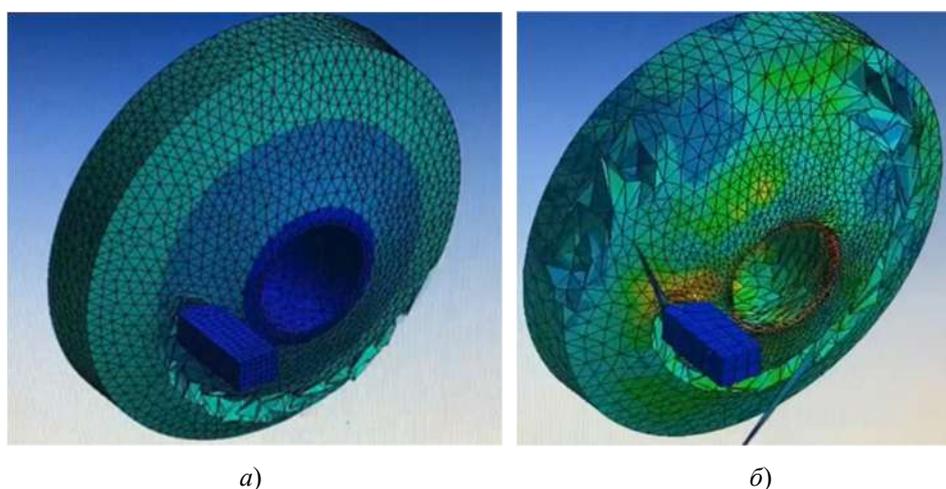


Рис. 7. Модель процесса токарной обработки детали:  
а – с глубиной резания  $t = 0,8$  мм; б – с глубиной резания  $t = 1,5$  мм

По результатам графического анализа эпюр моделей токарной обработки можно сделать вывод, что при обработке с глубиной резания  $t = 1,5$  мм

наблюдается неравномерное отхождение стружки с поверхности заготовки и повышенное напряжение вне области резания. Такое поле напряжений может привести к перегреву заготовки и короблению (см. рис. 7,б). При обработке с глубиной резания 0,8 мм наблюдается равномерное стружкообразование. Следовательно, для повышения качества обработки требуется применять глубину резания не более 0,8 мм и увеличить число проходов инструмента. Максимальное напряжение при срезе для стали 45 соответствует  $\tau = 85$  МПа. Фактическое значение напряжений среза при моделировании процесса токарной обработки шкива с глубиной резания  $t = 0,8$  мм согласно эпюрам Ansys Workbench составило  $\tau = 96$  МПа, что выше в 1,13 раза по сравнению с максимальным напряжением при срезе для данного материала. При моделировании процесса токарной обработки детали с глубиной резания  $t = 1,5$  мм значение напряжений составляет  $\tau = 190$  МПа, что выше в 2,12 раза по сравнению с максимальным напряжением при срезе для данного материала. Напряжения, возникающие при обработке, превосходят  $\tau = 85$  МПа, следовательно, процесс обработки будет проходить эффективно, без образования наклепа металла заготовки, стружкообразование равномерное.

### *Заключение*

Значение эквивалентной деформации позволяет судить о степени сдвиговой деформации шкивов при пластической деформации металла заготовки в результате силового воздействия, передаваемого от резца. Полученные в модели значения напряжений и температуры в зоне резания использованы для расчета эквивалентной деформации.

Полученная компьютерная модель взаимодействия резца с заготовкой при сложном пространственном перемещении режущего инструмента дает визуальное представление о характере деформации и удалении поверхностного слоя материала. Напряжения, полученные в данной модели при срезе металла с заготовки при глубине резания  $t = 0,8$  мм и  $t = 1,5$  мм, выше в 1,13 и 2,12 раза соответственно, чем максимальные напряжения среза для стали 45. Полученные значения соответствуют реальным условиям обработки деталей и говорят об эффективности металлообработки и стружкообразовании.

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что предлагаемая компьютерная модель лезвийной обработки со сложным перемещением режущего инструмента адекватна. Визуализация процесса резания и полей напряжений показала хорошее качественное и количественное совпадение результатов моделирования и расчетов.

### *Список литературы*

1. Generalova A., Zverovshchikov A., Nikulin A. Surface undulation parameters of continuously variable transmission friction during turning // Journal of King Saud University – Engineering Sciences. 2022. doi: 10.1016/j.jksues.2022.06.001
2. Генералова А. А., Зверовщиков А. Е., Никулин А. А. Исследование влияния микропрофиля фрикционных элементов вариатора на коэффициент трения в зоне контакта и коэффициент полезного действия передачи // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 3. С. 154–172. doi: 10.21685/2072-3059-2023-3-12

