

# I ЛИПАНОВСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ

Материалы региональной научной конференции  
«Высокопроизводительные вычисления, визуальные технологии  
и математическое моделирование сопряженных задач  
механики сплошных сред»

(Ижевск, 15–16 июня 2021 г.)

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Ижевский государственный технический университет  
имени М. Т. Калашникова»  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Удмуртский федеральный исследовательский центр  
Уральского отделения Российской академии наук»

# I ЛИПАНОВСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ

Материалы региональной научной конференции  
«Высокопроизводительные вычисления, визуальные технологии  
и математическое моделирование сопряженных задач  
механики сплошных сред»

(Ижевск, 15–16 июня 2021 г.)



Издательство УИР ИжГТУ  
имени М. Т. Калашникова  
Ижевск 2021

УДК 001.89:378+531/534:519.6+519.711.3(06)

П26

Ответственные редакторы:

*И. Г. Русяк*, зав. кафедрой «ПМиИТ» ИжГТУ имени М. Т. Калашникова,  
академик РАН, д-р техн. наук, проф.;

*С. А. Королев*, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры «ПМиИТ»  
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

Оргкомитет конференции

*А. М. Липанов* – председатель оргкомитета, д-р техн. наук, проф., академик РАН, академик РАН, гл. науч. сотрудник ИПМ им. М. В. Келдыша, проф. ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*М. Ю. Альес* – зам. председателя, д-р физ.-мат. наук, проф., директор Удмуртского федерального исследовательского центра УрО РАН;

*А. Н. Копысов* – зам. председателя, канд. техн. наук, доц., проректор по научной и инновационной деятельности ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*В. Б. Дементьев* – д-р техн. наук, проф., чл.-корр. РАН, руководитель Института механики УдмФИЦ УрО РАН;

*В. В. Соболев* – д-р физ.-мат. наук, проф., декан ф-та математики и естественных наук ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*И. Г. Русяк* – д-р техн. наук, проф., академик РАН, зав. кафедрой «ПМиИТ» ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*С. А. Королев* – секретарь конференции, д-р техн. наук, проф. кафедры «ПМиИТ»

Программный комитет

А. А. Айзикович, С. В. Бузилов, А. В. Вахрушев, К. И. Дизендорф, О. В. Жуйкова, А. И. Карпов, К. В. Кетова, М. А. Корепанов, Е. А. Наймушина, М. А. Плетнев, С. А. Рябая, С. Г. Селетков, В. Г. Суфиянов, В. А. Тенев, Г. М. Тихонов, Ю. К. Шелковников, Ю. А. Шихов

**П26 I Липановские научные чтения** : материалы региональной научной конференции «Высокопроизводительные вычисления, визуальные технологии и математическое моделирование сопряженных задач механики сплошных сред» (Ижевск, 15–16 июня 2021 г.). – Ижевск : Изд-во УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2021. – 13,1 МБ. – 297 с. – Текст электронный.

ISBN 978-5-7526-0947-3

В сборнике представлены материалы докладов, включенных в программу региональной научной конференции, посвященной достижениям научной школы академика РАН и РАН Алексея Матвеевича Липанова в ИжГТУ имени М. Т. Калашникова («I Липановские научные чтения»). Тематика охватывает широкий спектр проблем научных и технических исследований, проводимых в рамках данной школы, а также другие смежные вопросы преподавания в высшей школе.

Предназначен для научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов.

УДК 001.89:378+531/534:519.6+519.711.3(06)

ISBN 978-5-7526-0947-3

© ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2021  
© Оформление. Издательство УИР ИжГТУ  
имени М. Т. Калашникова, 2021

## Академик Алексей Матвеевич Липанов



Алексей Матвеевич Липанов – выдающийся ученый и организатор науки, академик РАН, академик РАН, лауреат Государственной премии СССР и премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, получивший признание в широких кругах отечественной и зарубежной научной общественности за крупный вклад в развитие исследований внутрикамерных процессов в установках на твердом топливе, теории гидромеханики турбулентных процессов, физики твердого тела и механики вязких ньютоновских и неньютоновских жидкостей. Он является основоположником современной внутренней баллистики систем на твердом топливе, одним из создателей отечественных межконтинентальных твердотопливных ракет наземного и морского базирования. А. М. Липанов – автор и соавтор более 800 научных работ, 16 монографий и учебников, 65 изобретений и патентов, им подготовлено более 80 докторов и кандидатов наук.

Окончив в 1959 году с отличием Томский университет по специальности «баллистика» с квалификацией «математик-механик», был распределен в НИИ-125 – Научно-исследовательский химико-технологический институт (г. Дзержинский, Московской обл.), ныне ФГУП «Федеральный центр двойных технологий «Союз», где работал вначале инженером, затем начальником отдела и начальником вычислительного центра.

В 1965 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук, в 1970 году защитил докторскую диссертацию, посвященную решению двух проблем: обоснованию применимости одномерной газодинамической модели при исследовании внутрикамерных процессов и моделированию случайных полей скорости горения заряда по его объему. В 1975 ему присвоено ученое звание «профессор» по специальности «Механика жидкости, газа и плазмы».



С 1975 по 1983 год – ректор Ижевского механического института, ныне ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова».

В 1983 году А. М. Липанов назначают заместителем министра высшего и среднего специального образования РСФСР по науке.

В 1987 году его избрали членом-корреспондентом АН СССР.

В 1988 году по приглашению академика Г. А. Месяца он уехал в Ижевск в качестве уполномоченного по созданию Удмуртского научного центра УрО АН СССР. В марте 1991 года был создан Институт прикладной механики УрО АН СССР, а декабре 1991 года был создан Удмуртский научный центр УрО АН СССР.

За цикл работ в области исследования турбулентных потоков теоретическими средствами (прямое численное моделирование уравнений Навье – Стокса, с использованием высокоточных разностных методов) А. М. Липанов в 2000 году был удостоен звания академика РАН.

С 2013 года работает главным научным сотрудником Института прикладной математики РАН имени М. В. Келдыша (г. Москва) и по совместительству профессором ИжГТУ имени М. Т. Калашникова.

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Пленарное заседание</i> .....	9
<i>Русяк И. Г.</i> Научная школа баллистики академика Липанова А. М. в ИжГТУ имени М. Т. Калашникова.....	9
<i>Липанов А. М., Русяк И. Г., Суфиянов В. Г., Королев С. А.</i> Результаты, состояние и перспективы исследований в области стрелково- пушечного вооружения.....	13
<i>Дементьев В. Б., Липанов А. М.</i> Повышение надежности и эксплуатационных характеристик изделий машиностроения.....	29
<i>Карсканов С. А., Липанов А. М.</i> Прямое численное моделирование турбулентных течений.....	34
<i>Быков Н. В.</i> Математическое моделирование и баллистическое проектирование газодинамических ствольных ускорителей тел .....	40
<b>Секция 1. Математическое моделирование сопряженных задач механики сплошных сред</b> .....	46
<i>Басов И. В., Хуссин С. М., Суфиянов В. Г.</i> Разработка и реализация математической модели движения гексакоптера и системы пространственной визуализации результатов вычислительного эксперимента .....	46
<i>Виссарионова Е. К.</i> Исследование влияния геометрического облика ракеты на характеристики активного участка полета .....	54
<i>Илюхин С. Н., Ананьев В. И.</i> Программно-математическое обеспечение для автоматизации процедуры определения лобового сопротивления в баллистическом эксперименте.....	60
<i>Корепанова Д. А.</i> Внутренняя баллистика гладкоствольных орудий .....	66
<i>Королев С. А., Мансуров Р. Р.</i> Исследование дальности стрельбы активно-реактивным снарядом.....	71
<i>Королев С. А., Микрюков Д. В.</i> Разработка и реализация алгоритма решения обратной задачи внешней баллистики при стрельбе с подвижного носителя .....	78
<i>Макаров С. С., Липанов А. М.</i> Численное моделирование сопряженного теплообмена при охлаждении высокотемпературной металлической заготовки потоком газожидкостной среды.....	84
<i>Прокопович Е. А., Хмельников Е. А., Заводова Т. Е.</i> Испытание боеприпасов на пожаростойкость электронагревательной печью.....	91

<i>Рязанов Д. А., Ильин С. С., Хмельников Е. А., Заводова Т. Е., Смагин К. В., Семашко М. Ю.</i>	
Прочностной расчет ведущего устройства снаряда уменьшенной радиозаметности к системе «НОНА-С», выполненного из композитных материалов.....	98
<i>Соловьев Л. С.</i>	
Управление ракеты-носителя с помощью вдув газа в сверхзвуковую часть сопла ....	103
<i>Суфиянов В. Г., Клюкин Д. А.</i>	
Разработка программы для расчета продольно-поперечных колебаний ствола артиллерийского орудия.....	106
<i>Титова А. В., Макаров С. С.</i>	
Численное моделирование сопряженного теплообмена при ламинарном режиме течения нефтяного флюида в скважине .....	112
<i>Хазияхметов Р. Т.</i>	
Сравнительная характеристика методов преобуславливания .....	115
<i>Червакова А. В., Костюшин К. В.</i>	
Исследование влияния формы сопла на структуру струи и зону смешивания .....	122
<i>Шадрин И. Д., Юдинцев Д. В.</i>	
Современные способы моделирования работы гусеничного движителя.....	126
<i>Шаклеин А. А., Карпов А. И., Морар Г.</i>	
Двухстадийная модель газофазного горения для численного исследования распространения пламени по поверхности полимерных материалов .....	132
<b>Секция 2. Теория управления и математическое моделирование .....</b>	<b>134</b>
<i>Аверкиев И. К., Бакиева О. Р.</i>	
Изменение длины химической связи структуры Ti <sub>2</sub> AlC (MAX-фаза) в результате термического воздействия.....	134
<i>Бендер С. А., Горбов Г. В.</i>	
Программная реализация нейросетевых алгоритмов для переноса художественных стилей в изображениях .....	137
<i>Вавилова Д. Д.</i>	
Анализ и прогноз динамики показателей социально-экономического развития региона на основе нейросетевого моделирования .....	144
<i>Ватолкин М. Ю.</i>	
О представлении квадратур одного квазидифференциального уравнения в виде сумм рядов .....	151
<i>Виссарионова Е. К.</i>	
Анализ критических ситуаций в процессе пуска тяжелых ракет.....	155
<i>Дорофеева С. Р.</i>	
Статистические построения для реализации модели человеческого капитала по совокупности состояния здоровья, образования, культуры .....	161
<i>Игонина Е. И.</i>	
Применение машинного обучения для кластеризации регионов России по здоровью населения и экологии.....	169

<i>Касаткина Е. В.</i> Продуктовая аналитика работы многофункционального центра предоставления государственных и муниципальных услуг .....	176
<i>Кудрина М. А., Нефедов Д. Г.</i> Математическое и компьютерное моделирование транспортных потоков .....	183
<i>Майков Д. В.</i> Моделирование и оптимизация режимов метаногенеза при переработке отходов животноводства .....	189
<i>Насридинов Т. Д.</i> Математическое и компьютерное моделирование системы «Умный дом» .....	197
<i>Никитина Ю. А.</i> Моделирование процессов в системе здравоохранения (на примере Российской Федерации) .....	205
<i>Первощикова Д. А.</i> Математическое моделирование зависимости рождаемости и смертности от уровня потребления (на примере Российской Федерации) .....	212
<i>Попов П. С.</i> Применение информационных технологий в прогнозировании энергопотребления в объектах гражданского строительства .....	220
<i>Раимова Д. Ю.</i> Применение машинного обучения для кластеризации регионов России по социально-экономическому положению .....	226
<i>Седов Р. А., Суфиянов В. Г.</i> Выявление иерархических структур на цифровых изображениях с использованием нейронной сети глубокого обучения .....	233
<i>Третьякова Я. И.</i> Экономико-математическое моделирование динамики численности, рождаемости и смертности (на примере Удмуртской Республики) .....	239
<i>Шишова А. В.</i> Технический анализ финансовых рынков с помощью рыночных индикаторов на примере акций компании Нонор .....	246
<i>Щекалева А. А.</i> Анализ статистической информации по показателям численности населения, рождаемости и смертности (на примере Российской Федерации) .....	253
<b>Секция 3. Информационные технологии в педагогике, истории, философии</b> .....	<b>259</b>
<i>Айзикович А. А., Бородин С. А., Рычина Н. А.</i> К вопросу моделирования процесса подготовки специалиста .....	259
<i>Бушмакина Т. В.</i> Особенности использования мультимедиа технологий в образовательном процессе .....	266

<i>Васильева И. В., Корепанова А. В.</i> Психологические барьеры в учебной деятельности слабоуспевающих студентов технического вуза.....	271
<i>Искандерова А. Б.</i> Разработка элементов электронного курса на основе таксономической модели математических компетенций студентов бакалавриата технического вуза.....	276
<i>Кетова К. В., Кузьмин М. С., Корепанова А. В., Васильева И. В.</i> Практика применения дистанционных технологий обучения при возникновении непредвиденных ситуаций .....	282
<i>Шевнина П. С.</i> Особенности дистанционного обучения студентов СПО на примере специаль- ности 09.02.05 Прикладная информатика (по отраслям) .....	288
Сведения об авторах .....	292

## ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

УДК 623.5

### **Научная школа баллистики академика А. М. Липанова в ИжГТУ имени М. Т. Калашникова**

*И. Г. Русяк*

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова

Алексей Матвеевич Липанов, можно сказать, по распределению Министерства высшего и среднего специального образования РСФСР в 1975 году был направлен в Ижевский механический институт, ныне ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова», работать ректором. В Ижевском механическом институте им было создано отдельное конструкторское технологическое бюро при машиностроительном факультете, ряд отраслевых и проблемных лабораторий, институт стал активно оснащаться самой передовой на тот момент вычислительной техникой.

Как он вспоминает сам: «Мне было 40 лет, когда меня направили на работу в Удмуртию. Мы результативно работали, дружно. Создали тогда первый в Удмуртии диссертационный совет. Сначала, в 1976 году, он был кандидатский, а в 1979-м появился и докторский. В этом нам большую помощь оказал Михаил Тимофеевич Калашников. Я считаю, мы тем самым сделали очень большое дело для подготовки научных кадров высшей квалификации непосредственно здесь в Удмуртии».

Именно в Удмуртии, в ИМИ сформировалась и получила развитие научная школа А. М. Липанова. Им были приглашены на работу многие молодые амбициозные ученые, такие как В. К. Булгаков, Ю. Ф. Кисаров из НИИ-125; Ю. К. Шелковников, И. Г. Русяк из Томского университета; В. И. Кодолов из Екатеринбурга. Все это дало мощный толчок расширению научных связей, развитию научных исследований и ускорило подготовку научных кадров в ИМИ.

Именно в этот период в школе академика А. М. Липанова впервые в нашей стране начали решать сопряженные пространственные нестационарные задачи газовой динамики, горения и напряженно-деформированного состояния заряда (И. Г. Русяк, С. Н. Храмов, А. В. Вахрушев, М. Ю. Альес и др.), про-

странственные задачи воспламенения и течения в соплах (А. В. Алиев, Ю. Ф. Кисаров, Б. Я. Бендерский и др.).

Ижевский период был одним из наиболее продуктивных в жизни А. М. Липанова. За цикл научных работ этого периода он был в 1987 году избран членом-корреспондентом Академии наук СССР.

Многое из того, что тогда удалось сделать на посту ректора, послужило фундаментом преобразования в дальнейшем Ижевского механического института в Ижевский государственный технический университет.

В 1983 году А. М. Липанова назначают заместителем министра высшего и среднего специального образования РСФСР по науке. С его участием создавались экономические условия в вузах, позволяющие привлечь средства для оснащения приборами и оборудованием производства, конструкторские бюро и заводы при ВУЗах.

В 1988 году он опять возвращается в Удмуртию. По поручению академика Г. А. Месяца – председателя Уральского отделения Академии наук, создается Институт прикладной механики (ныне Институт механики) и Удмуртский научный центр. В составе центра образованы ряд филиалов и отделов, являющихся подразделениями институтов Уральского отделения Академии наук. Параллельно он занимается еще одним очень важным для оборонной науки делом: воссозданием Российской академии ракетно-артиллерийских наук. Соответствующий указ Президента РФ № 661 был подписан 5 апреля 1994 года. А. М. Липанов становится одним из ее первых академиков. Постановлением Правительства РФ № 715 от 17 июля 1995 года РАН приравнена к отраслевым академиям Российской Федерации.

Как руководитель Удмуртского научного центра, А. М. Липанов пользовался неограниченным авторитетом в научных кругах республики. Проводил активную научную и организационную деятельность. Руководил Институтом механики УрО РАН, был председателем президиума Удмуртского научного центра Уральского отделения РАН, председателем Уральско-Волжского отделения Совета по горению РАН, членом международного Союза пиротехников (США), почетным членом индийского Клуба пиротехников, членом экспертного совета ВАК России по математике и механике. Являлся главным редактором журнала «Химическая физика и мезоскопия», членом редколлегии ряда журналов: «Физика горения и взрыва», «Теплофизика и аэромеханика», «Вычислительная механика сплошных сред», *Eurasian physical technical journal*.

В этот период в сферу его научных интересов входят прикладные и фундаментальные научные проблемы. Под руководством А. М. Липанова развиты новые научные направления в области исследования проблем гидродинамики и аэродинамики, в том числе исследования ламинарных и турбулентных потоков, физико-химии и механики наноразмерных систем и наноструктур.

Им, совместно с учениками (Ю. Ф. Кисаров и И. Г. Ключников), впервые в мире создан метод исследования турбулентных потоков теоретическими средствами (прямое численное моделирование уравнений Навье – Стокса с использованием высокоточных разностных методов). Такой подход и разработанный метод позволял без дорогостоящих натуральных испытаний и без использова-



ния аэродинамических труб оптимально подойти к проблеме проектирования летательных, наземных и различных подводных аппаратов, сократить сроки создания новых образцов вооружения и военной техники. За этот цикл работ А. М. Липанов в 2000 году был удостоен звания академика РАН.

В 2013 году академик А. М. Липанов перешел на работу в Институт прикладной математики РАН имени М. В. Келдыша (г. Москва) и по совместительству на должность профессора в ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. По-прежнему руководит грантами, научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими проектами, выполняемыми в стенах ИжГТУ имени М. Т. Калашникова.

В стенах ИМИ – ИжГТУ имени М. Т. Калашникова им подготовлена целая плеяда докторов наук: В. К. Булгаков (д-р физ.-мат. наук, 1985 г.), В. И. Кодолов (д-р хим. наук, 1987 г.), И. Г. Русяк (д-р техн. наук, 1988 г.), А. В. Алиев (д-р физ.-мат. наук, 1991 г.), М. Ю. Альес (д-р физ.-мат. наук, 1996 г.), Ю. Ф. Кисаров (д-р физ.-мат. наук, 1997 г.), Ю. К. Шелковников (д-р техн. наук, 1998 г.), И. Г. Ключников (д-р физ.-мат. наук, 1998 г.), В. В. Тарасов (д-р техн. наук, 1999 г.), В. Н. Диденко (д-р техн. наук, 1999 г.), А. В. Вахрушев (д-р физ.-мат. наук, 2002 г.), А. И. Карпов (д-р физ.-мат. наук, 2003 г.), В. Г. Петров (д-р хим. наук, 2006 г.), М. А. Корепанов (д-р техн. наук, 2009 г.), Е. Ю. Шелковников (д-р техн. наук, 2009 г.), В. В. Тринеева (д-р техн. наук, 2016 г.), В. Г. Суфиянов (д-р техн. наук, 2017 г.), С. С. Макаров (д-р техн. наук, 2019 г.), С. А. Королев (д-р техн. наук, 2020 г.).

Под руководством академика А. М. Липанова в ИжГТУ имени М. Т. Калашникова развиваются следующие направления в области баллистики:

1. Исследование внутрикамерных процессов в твердотопливных ракетных двигателях и артиллерийских установках, включая течение многофазных гетерогенных реагирующих сред и напряженно-деформированное состояние элементов заряда, конструктивных элементов двигателя, снаряда и артиллерийских установок.