3. Yamazaki M., Kato Y., Nakahara T., Ichihashi T. Research on Improvement of Transmission Efficiency by Improving Friction Coefficient Between Elements and Pulleys of a Belt CVT // *Review of automotive engineering*. 2008. Vol. 29. P. 485–492.
4. Yagyaev E., Shron L., Meniuk D. Increasing the operational reliability of car variators due to creating regular surface microrelief by laser ablation // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020. Vol. 889. P. 012007.
5. Mamalis A., Horváth M., Branis A. S., Manolakos D. Finite element simulation of chip formation in orthogonal metal cutting // *Journal of Materials Processing Technology*. 2001. Vol. 110. P. 19–27. doi: 10.1016/S0924-0136(00)00861-X
6. Belhadi S., Mabrouki T., Rigal J.-F., Boulanouar L. Experimental and numerical study of chip formation during straight turning of hardened AISI 4340 steel // *Journal of Engineering Manufacture*. 2005. Vol. 219. P. 515–524. doi: 10.1243/095440505X32445
7. Кхалифа М., Дуюн Т. А. Моделирование процесса резания конструкционной стали с использованием конечноэлементного пакета ANSYSWorkbench // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*. 2019. № 11. С. 121–127. doi: 10.34031/2071-7318-2019-4-11-121-127
8. Maekawa K., Kubo A., Kitagawa T. Simulation analysis of cutting mechanism in plasma hot machining of high manganese steels // *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering*. 1988. Vol. 22. P. 183–189.
9. Öpöz T., Chen X. Chip formation mechanism using finite element simulation // *Journal of Mechanical Engineering*. 2016. № 1. P. 11.
10. Murugesan M., Jung D. W. Johnson Cook material and failure model parameters estimation of AISI-1045 medium carbon steel for metal forming application // *Journal of materials*. 2019. № 1. P. 18.
11. Молоков К. А., Дабалез М. Применение Mechanical APDL при расчетах сварных конструкций в курсовом проектировании : учеб.-метод. пособие / Политехнический институт ДВФУ. Владивосток : Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2023. 76 с.
12. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов. М. : Машиностроение, 1975. 244 с.
13. Johnson G., Holmquist T. Test data and computational strength and fracture model constants for 23 materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures / Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM. 1989. Report No. LA-11463-MS.

### *References*

1. Generalova A., Zverovshchikov A., Nikulin A. Surface undulation parameters of continuously variable transmission friction during turning. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. 2022. doi: 10.1016/j.jksues.2022.06.001
2. Generalova A.A., Zverovshchikov A.E., Nikulin A.A. Investigation of the effect of the microprofile of the friction elements of a variator on the coefficient of friction in the contact zone and the transmission efficiency. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of higher educational institutions. The Volga region. Technical sciences*. 2023;(3):154–172. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-3-12
3. Yamazaki M., Kato Y., Nakahara T., Ichihashi T. Research on Improvement of Transmission Efficiency by Improving Friction Coefficient Between Elements and Pulleys of a Belt CVT. *Review of automotive engineering*. 2008;29:485–492.
4. Yagyaev E., Shron L., Meniuk D. Increasing the operational reliability of car variators due to creating regular surface microrelief by laser ablation. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020;889:012007.
5. Mamalis A., Horváth M., Branis A.S., Manolakos D. Finite element simulation of chip formation in orthogonal metal cutting. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001;110:19–27. doi: 10.1016/S0924-0136(00)00861-X
6. Belhadi S., Mabrouki T., Rigal J.-F., Boulanouar L. Experimental and numerical study of chip formation during straight turning of hardened AISI 4340 steel. *Journal of Engineering Manufacture*. 2005;219:515–524. doi: 10.1243/095440505X32445

7. Kkhalifa M., Duyun T.A. Modeling of the cutting process of structural steel using the ANSYSWorkbench finite element package. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova = Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2019;(11):121–127. (In Russ.). doi: 10.34031/2071-7318-2019-4-11-121-127
8. Maekawa K., Kubo A., Kitagawa T. Simulation analysis of cutting mechanism in plasma hot machining of high manganese steels. *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering*. 1988;22:183–189.
9. Öpöz T., Chen X. Chip formation mechanism using finite element simulation. *Journal of Mechanical Engineering*. 2016;(1):11.
10. Murugesan M., Jung D.W. Johnson Cook material and failure model parameters estimation of AISI-1045 medium carbon steel for metal forming application. *Journal of materials*. 2019;(1):18.
11. Molokov K.A., Dabalez M. *Primenenie Mechanical APDL pri raschetakh svarnykh konstruksiy v kursovom proektirovanii: ucheb.-metod. posobie = Application of Mechanical APDL in calculations of welded structures in course design : educational and methodical manual*. Vladivostok: Izd-vo Dal'nevost. federal. un-ta, 2023:76. (In Russ.)
12. Bobrov V.F. *Osnovy teorii rezaniya metallov = Fundamentals of the theory of metal cutting*. Moscow: Mashinostroenie, 1975:244. (In Russ.)
13. Johnson G., Holmquist T. *Test data and computational strength and fracture model constants for 23 materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures* / Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM. 1989. Report No. LA-11463-MS.

#### **Информация об авторах / Information about the authors**

**Александра Александровна Генералова**  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры математического  
обеспечения и применения ЭВМ,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: generalova\_aa@mail.ru

**Aleksandra A. Generalova**  
Candidate of technical sciences,  
associate professor, associate professor  
of the sub-department of mathematical  
support and computer application,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Артем Анатольевич Никулин**  
инженер-исследователь,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: artem.nikulin2003@yandex.ru

**Artem A. Nikulin**  
Research engineer,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Дмитрий Сергеевич Бычков**  
инженер-исследователь,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: deciptikon@mail.ru

**Dmitriy S. Bychkov**  
Research engineer,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 10.01.2025**

**Поступила после рецензирования/Revised 26.02.2025**

**Принята к публикации/Accepted 15.03.2025**

## ОЦЕНКА ВРЕМЕННЫХ И СТОИМОСТНЫХ РИСКОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОЕКТНЫХ ЗАДАНИЙ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Н. Д. Печалин<sup>1</sup>, А. Г. Финогеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт  
имени академика А. И. Берга, Москва, Россия

<sup>2</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> npechalin@vk.com, <sup>2</sup> alexeyfinoogeev@gmail.com

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Рассматриваются вопросы разработки моделей и метода оценки временных и стоимостных рисков производства продукции предприятий оборонно-промышленного комплекса. Целью является создание моделей и алгоритма предиктивного анализа рисков при составлении календарного плана-графика выполнения проектных заданий для поддержки принятия решений руководителями предприятий оборонно-промышленного комплекса. *Материалы и методы.* В ходе исследований разработаны модели расчета и анализа рисков срыва сроков поставок и изменения стоимости электронной компонентной базы изделий. *Результаты.* Важным результатом является алгоритм вероятностной оценки рисков отклонения поставки электронных компонент от запланированных сроков при производстве изделий. Алгоритм анализа рисков решает задачи оценки временных и стоимостных параметров проектного задания на соответствие прогнозным величинам на ранней стадии производственного цикла. Результаты анализа применяются в процессе принятия решений, что позволяет компенсировать факторы неопределенности до начала выполнения проектных работ и повышает эффективность управления производственными проектами. *Выводы.* Внедрение модели и метода прогностической оценки рисков на основе анализа имеющейся статистики на предприятии позволяет использовать полученные результаты для анализа других параметров проектного задания, например параметров надежности изделий и показателей качества. Модели и алгоритм анализа рисков предназначены для руководящего персонала предприятия и в настоящее время используются при составлении календарного плана-графика кооперационных процессов в ходе выполнения производственных заданий по выпуску изделий оборонно-промышленного комплекса.

**Ключевые слова:** предиктивный анализ, риски, управление проектами, срок поставок, стоимость компонентной базы, вероятность отклонений, план-график

**Финансирование:** исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 20-71-10087).

**Для цитирования:** Печалин Н. Д., Финогеев А. Г. Оценка временных и стоимостных рисков выполнения проектных заданий на предприятиях оборонно-промышленного комплекса // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 1. С. 138–148. doi: 10.21685/2227-8486-2025-1-11

## ALGORITHM FOR ASSESSING TIME AND COST RISKS AT ENTERPRISES OF THE MILITARY-INDUSTRIAL COMPLEX

N.D. Pechalin<sup>1</sup>, A.G. Finogeev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Central Scientific Research Radio Engineering Institute  
named after Academician A.I. Berg, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup>npechalin@vk.com, <sup>2</sup>alexeyfinogeev@gmail.com

**Abstract.** *Background.* The article considers the development of models and a method for assessing the time and cost risks of manufacturing products at defense industry enterprises. The objective is to create models and an algorithm for predictive risk analysis when drawing up a calendar schedule for the implementation of project tasks to support decision-making by managers of defense industry enterprises. *Materials and methods.* In the course of the research, models were developed for calculating and analyzing the risks of delays in delivery and changes in the cost of the electronic component base of products. *Results.* An important result is an algorithm for probabilistic assessment of the risks of deviations in the delivery of electronic components from the planned dates during product manufacturing. The risk analysis algorithm solves the problems of assessing the time and cost parameters of the project task for compliance with the predicted values at an early stage of the production cycle. The analysis results are used in the decision-making process, which allows compensating for uncertainty factors before the start of design work and increases the efficiency of production project management. *Conclusions.* Implementation of the model and method for predictive risk assessment based on the analysis of available statistics at the enterprise allows using the obtained results to analyze other parameters of the project task, for example, product reliability parameters and quality indicators. The models and algorithm for risk analysis are intended for the management personnel of the enterprise and are currently used in drawing up a calendar schedule of cooperation processes during the implementation of production tasks for the release of products of the defense industry complex.