2. Исследование аэродинамики и устойчивости движения летательных аппаратов, запускаемых со стационарных установок и подвижных носителей.

3. Моделирование поля поражения, зон безопасности и взаимодействия снарядов с преградами.

4. Разработка алгоритмов управления стрельбой.

5. Автоматизированные системы обслуживания полигонных испытаний, проектирования боеприпаса и обработки экспериментальной информации.

6. Разработка специализированного программного обеспечения, предназначенного для решения комплекса задач проектирования и отработки стрелково-пушечного вооружения с применением визуальных технологий.

7. Создание цифровых компьютерных двойников образцов артиллерийского вооружения.

В ИжГТУ имени М. Т. Калашникова есть все необходимые предпосылки и возможности для создания ижевского научного центра «Цифровое моделирование и разработка систем вооружения» Российской академии ракетных и артиллерийских наук при ИжГТУ имени М. Т. Калашникова.

Целью деятельности такого научного центра является **создание математического аппарата и прикладного программного обеспечения**, разработка и внедрение технологий суперкомпьютерных испытаний в стратегической для Удмуртской Республики отрасли – проектирование и производство систем вооружения.

Отсюда вытекают основные задачи научного центра:

1. Разработка специализированного вычислительного модуля цифрового инженерного моделирования для решения комплекса задач проектирования систем вооружения с использованием интеллектуальных сред и визуальных технологий виртуальной реальности, включающего разработку АРМ-конструктора систем вооружения с элементами искусственного интеллекта.

2. Разработка методологии создания базы данных цифровых двойников систем вооружения.

3. Разработка методологии цифрового испытательного полигона и АРМ-проектировщика полигонных испытаний систем вооружения.

4. Обеспечение интеграции академической, вузовской и отраслевой науки региона с целью развития и укрепления фундаментальных научных исследований по приоритетным направлениям разработки и совершенствования вооружения и военной техники.

5. Развитие и координация исследований, содействующих использованию достижений военно-промышленного комплекса в интересах сохранения и развития наукоемких отраслей и развития экономики региона в целом.

6. Подготовка инженерных и научных кадров для оборонно-промышленного комплекса региона.

В конечном итоге, деятельности такого научного центра могла бы способствовать координация и осуществление в регионе фундаментальных и прикладных исследований и разработок по важнейшим проблемным направлениям создания, совершенствования и применения вооружения и военной техники, объединение ведущих ученых и разработчиков систем вооружения для рационального использования, сохранения и укрепления научного, технического, кадрового потенциала организаций оборонных отраслей промышленности и учебных заведений, работающих в военной области.

## **Результаты, состояние и перспективы исследований в области стрелково-пушечного вооружения\***

*А. М. Липанов*<sup>1,2</sup>, *И. Г. Русяк*<sup>2</sup>, *В. Г. Суфиянов*<sup>2</sup>, *С. А. Королев*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН,

<sup>2</sup> Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*Представлена методология проектирования и отработки стрелково-пушечного вооружения на основе имитационного моделирования. Комплексная физико-математическая модель артиллерийского выстрела, описывающая процессы внутренней, внешней и конечной баллистики, реализована в виде программного комплекса, предназначенного для анализа, оптимизации, принятия управленческих решений на основе обработки информации по результатам моделирования процесса артиллерийского выстрела. Разработанное математическое и программное обеспечение позволяет решать задачи автоматизации процессов проектирования стрелково-пушечного вооружения.*

**Ключевые слова:** артиллерийский выстрел, внутренняя баллистика, внешняя баллистика, конечная баллистика, математическое моделирование, проектирование, программно-вычислительный комплекс, вычислительный эксперимент, полигонные испытания, визуализация.

В ИжГТУ имени М. Т. Калашникова под руководством академика РАН А. М. Липанова разрабатывается программно-вычислительный комплекс, предназначенный для математического моделирования процесса артиллерийского выстрела. Физико-математическая модель артиллерийского выстрела включает процессы внутренней, внешней и конечной баллистики. В состав программно-вычислительного комплекса входит модуль конфигурации и визуализации, используемый для отображения цифровой модели полигона, результатов моделирования процесса артиллерийского выстрела и функционирования измерительно-регистрирующих устройств при проведении полигонных испытаний.

Целью проекта является повышение информативности и производительности научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ на стадии проектирования и отработки боеприпаса и артиллерийских установок за счет применения объектно ориентированных стандартизированных вычислительных методик инженерного моделирования процессов, протекающих при срабатывании артиллерийского выстрела.

### **Комплексный подход к решению проблемы проектирования**

Процесс проектирования образцов стрелково-пушечного вооружения в интерактивном режиме проходит ряд последовательно-параллельных стадий

---

© Липанов А. М., Русяк И. Г., Суфиянов В. Г., Королев С. А., 2021

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-01-00072.

(рис. 1), которые, в свою очередь, содержат определенный набор задач. Более подробно состав задач различных стадий проектирования представлен на рис. 2, 3 [1].

### Разработка виртуальных моделей

Концептуальная схема преобразования реальных физических объектов и процессов полигонных испытаний в виртуальные объекты моделирования представлена на рис. 4.

Виртуальная система полигонных испытаний (см. рис. 4) содержит геометрические модели объектов полигонных испытаний и математические модели процессов артиллерийского выстрела, а также расчетные блоки и блок визуализации. Взаимосвязь между процессами проектирования, моделирования и визуализации полигонных испытаний артиллерийских систем представлена на рис. 5.

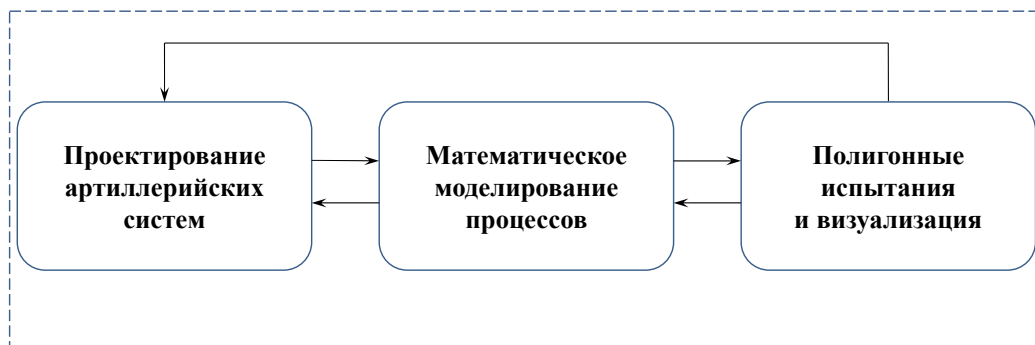


Рис. 1. Взаимосвязь стадий проектирования, моделирования и проведения полигонных испытаний артиллерийских систем

Внутренняя баллистика	Внешняя баллистика	Конечная баллистика
1. Воспламенение и горение пороховых элементов. 2. Движение смеси твердой фазы и пороховых газов в канале ствола при выстреле. 3. Теплообмен газов с пороховыми элементами и со стволом орудия. 4. Прочность и деформации ствола. 5. Прочность, деформации и устойчивость снаряда; 6. Прочность и разрушение пороховых элементов при выстреле. 5. Истечение газов после выстрела. Период последствия. 6. Дульный тормоз. 7. Откат ствола.	1. Аэродинамика обтекания снаряда (ракеты). 2. Аэродинамические силы и моменты сил. 3. Оптимизация аэродинамической формы. 4. Траектория снаряда (ракеты). 5. Аэродинамическая и гироскопическая стабилизация. 6. Асимметрия формы и массы снаряда. 7. Оптимизация баллистических условий. 8. Обратная задача внешней баллистики. 9. Характеристики рассеивания. 10. Зоны безопасности. 11. Стрельба с подвижного носителя. 12. Таблицы стрельбы.	1. Кинетическое действие: - ударное динамическое взаимодействие снаряда с преградой; - упругие, вязкие, пластические деформации. 2. Осколочное действие: - разрушение снаряда в результате детонации; - разлет осколков; - форма области поражения. 3. Фугасное действие: - разлет продуктов детонации; - ударная волна. 4. Кумулятивное действие: - ударное динамическое взаимодействие - гидродинамика; - пластические деформации.

Рис. 2. Состав задач математического моделирования при проектировании артиллерийских систем

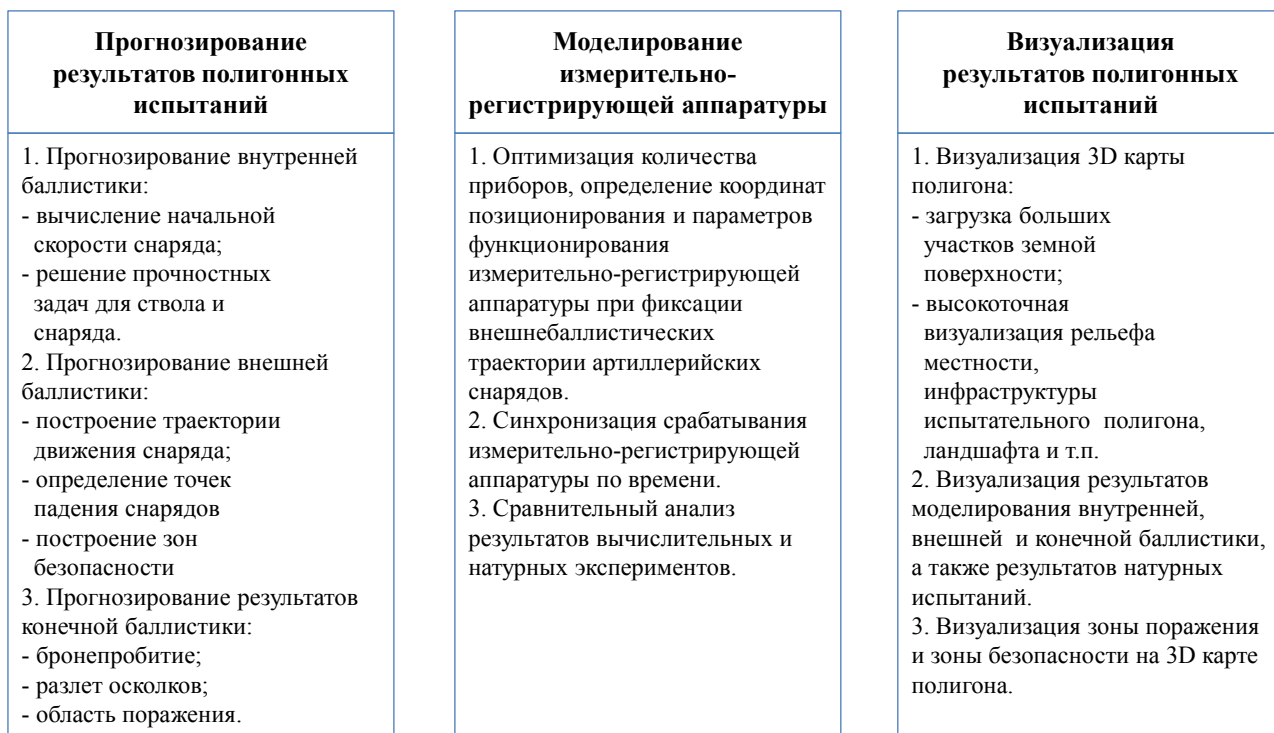


Рис. 3. Состав задач моделирования и визуализации полигонных испытаний артиллерийских систем