**Keywords:** predictive analysis, risks, project management, delivery time, component base cost, probability of deviations, schedule

**Financing:** the research was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project № 20-71-10087).

**For citation:** Pechalin N.D., Finogeev A.G. Algorithm for assessing time and cost risks at enterprises of the military-industrial complex. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2025;(1):138–148. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-1-11

### **Введение**

Оборонно-промышленный комплекс (ОПК) представляет из себя специализированную высокотехнологичную отрасль производства. Он объединяет множество различных предприятий, организаций и научно-исследовательских институтов. Предприятия классифицируются по научной, производственной или испытательной направленности. Важнейшей научно-производственной деятельностью является обеспечение обороноспособности страны и национальной безопасности, что включает разработку, производство и сервисное обслуживание военной и специальной техники. Государство здесь выступает основным заказчиком в отличие от обычных производственных предприятий и научных центров. Основным видом производственной загрузки предприятий

ОПК является государственный оборонный заказ (ГОЗ), выполнение которого является обязательным [1]. В настоящее время объем ГОЗ значительно вырос в ответ на внешние вызовы для страны, что является сложной проблемой для предприятий ОПК, так как требует роста производства в сжатые сроки [2]. Для ее решения предприятиям приходится увеличивать штат работников, закупать новое оборудование или модернизировать старое, расширять производственные площади. Важнейшим государственным требованием к ОПК является строгое выполнение сроков изготовления продукции при условии достижения импортонезависимости.

Рассматриваются вопросы создания моделей и алгоритма предиктивного анализа рисков, возникающих на начальных этапах разработки календарного плана-графика выполнения проектных заданий, что особенно важно для поддержки принятия решений руководителями предприятий и представляет собой основную цель исследований. Для достижения цели минимизации данных рисков решаются задачи разработки моделей прогностической оценки временных и стоимостных рисков в процессе производства продукции на предприятиях оборонно-промышленного комплекса [3]. Примером таких рисков являются вероятностные риски срыва сроков поставок и изменения стоимости элементов электронной компонентной базы (ЭКБ). Предиктивный анализ рисков на ранней стадии производственного цикла позволяет компенсировать факторы неопределенности до начала выполнения проектного задания, что повышает эффективность управления проектами [4].

### *Материалы и методы*

Традиционно при анализе процессов управления проектами больше внимания уделяется не оценке рисков, что является промежуточным действием, а разработке плана по снижению вероятности их возникновения [5]. В частности, управление проектом на ранних стадиях требует от руководителей оперативно воздействовать на проблемные ситуации, что приводит к позитивным изменениям для достижения поставленных конечных целей. Одним из важнейших показателей эффективности проектного управления является соблюдение сроков выполнения проектных заданий, что часто зависит от грамотных действий лица, принимавшего решения (ЛПР), по минимизации рисков срыва данного показателя [6].

В настоящее время в производстве внедряются новые инновации в рамках концепции Индустрии 4.0, связанные с технологиями искусственного интеллекта, робототехники, новыми материалами и экологическими стандартами [7]. Предприятия и отрасли, которые не имеют программ внедрения новых технологий, проигрывают в конкуренции производствам с программами инновационного развития, что ведет к падению продаж продукции, потери доли ГОЗ и к банкротству [8]. Государства с инновационной программой развития внедряют новые технологии, которые позволяют решить глобальные проблемы в экономике. Например, внедрение роботизированных технологий существенно снижает зависимость от недостатка квалифицированных кадров. Развитие искусственного интеллекта показывает, что такие инновационные технологии имеют широкий спрос на промышленных предприятиях и в целом при управлении любыми организационными системами [9]. Основной причиной здесь становится постоянное усложнение продукции, что требует резкого увеличения кооперационных связей в условиях адаптации к внешним и внутренним

факторам влияния [10]. Учет множества внешних и внутренних факторов риска на ранних стадиях является основной целью планирования проектных заданий, их этапов и отдельных стадий. Одной из проблем планирования является невозможность учесть все возможные факторы риска в ограниченный временной интервал, который дается на подготовку плана выпуска изделий. Неопределенность некоторых факторов риска и сложность их купирования требуют новых решений и инструментов для поддержки принятия решений. Одним из таких инструментов является разработка новых моделей и алгоритма предиктивного анализа и вероятностной оценки риск-факторов. В данном случае под риск-фактором понимается событие, которое может оказать существенное влияние на достижение целей проекта на различных этапах, что часто связано с прогнозируемым изменением его временных и стоимостных параметров. Следует отметить, что риск-факторы несут в себе неопределенность [11] и могут иметь как внутренний, так и внешний характер (рис. 1).