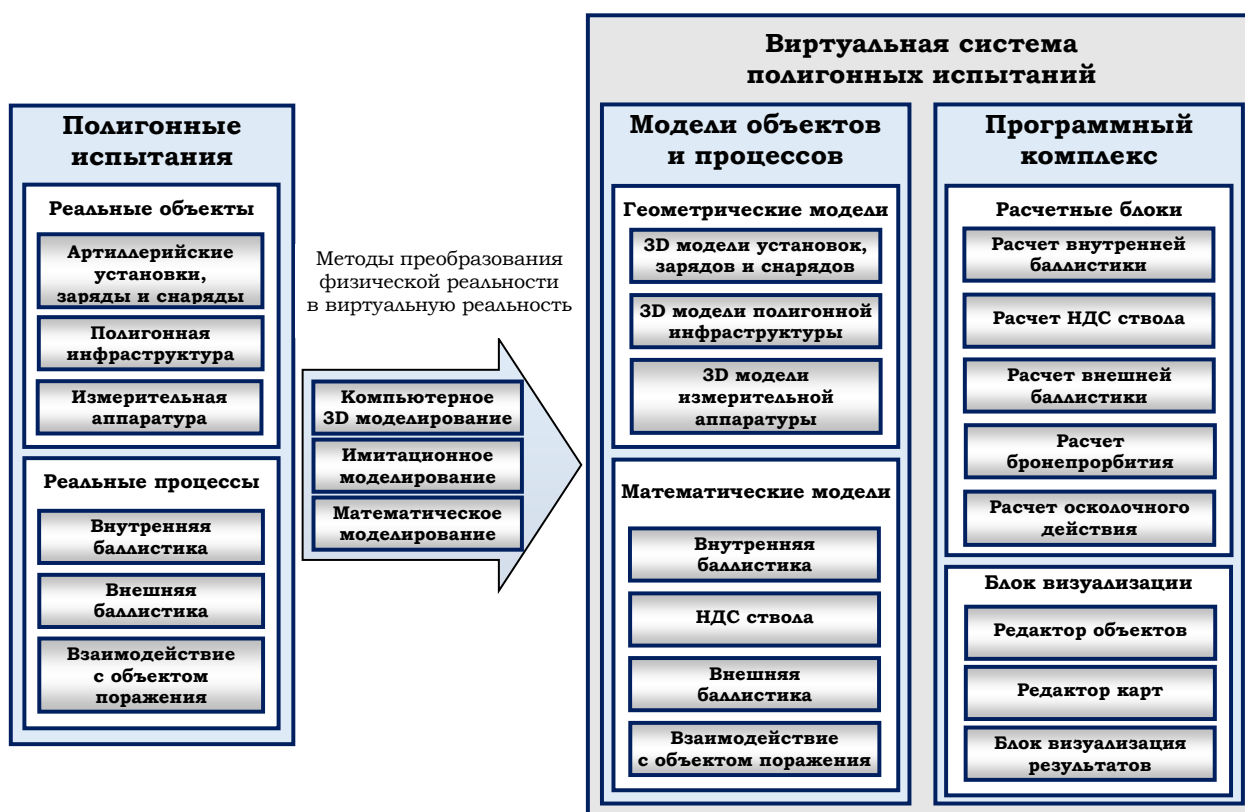


Рис. 4. Концептуальная схема представления виртуальной системы полигонных испытаний



Рис. 5. Взаимосвязь процессов проектирования, моделирования и полигонных испытаний артиллерийских систем

На первом этапе создаются 3D-модели артиллерийских устройств, артиллерийских выстрелов и мишеней. Готовые 3D-модели можно импортировать из различных сред 3D-моделирования и систем автоматизированного проектирования (САПР). Разработанные 3D-модели в дальнейшем используются при математическом моделировании процессов артиллерийского выстрела. Примеры разработанных моделей бронебойно-подкалиберных (БП), оперенных и неоперенных (вращающихся) осколочно-фугасных (ОФ) снарядов представлены на рис. 6.

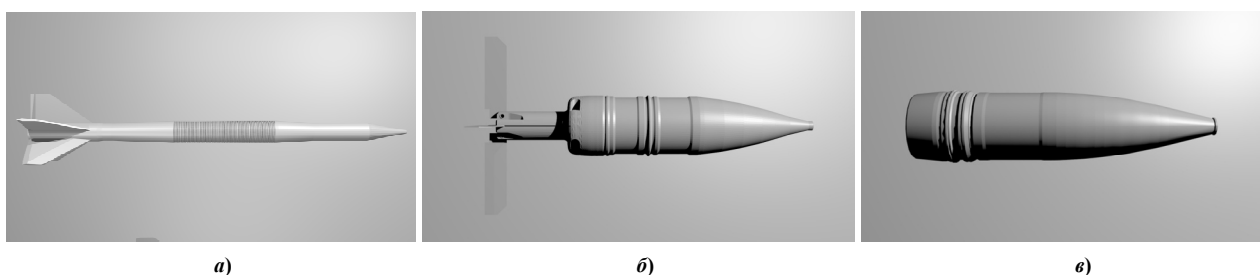


Рис. 6. Примеры виртуальных моделей снарядов: а – БП снаряд калибра 125 мм; б – ОФ оперенный снаряд калибра 125 мм; в – ОФ вращающийся снаряд калибра 152 мм

После создания 3D-объектов последовательно проводится моделирование процессов внутренней, внешней и конечной баллистики в программном комплексе [2]. Результаты моделирования отображаются на 3D-цифровой карте полигона, на которой содержатся виртуальные модели объектов полигонной ин-

фраструктуры, артиллерийские установки, мишени, измерительно-регистрирующие устройства с учетом их геодезических координат и рельефа местности.

### Разработка программного комплекса

В рамках разрабатываемого подхода к проектированию и отработке стрелково-пушечного вооружения создан программный комплекс моделирования и визуализации процессов артиллерийского выстрела. Структура программного комплекса представлена на рис. 7.

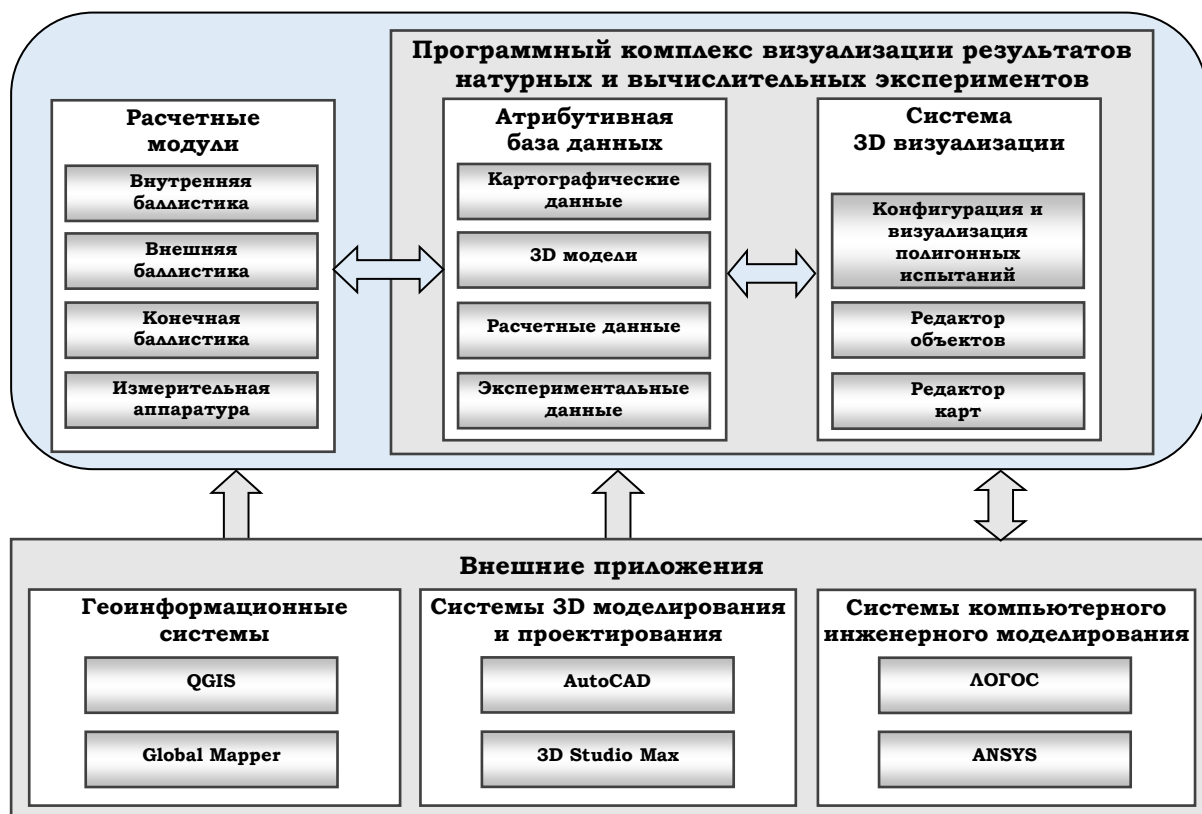


Рис. 7. Структура программного комплекса моделирования и визуализации баллистических процессов

Разработанный программно-вычислительный комплекс имеет открытую архитектуру и позволяет взаимодействовать с внешними приложениями, которые разделены на три группы: геоинформационные системы, системы 3D-моделирования и проектирования, системы компьютерного инженерного моделирования.