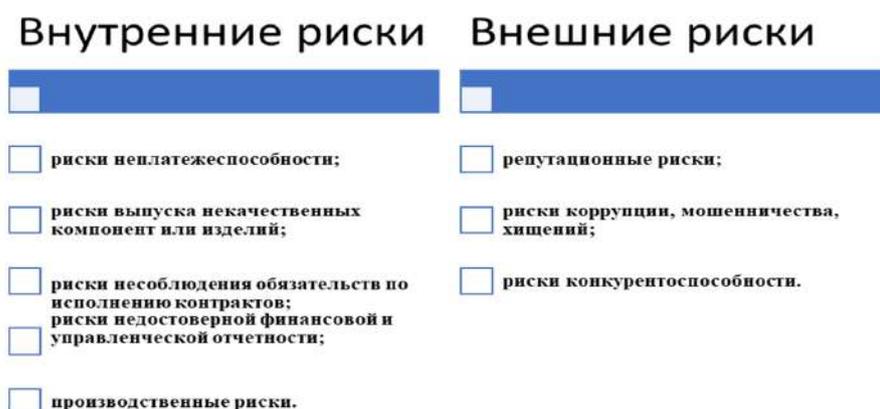


Рис. 1. Примеры внутренних и внешних рисков

В нашем случае наиболее важными риск-факторами являются цена поставки ЭКБ и срок поступления компонент. Большое значение здесь имеет взаимодействие между участниками кооперационных взаимодействий в условиях множества ограничений. Основным принципом производственной кооперации является разделение подцелей проекта между участниками взаимодействия при головном исполнителе, который отвечает за подготовку финального результата проекта. Запланированное достижение подцелей каждым участником производственной кооперации оказывает положительное влияние на ход выполнения всего проектного задания, а отсутствие выполнения запланированной подцели в срок даже одним из участников ведет к срыву сроков ГОЗ, удорожанию всего проекта и появлению репутационных издержек для головного исполнителя. Чем больше предприятий завязаны в кооперацию по изготовлению и поставкам составных частей конечного продукта, тем больше проблемы в задержке поставок составных частей влияют на всю производственную цепочку. Предлагаются модель и алгоритм предиктивного анализа стоимостных и временных рисков на базе накопленной статистики на предприятии по срокам поставки и стоимости ЭКБ для ранее выполненных кооперационных проектов.

Результаты предиктивного анализа и расчета вероятностных оценок временных и стоимостных рисков позволяют определить возможные отклонения

по срокам поставки и стоимостям на примере единиц ЭКБ для участников кооперации с целью прогноза вероятности срыва срока и стоимости изготовления всего изделия. Это поможет оценить риски и определить возможности и механизмы реагирования для принятия управленческих решений на ранних стадиях производственного цикла.

Для оценки рисков перед расчетами следует определить характер и закономерности распределения случайных факторов, которые могут оказывать влияние на вероятности возникновения критических событий, чтобы оценить степень влияния каждого фактора, выполнить их ранжирование для определения наиболее существенных из них. Для решения задачи в исследовании первоначально была принята гипотеза о том, что все факторы являются случайными, слабо зависят друг от друга и ни один из них не является определяющим.

Анализ процессов производства электронных компонент у проверенных участников производственной кооперации, а также существующих транспортных и логистических кооперационных взаимодействий показал, что в большинстве случаев сроки и стоимостные характеристики поставляемой продукции не зависят от деятельности партнеров по кооперации. Для подтверждения гипотезы о наличии или отсутствии доминирующих факторов влияния методом многофакторного дисперсионного анализа была выполнена оценка чувствительности результативных показателей. В приведенном примере в качестве результативных показателей выбраны срок поставки и стоимость поставляемых компонент. В основе метода лежит анализ отклонений единиц исследуемой совокупности от среднего арифметического. Метрикой отклонений является дисперсия. В ходе решения задачи определяются отклонения, которые вызваны воздействием фактора, которые сравниваются с отклонениями, вызванными воздействием случайных факторов. В результате отбираются те, влияние которых на результативные показатели более существенно, чем влияние случайных факторов, либо делается вывод об отсутствии таких факторов, что является нулевой гипотезой. В результате исследования факторов влияния была рассчитана вероятность получения наблюдаемых различий при условии справедливости нулевой гипотезы, которая получилась равной 0,13, что почти в 3 раза превышает уровень значимости, равный 0,05. Таким образом, подтверждено отсутствие доминирующих факторов влияния со стороны поставщиков ЭКБ.

Случайный характер факторов влияния, слабая зависимость временных и стоимостных показателей от операционной деятельности разных участников кооперативного взаимодействия и отсутствие доминирующего фактора влияния позволяют сделать вывод о том, что согласно предельной теореме теории вероятности распределение случайных величин подчиняется нормальному закону распределения:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

где  $a$  – математическое ожидание;  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение.