Геоинформационные системы предназначены для предобработки картографической информации, которая первоначально может иметь различный формат данных. После предобработки картографической информации в одной из геоинформационных систем, например, в QGIS или Global Mapper, данные о земной поверхности импортируются в редактор карт.

Системы 3D-моделирования и проектирования позволяют значительно упростить построение геометрических примитивов, необходимых при создании объектов моделирования и визуализации. Геометрические примитивы, разрабо-



танные в САПР Компас 3D [3], после наложения текстур в среде 3D Studio MAX импортируются в редактор объектов в форматах OBJ или FBX.

Моделирование полигонных испытаний артиллерийских систем осуществляется в расчетных модулях: внутренней баллистики, внешней баллистики, конечной баллистики и измерительной аппаратуры.

Расчетные модули создавались в средах Qt Creator и MS Visual Studio на языках программирования C++ и C#. Программный комплекс конфигурации и визуализации полигонных испытаний создан с использованием среды разработки 3D-приложений NeoAxis Engine. Наиболее трудоемкие расчеты проводились в системах инженерного компьютерного моделирования, например, моделирование взаимодействия снаряда с преградой в ЛОГОС [4] Прочность и ANSYS [5] Autodyn, а расчет обтекание снаряда в ЛОГОС Аэрогидромеханика и ANSYS Fluent.

Основное окно пользовательского интерфейса программного комплекса представлено на рис. 8.

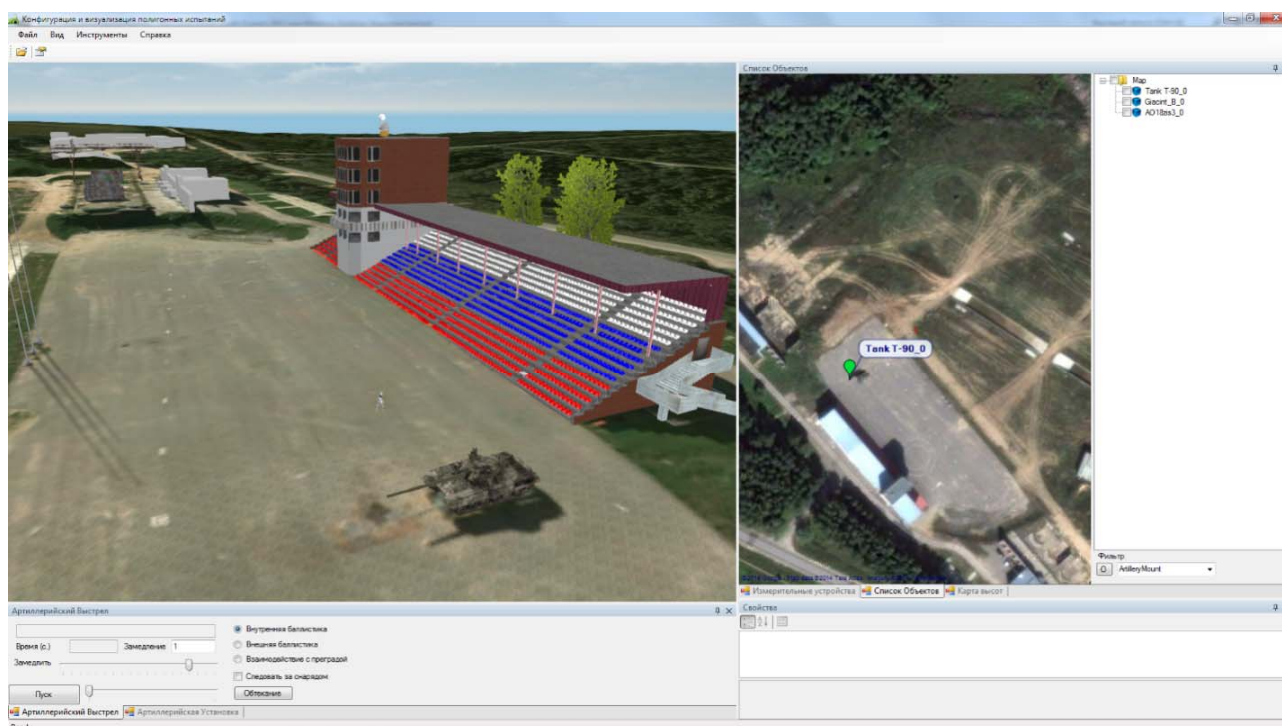


Рис. 8. Программный комплекс конфигурации и визуализации полигонных испытаний

## Результаты моделирования баллистических процессов выстрела

### *Результаты моделирования внутренней баллистики*

Разработанное программное обеспечение способно предоставить самую разнообразную числовую и графическую информацию о внутрибаллистическом процессе выстрела, проводить параметрические исследования и оценивать влияние конструкции заряда на баллистику выстрела (см. [6–12]).

Элементы программного комплекса автоматизации обработки и визуализации результатов моделирования внутренней баллистики приведены на рис. 9.

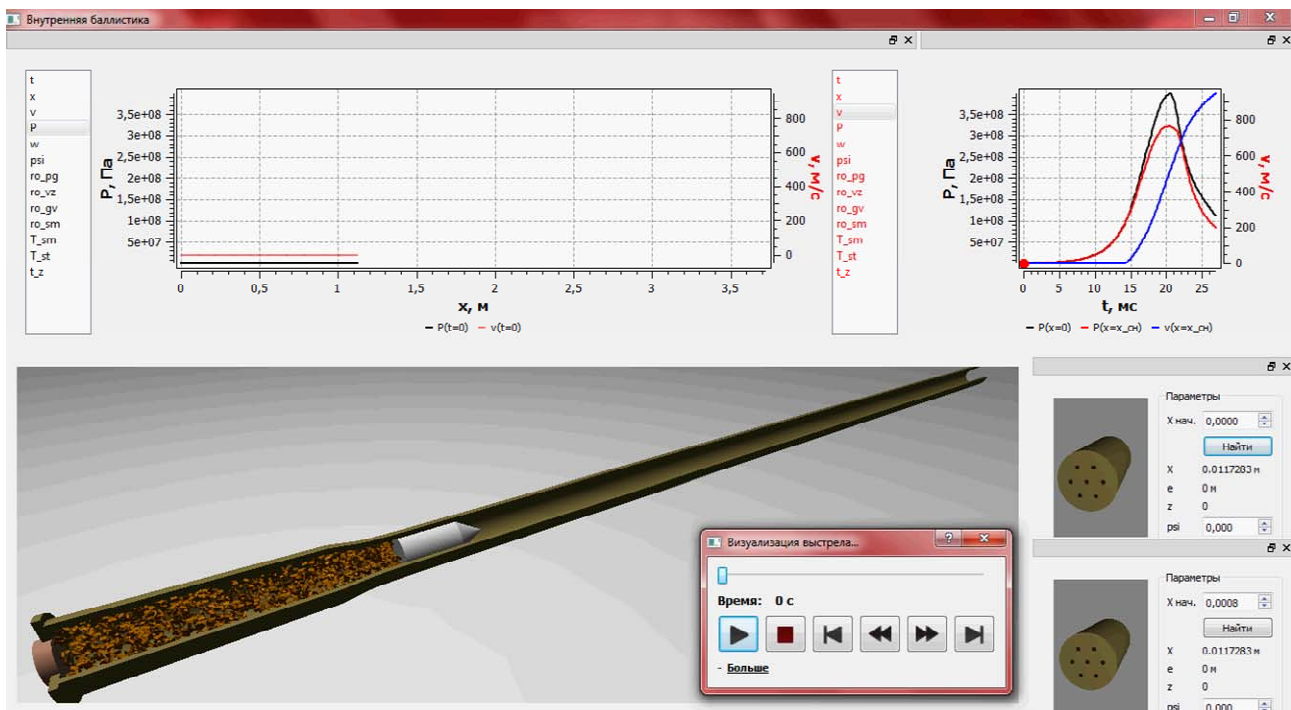


Рис. 9. Визуализация внутрибаллистического процесса для орудия калибра 152 мм с зарядом из зернового пороха в эйлеровой системе координат

### Результаты моделирования внешней баллистики

При решении задачи внешней баллистики [13–15] рассматривались снаряды различной формы: бронебойно-подкалиберный снаряд калибра 125 мм; осколочно-фугасный оперенный снаряд калибра 125 мм и осколочно-фугасный вращающийся снаряд калибра 152 мм (см. рис. 6).

На рис. 10 представлены зависимости коэффициента лобового сопротивления  $C_x$  от числа Маха для рассматриваемых снарядов, а также зависимости, построенные по законам сопротивления 1943 года и 1958 года [16]. Наблюдается качественное и количественное соответствие расчетных зависимостей с законами сопротивления 1943 года и 1958 года. При этом в диапазоне чисел Маха, соответствующих движению осколочно-фугасных снарядов по траектории ( $0,5 < M < 3,0$ ), расхождение кривых составляет 5–12 %, в соответствующем диапазоне для бронебойно-подкалиберного снаряда ( $3,0 < M < 5,0$ ) расхождение кривых составляет 7–10 %.

В таблице представлены результаты сравнения координат точек падения осколочно-фугасного оперенного снаряда калибра 125 мм, полученные расчетным путем и в ходе проведения эксперимента (ФКП «НИИ «Геодезия»).

На рис. 11 представлено распределение точек падения снарядов на полигоне (номера и координаты точек представлены в табл. 1). Сравнение отклонения расчетных точек падения снаряда от положения средней точки падения, полученной в эксперименте (обозначена крестиком), показывает, что наилучшее соответствие с экспериментом наблюдается в расчете по разработанной методике.

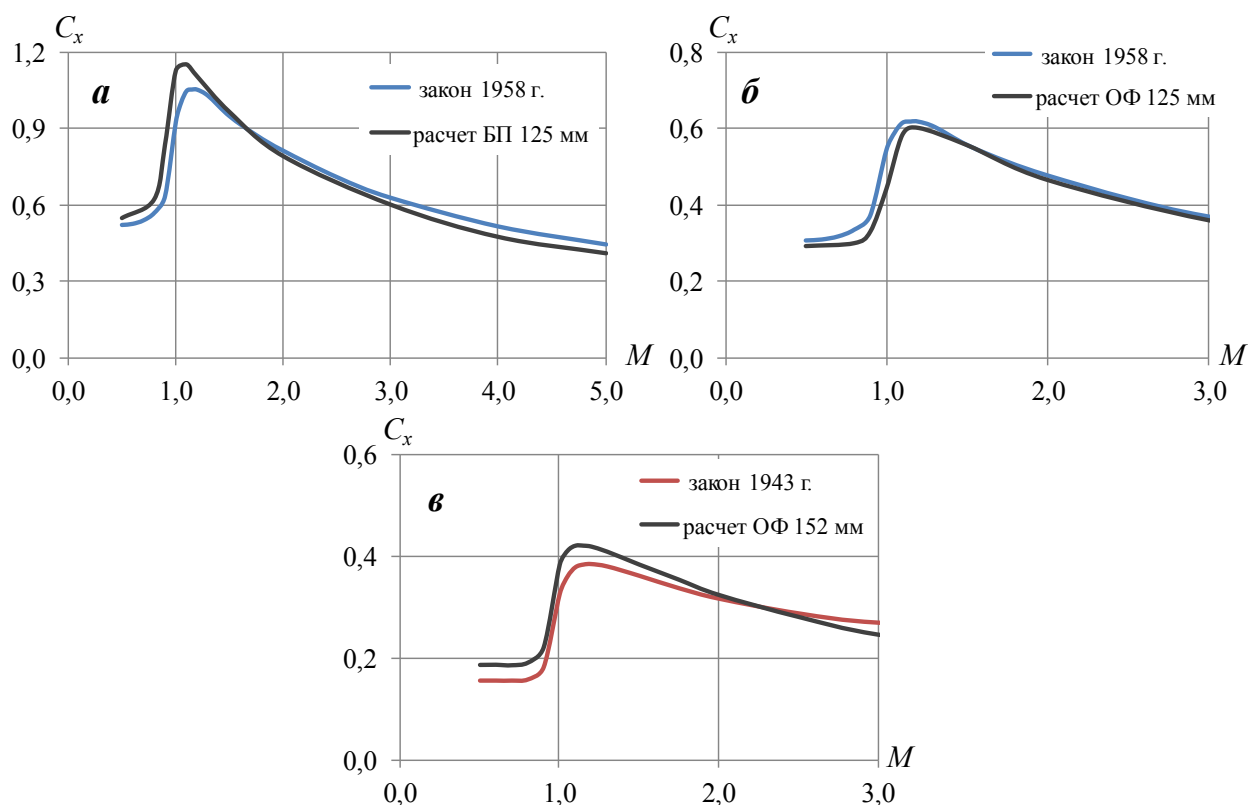


Рис. 10. Зависимости коэффициента лобового сопротивления  $C_x$  от числа Маха: а – для БП снаряда калибра 125 мм; б – для ОФ оперенного снаряда калибра 125 мм; в – для ОФ вращающегося снаряда калибра 152 мм

### Сравнение координат точек падения снарядов

Номер точки падения	Определение точек падения снаряда	Координаты		Среднее квадратическое отклонение, м
		x, м	z, м	
1	В эксперименте 1	11657	6,1	–
2	В эксперименте 2	11802	–8,2	–
3	В эксперименте 3	11745	88,1	–
4	В эксперименте 4	11890	74,7	–
5	В расчете по закону 1958 г.	11653	67,2	123,5
6	В расчете по разработанной методике	11752	54,5	25,8

### Результаты моделирования конечной баллистики

**Результаты моделирования процесса бронепробития.** Комплексное моделирование артиллерийского выстрела учитывает связь между последовательными этапами процесса [17]: внутренняя баллистика, внешняя баллистика и конечная баллистика.

Рассмотрим некоторые результаты параметрического исследования влияния диаметра сердечника бронебойно-подкалиберного снаряда на глубину пробития. Сердечник изготавливается из материала высокой плотности, например вольфрамового сплава, соответственно, с увеличением диаметра сердечника

общая масса снаряда также увеличивается. Когда активная часть снаряда полностью состоит из стали, то снаряд будет иметь наименьшую массу, а в случае вольфрамового сплава – наибольшую массу.

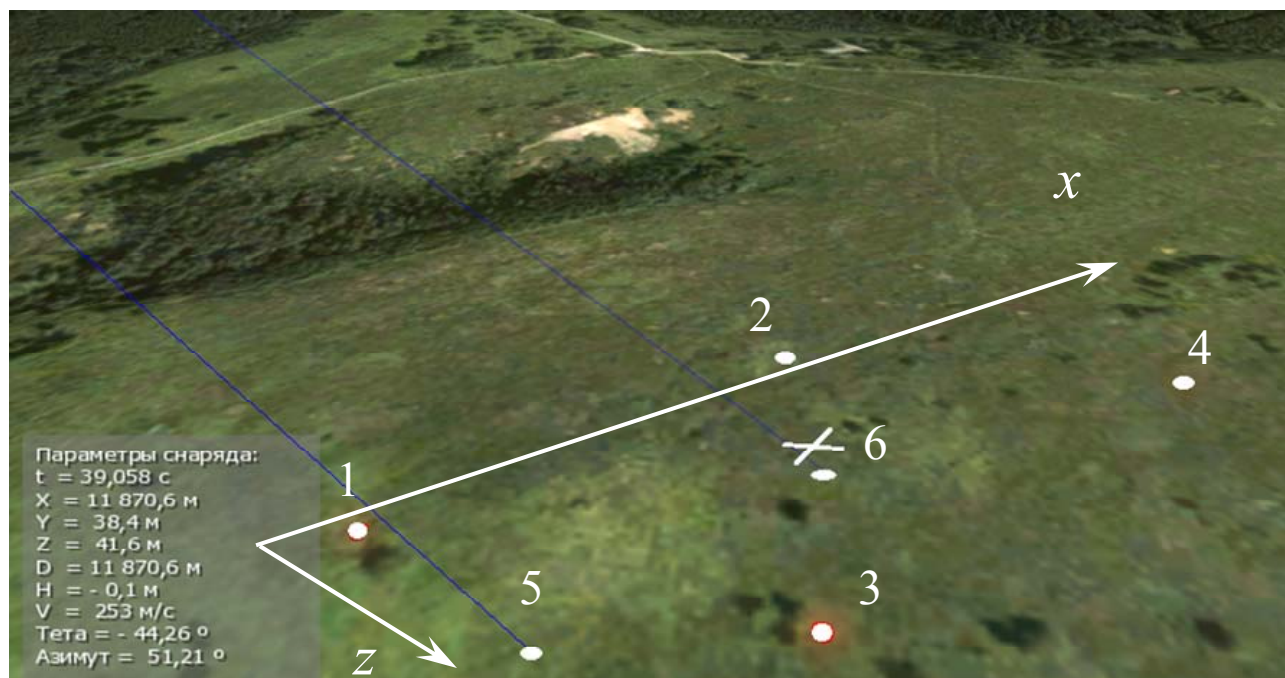


Рис. 11. Распределение точек падения снарядов на полигоне

Ограничениями для внутренней баллистики могут служить заданное значение максимального давления внутри ствола или у дна снаряда для обеспечения нормального функционирования артиллерийской системы. Ограничением для внешней баллистики является устойчивое движение снаряда на рассматриваемом участке траектории.

Для штатного заряда в разработанном модуле внутренней баллистики были рассчитаны дульные скорости движения 125 мм бронебойно-подкалиберного снаряда с различными диаметрами вольфрамового сердечника. На основе дульных скоростей и углов вылета снаряда были определены траектории движения и скорости подлета снаряда к преграде с учетом различных массовых характеристик.

Задача бронепробития решалась в программе ANSYS Autodyn в осесимметричной постановке. Рассматривались два варианта расчета: пробитие конечной и полубесконечной преград [17].

На рис. 12 представлены результаты расчета действия однородного стального снаряда по бронеплите толщиной 440 мм. В данном случае имеет место застревание снаряда. В случае использования однородного снаряда из вольфрамового сплава при тех же условиях заряжания наблюдается пробитие преграды (рис. 13).

Сравнительный анализ зависимостей глубины пробития от массы снаряда в случае полубесконечной и конечной преграды представлен на рис. 14.