Следующим этапом необходимо определить вероятностную оценку риска того, что непрерывная случайная величина  $X$  примет значение, принадлежащее интервалу  $(\alpha, \beta)$ , и будет равна интегралу от плотности распределения, взятому в соответствующих пределах:

$$P(\alpha < X < \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} f(x) dx . \quad (2)$$

Вероятность риска, что дискретная случайная величина  $X$  при нормальном распределении примет значение, принадлежащее интервалу  $(a, b)$ , таким образом, равна

$$P(a < X < b) = \Phi\left(\frac{\beta - \alpha}{D(X)}\right) - \Phi\left(\frac{\alpha - \alpha}{D(X)}\right), \quad (3)$$

где  $\Phi(x)$  – функция Лапласа;  $\frac{\alpha - \alpha}{D(X)}$  – нижний предел;  $\frac{\beta - \alpha}{D(X)}$  – верхний предел;

$D(X)$  – среднее квадратичное отклонение.

Среднее квадратичное отклонение случайной величины  $X$  определяется как

$$D(X) = \sum_{i=1}^n (x_i - \alpha)^2 P_i . \quad (4)$$

Для определения математического ожидания используется формула

$$\alpha = \sum_{i=1}^n x_i p_i . \quad (5)$$

Обобщенная блок-схема алгоритма оценки рисков приведена на рис. 2.

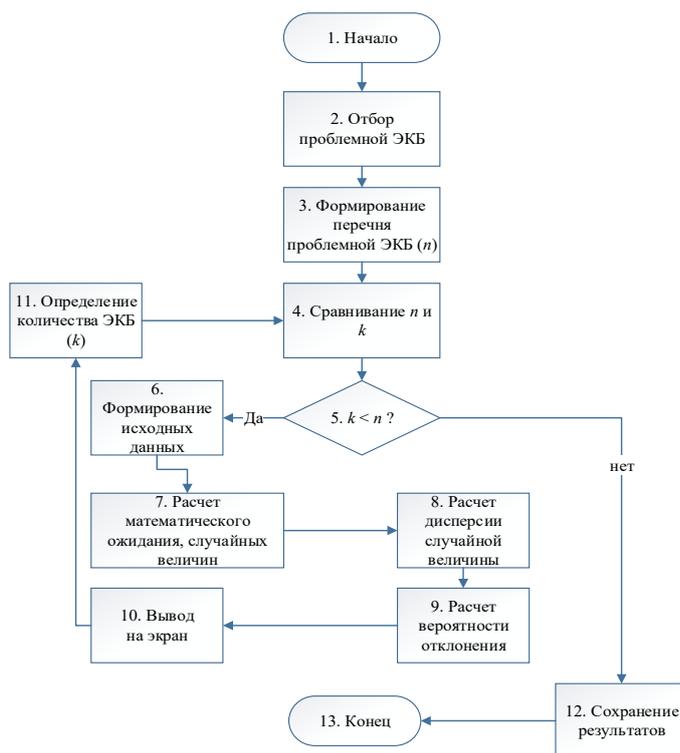


Рис. 2. Обобщенная блок-схема алгоритма оценки рисков

### Результаты

Рассмотрим оценку рисков на примере проектных заданий по производству радиоэлектронных изделий. Для определения рисков в качестве исходных данных используются статистические данные по временным и стоимостным параметрам, имеющимся на предприятии, примеры которых собраны в процессе завершенных проектов (табл. 1).

Таблица 1

Общие исходные данные по ЭКБ

ЭКБ 1		ЭКБ 2		ЭКБ 3		ЭКБ 4		ЭКБ 5	
стоимость	время в неделях								
1545	20	11 434	12	10 981	16	42 070	25	1896	14
1730	20	11 434	26	10 981	25	37 563	20	2124	16
3102	15	12 806	18	12 299	11	37 563	27	1896	29
1990	33	11 434	33	14 144	26	48 381	33	2442	31
3102	22	14 727	33	22 051	24	75 428	23	3808	27
2579	24	24 864	18	22 360	5	65 750	16	4246	17
1769	15	19 683	16	24 525	18	39 275	22	2690	20
2416	11	15 486	11	17 188	24	42 322	11	3478	14
1573	16	14 601	16	13 207	8	29 910	30	2998	13
1600	12	12 728	12	14 601	12	64 444	17	3201	23
1837	16	12 925	19	11 611	14	46 897	16	3598	19

На основании статистик о поставках по ранее выполненным договорам на первом этапе необходимо построить законы распределения случайных величин, определить математическое ожидание, дисперсию и вероятность попадания в необходимый интервал. Анализ договорных обязательств и фактических поставок со стороны партнеров в процессе кооперативных взаимодействий показал, что временные и стоимостные параметры микросхем в основном формируются под влиянием слабо зависимых случайных факторов, причем ни один из факторов не является доминирующим. Согласно предложенному алгоритму рассчитываем математическое ожидание, среднее квадратичное отклонение, дисперсию, вероятность попадания в заданный интервал и определяем вероятность риска отклонения временных и стоимостных параметров для каждой из электронных компонент (табл. 2).