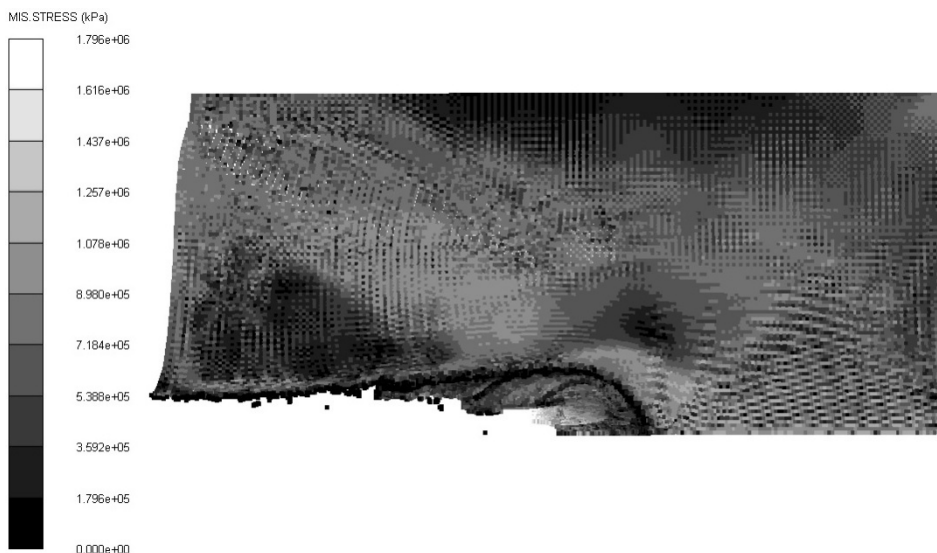


Рис. 12. Характер взаимодействия однородного стального снаряда с преградой

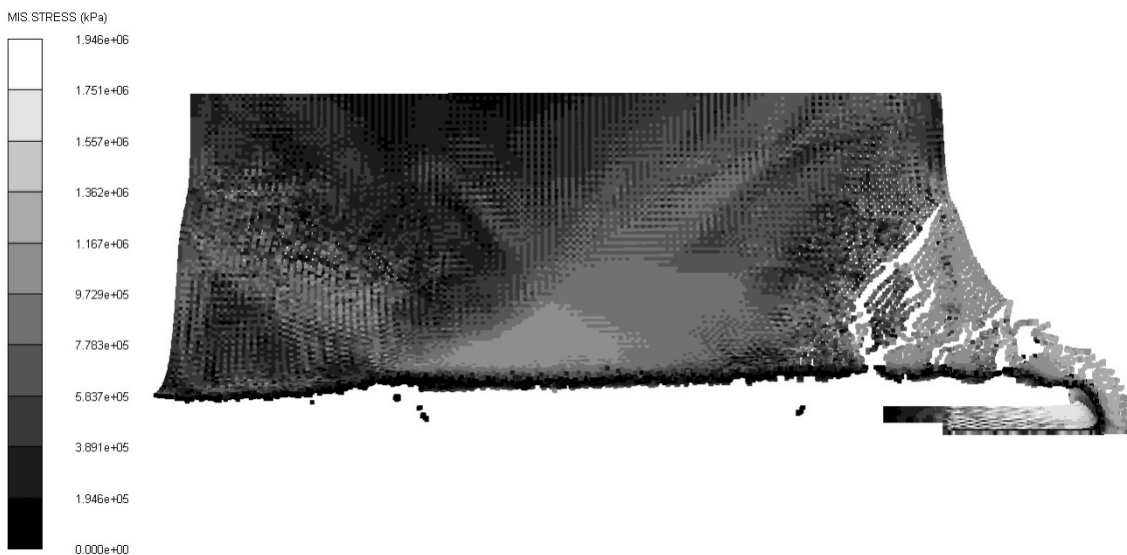


Рис. 13. Характер взаимодействия однородного снаряда из вольфрамового сплава с преградой

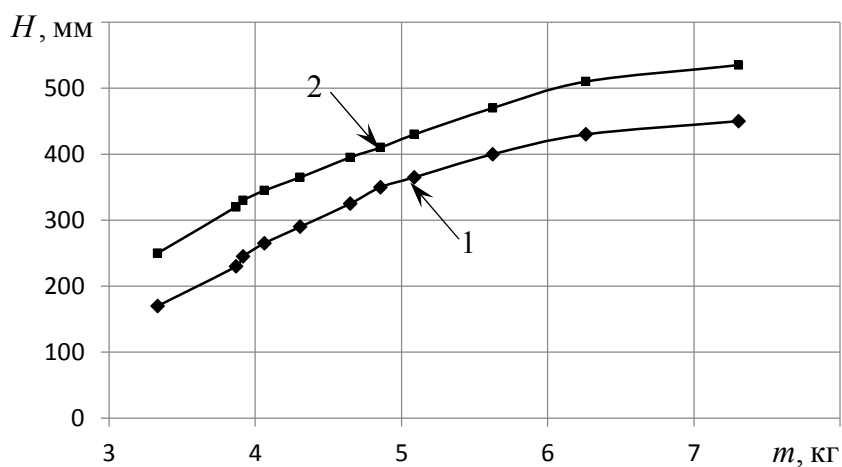
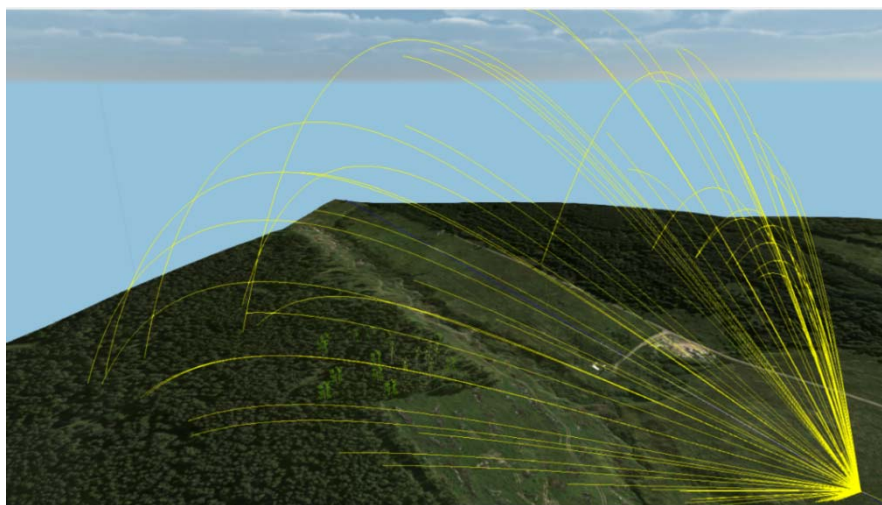


Рис. 14. Глубина пробития полубесконечной (1) и конечной (2) преграды в зависимости от массы снаряда

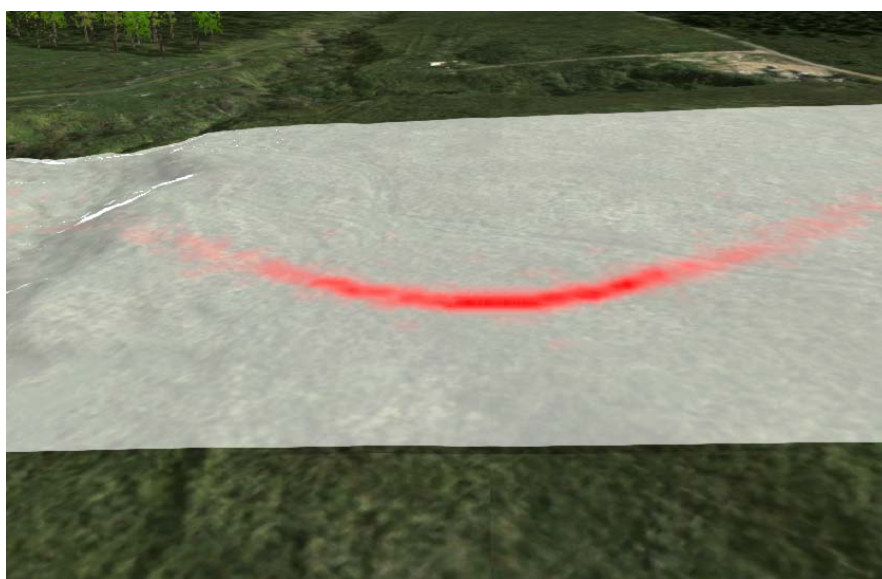
Из расчетов следует, что при одинаковых условиях заряжания проникающая способность снаряда возрастает с увеличением его массы, зависящей от диаметра вольфрамового сердечника, при этом отличие результатов расчета по глубине проникновения снаряда для полубесконечной и конечной преград составляет ~ 20–50 %.

**Результаты моделирования осколочного действия снаряда с учетом рельефа местности.** В программном комплексе предусмотрено построение траектории разлета поражающих элементов (рис. 15). Траекторные кривые строятся до момента встречи осколков с поверхностью земли либо до момента, когда их кинетическая энергия становится меньше критического значения, необходимого для поражения незащищенной живой силы [18].



*Рис. 15.* Траектории разлета осколков при подрыве 125 мм ОФ оперенного снаряда

На рис. 16. представлена расчетная область поражения осколками 125 мм ОФ оперенного снаряда.



*Рис. 16.* Плотность осколочного потока и зона поражения осколками 125 мм ОФ оперенного снаряда

Результаты моделирования осколочного поля накладываются на рельеф местности. Как видно из рис. 16, основная масса осколков сосредоточена вблизи подрыва снаряда. Для снаряда цилиндрической формы область поражения имеет дугообразную форму, что совпадает с результатами натуральных экспериментов. Такая дугообразная форма плотности осколочного поля объясняется наличием продольной составляющей скорости движения снаряда и высокой скоростью разлета осколков в радиальном направлении.

### Результаты моделирования работы измерительной аппаратуры при проведении полигонных испытаний

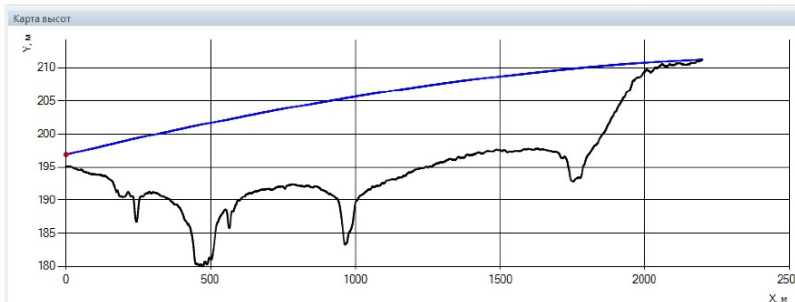
Разработанный программный комплекс позволяет визуализировать результаты вычислительного и натурального экспериментов на виртуальной карте полигона, а также отображать их в виде графиков и в табличном виде. Пример визуализации результатов моделирования в программном комплексе представлен на рис. 17.



**а) отображение траектории движения снаряда на виртуальном полигоне**



**б) вид снаряда из виртуального измерительного устройства**



**в) траектория движения снаряда с учетом рельефа**



**г) виртуальная карта полигона**

*Рис. 17.* Визуализация результатов моделирования внешнебаллистической траектории снаряда в программном комплексе

В виртуальную систему полигонных испытаний входит программный блок моделирования работы измерительно-регистрирующей аппаратуры, назначение которого является расчет параметров функционирования технических



средств регистрации, обеспечивающих сопровождение снаряда на всем протяжении его движения по внешнебаллистической траектории и локализации точек падения снаряда на реальном рельефе местности. На рис. 18 представлен пример слежения за снарядом из мобильной оптико-электронной системы (МОЭС) «Вереск-М» на виртуальном полигоне.