Таблица 2

Пример оценки риска отклонения от сроков поставки для ЭКБ

Вид ЭКБ	Время в неделях	Мат. ожидание	Дисперсия	Средне-квадратичное отклонение	Вероятность попадания	Риск отклонения от сроков поставки
ЭКБ 1	20	18	37	6	0,77	0,23
ЭКБ 2	12	19	56	8	0,83	0,17
ЭКБ 3	16	16	43	7	0,89	0,11
ЭКБ 4	25	22	40	6	0,93	0,07
ЭКБ 5	14	20	41	6	0,82	0,18

Из приведенных расчетов видно, что существует реальная вероятность отклонения поставок ЭКБ от заданного срока согласно договорным обязательствам. Это позволяет на начальном этапе проекта внести изменения с наименьшими издержками. Аналогично рассчитываются риски отклонения стоимости поставляемых компонент (табл. 3).

Таблица 3

Риски изменения стоимости компонент изделия

Вид ЭКБ	Риски изменения стоимости
ЭКБ 1	0,19
ЭКБ 2	0,21
ЭКБ 3	0,19
ЭКБ 4	0,13
ЭКБ 5	0,14

### *Заключение*

В процессе исследований разработана универсальная методика определения вероятности риска отклонения поставки компонент от запланированных сроков на примере ряда компонент. Эта методика позволяет на ранней стадии производственного цикла выполнить прогностическую оценку временных и стоимостных параметров проектного задания, чтобы на начальных этапах принять решения по минимизации соответствующих рисков. Это позволяет компенсировать факторы неопределенности до начала выпуска готовой продукции, что повышает эффективность проектного управления. Методика предиктивного анализа предназначена для руководящего персонала предприятия и в настоящее время используется при составлении календарного плана-графика кооперационных процессов в ходе выполнения производственных заданий по выпуску изделий ОПК. Результаты внедрения алгоритма и моделей дают возможность распространить разработанный подход для прогностической оценки различных параметров проектных заданий, например параметров качества и надежности изделий.

### *Список литературы*

1. Чернышева Г. Н., Рогов Н. В., Ткачева М. В. Подходы к обеспечению надежности выполнения гособоронзаказа // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Экономика и управление. 2021. № 3. С. 94–108. doi: 10.17308/ekon.2021.3/3621
2. Милушенко О. А. Анализ перспектив развития рынка оборонной промышленности России в современных условиях // Экономика, предпринимательство и право. 2023. Т. 13, № 11. С. 5035–5044. doi: 10.18334/epp.13.11.119879. URL: <https://1economic.ru/lib/119879> (дата обращения: 25.03.2025).
3. Попова Л. Ф., Бочарова С. В. Формирование модели управления рисками на предприятиях ОПК // Экономическая безопасность и качество. 2018. № 2 (31). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-modeli-upravleniya-riskami-na-predpriyatiyah-opk> (дата обращения: 25.03.2025).

4. Кудрявцев А. С. Управление рисками на предприятии оборонно-промышленного комплекса // Вестник науки. 2024. № 5, т. 3. С. 146–150. URL: <https://www.vestnik-nauki.pf/article/14527> (дата обращения: 25.03.2025).
5. Luthfiansyah F., Prasetyo A., Raharjo, T. A Systematic Review of Risk Management Tools and Techniques in Software Projects // Indonesian Journal of Computer Science. 2024. Vol. 13, № 1. doi: 10.33022/ijcs.v13i1.3694
6. Ahmed A., Kayis B., Amornsawadwatana S. A review of techniques for risk management in projects // Benchmarking: An International Journal. 2007. Vol. 14, № 1. P. 22–36. doi: 10.1108/14635770710730919
7. Vuksanović D., Vešić J., Korčok D. Industry 4.0: the Future Concepts and New Visions of Factory of the Future Development // Sinteza. 2016. P. 293–298. doi: 10.15308/Sinteza-2016-293-298
8. Золотарев А. В., Золотарев В. В. Конкуренция и конкурентоспособность в сфере оборонно-промышленного комплекса в современных экономических условиях // Вопросы управления. 2020. № 2 (63). С. 111–120. doi: 10.22394/2304-3369-2020-2-111-120. URL: <https://www.litres.ru/book/raznoe/voprosy-upravleniya-2-63-2020-63097586/> (дата обращения: 09.02.2025).
9. Peres R., Jia X., Lee J. [et al.]. Industrial Artificial Intelligence in Industry 4.0 – Systematic Review, Challenges and Outlook // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 220121–220139. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3042874
10. Савич Ю. А., Чернышева Г. Н., Ивашина Т. Б. Влияние цифровой трансформации, санкционного, постковидного кризисов и деглобализации на организацию государственного оборонного заказа // РЕГИОН: системы, экономика, управление. 2023. № 1 (60). С. 77–84. doi: 10.22394/1997-4469-2023-60-1-77-84. URL: <http://rseu.vrn.ranepa.ru/jfiles/25072023/19.pdf> (дата обращения: 09.02.2025).
11. Макаров В. М., Круляк П. Метод управления рисками невыполнения в срок проектов создания крупных энергетических объектов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2021. № 1. С. 109–121. doi: 10.18721/JE.14109. URL: <https://economy.spbstu.ru/article/2021.87.09/> (дата обращения: 09.02.2025).

### *References*

1. Chernysheva G.N., Rogov N.V., Tkacheva M.V. Approaches to ensuring the reliability of the state defense order. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika i upravlenie = Bulletin of Voronezh State University. Series: Economics and Management*. 2021;(3):94–108. (In Russ.). doi: 10.17308/econ.2021.3/3621
2. Milyushenko O.A. Analysis of the prospects for the development of the Russian defense industry market in modern conditions. *Ekonomika, predprinimatel'stvo i parvo = Economics, entrepreneurship and law*. 2023;13(11):5035–5044. (In Russ.). doi: 10.18334/epp.13.11.119879 Available at: <https://1economic.ru/lib/119879> (accessed 25.03.2025).
3. Popova L.F., Bocharova S.V. Formation of a risk management model at defense industry enterprises. *Ekonomicheskaya bezopasnost' i kachestvo = Economic security and quality*. 2018;(2). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-modeli-upravleniya-riskami-na-predpriyatiyah-opk> (accessed 25.03.2025).
4. Kudryavtsev A.S. Risk management at the enterprise of the military-industrial complex. *Vestnik nauki = Bulletin of Science*. 2024;3(5):146–150. (In Russ.). Available at: <https://www.vestnik-nauki.rf/article/14527> (accessed 25.03.2025).

5. Luthfiansyah F., Prasetyo A., Raharjo, T. A Systematic Review of Risk Management Tools and Techniques in Software Projects. *Indonesian Journal of Computer Science*. 2024;13(1). doi: 10.33022/ijcs.v13i1.3694
6. Ahmed A., Kayis B., Amornsawadwatana S. A review of techniques for risk management in projects. *Benchmarking: An International Journal*. 2007;14(1):22–36. doi: 10.1108/14635770710730919
7. Vuksanović D., Vešić J., Korčok D. Industry 4.0: the Future Concepts and New Visions of Factory of the Future Development. *Sinteza*. 2016:293–298. doi: 10.15308/Sinteza-2016-293-298
8. Zolotarev A.V., Zolotarev V.V. Competition and competitiveness in the field of the military-industrial complex in modern economic conditions. *Voprosy upravleniya = Management issues*. 2020;(2):111–120. (In Russ.). doi: 10.22394/2304-3369-2020-2-111-120 Available at: <https://www.litres.ru/book/raznoe/voprosy-upravleniya-2-63-2020-63097586/> (accessed 09.02.2025).
9. Peres R., Jia X., Lee J. et al. Industrial Artificial Intelligence in Industry 4.0 – Systematic Review, Challenges and Outlook. *IEEE Access*. 2020;8:220121–220139. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3042874
10. Savich Yu.A., Chernysheva G.N., Ivashinina T.B. The impact of digital transformation, sanctions, post-covid crises and deglobalization on the organization of the state defense order. *REGION: sistemy, ekonomika, upravlenie = REGION: systems, economics, management*. 2023;(1):77–84. (In Russ.). doi: 10.22394/1997-4469-2023-60-1-77-84 Available at: <http://rseu.vrn.ranepa.ru/jfiles/25072023/19.pdf> (accessed 09.02.2025).
11. Makarov V.M., Krulyas P. Risk management method for non-fulfillment of projects for the creation of large energy facilities on time. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Ekonomicheskie nauki = Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State Polytechnic University. Economic sciences*. 2021;(1):109–121. (In Russ.). doi: 10.18721/JE.14109 Available at: <https://economy.spbstu.ru/article/2021.87.09/> (accessed 09.02.2025).

#### **Информация об авторах / Information about the authors**

**Николай Дмитриевич Печалин**  
аспирант,  
начальник корпоративного отдела,  
Центральный научно-исследовательский  
радиотехнический институт  
имени академика А. И. Берга  
(Россия, г. Москва,  
ул. Новая Басманная, 20, стр. 9)  
E-mail: npechalin@vk.com

**Nikolay D. Pechalin**  
Postgraduate student,  
head of the corporate department,  
Central Scientific Research  
Radio Engineering Institute  
named after Academician A.I. Berg  
(9 build., 20 Novaya Basmannaya street,  
Moscow, Russia)

**Алексей Германович Финогеев**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры систем  
автоматизированного проектирования,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: alexeyfinogeev@gmail.com

**Aleksey G. Finogeev**  
Doctor of technical sciences, professor,  
professor of the sub-department  
of computer-aided design systems,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 28.01.2025**

**Поступила после рецензирования/Revised 04.03.2025**

**Принята к публикации/Accepted 15.03.2025**