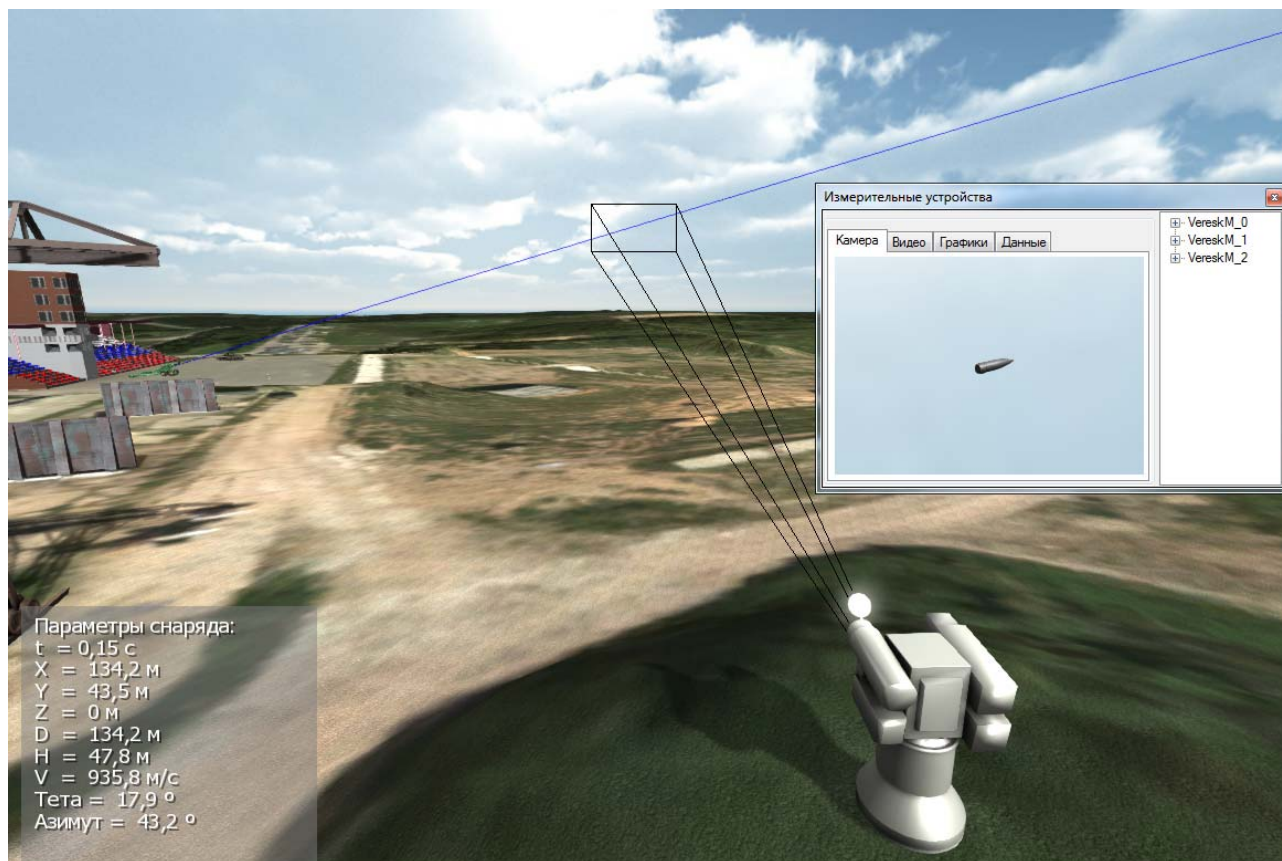


Рис. 18. Обзор из МОЭС «Вереск-М»

Моделирование работы измерительно-регистрающей аппаратуры осуществляется на основе расчетных внешнебаллистических траекторий снаряда [19].

Слежение за снарядом осуществляется за счет опорно-поворотного механизма. Производится расчет параметров вращения опорно-поворотного механизма, обеспечивающих слежение за движущимся объектом.

На рис. 19 представлен пример расчета расстояний от движущегося снаряда  $D_y(t)$  до измерительных устройств МОЭС «Вереск-М», расположенных в начале (1), в средне части (2) и в конце (3) траектории снаряда.

Результаты, представленные на графике (см. рис. 19), можно использовать для определения оптимального времени функционирования каждого из МОЭС «Вереск-М», исходя из минимального расстояния до снаряда от соответствующих позиций устройств. В данном случае имеем: 1-е устройство фиксирует снаряд в период  $0,00 \leq t \leq 8,25$  с; 2-е устройство – в период  $8,25 < t \leq 31,35$  с; 3-е устройство – в период  $31,35 < t \leq 42,00$  с.

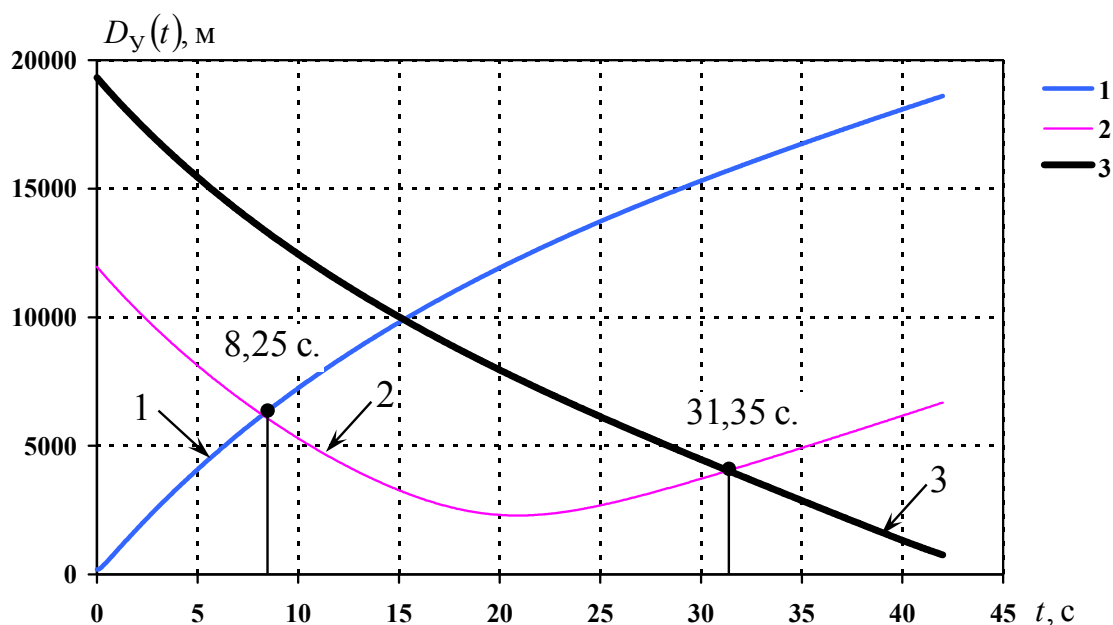


Рис. 19. Расстояние до снаряда от МОЭС «Вереск-М», расположенных в трех точках: 1 – в начале траектории; 2 – в средней части траектории; 3 – в конце траектории

### Основные достигнутые результаты

1. Разработана комплексная физико-математическая модель процесса артиллерийского выстрела, включающая процессы внутренней баллистики, напряженно-деформированного состояния ствола орудия, движения снаряда по внешнебаллистической траектории с учетом аэродинамической стабилизации, пробития преград артиллерийскими бронебойно-подкалиберными снарядами или разлета осколков при подрыве осколочно-фугасного снаряда на траектории.

2. Разработана и реализована структурно-функциональная модель системы визуализации процессов, сопровождающих артиллерийский выстрел.

3. Создана виртуальная система полигонных испытаний, включающая цифровую модель карты полигона с элементами инфраструктуры, объекты испытаний и измерительно-регистрирующий комплекс.

4. Разработана система имитационного моделирования измерительно-регистрирующих устройств для определения координат позиционирования и параметров функционирования измерительно-регистрирующей аппаратуры при фиксации траектории снарядов.

5. Разработан программно-вычислительный комплекс конфигурации и визуализации полигонных испытаний, позволяющий конфигурировать карты местности и размещать элементы инфраструктуры, предназначенный для анализа, оптимизации и принятия управленческих решений на основе обработки информации по результатам моделирования процесса срабатывания артиллерийского выстрела.

Проведенные исследования и разработки могут служить основой создания специализированного вычислительного модуля для решения комплекса задач проектирования и отработки стрелково-пушечного вооружения.

## Список использованных источников и литературы

1. К вопросу о моделировании полигонных испытаний артиллерийских систем / А. М. Липанов, А. В. Вагин, И. Г. Русяк, В. Г. Суфиянов // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2014. – № 4 (84). – С. 46–52.
2. Суфиянов, В. Г. Решение задачи комплексного моделирования артиллерийского выстрела с применением визуальных технологий для проектирования и обработки артиллерийских систем : дис. ... д-ра техн. наук. – Ижевск, 2017.
4. Пакет программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования ЛОГОС / РФЯЦ-ВНИИЭФ. – 2017–2018. – URL: <http://logos.vniief.ru>.
5. Engineering simulation & 3D Design Software / ANSYS, Inc. 2018. – URL: <https://www.ansys.com>.
6. Русяк, И. Г. Физические основы и газовая динамика горения порохов в артиллерийских системах / И. Г. Русяк, А. М. Липанов, В. М. Ушаков. – Москва ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2016.
7. Русяк, И. Г. Исследование сопряженного тепломассообмена при воспламенении и последующем нестационарном эрозионном горении порохов в условиях, приближенных к условиям выстрела / И. Г. Русяк, А. М. Липанов // Инженерно-физический журнал. – 2016. – Т. 89, № 6. – С. 1553–1563.
8. Rusyak I., Sufiyarov V., Korolev S., Ermolaev M. Software Complex for simulation of Internal and external Ballistics of Artillery Shot // ICMT 2015 – International Conference on Military Technologies 2015 5. 2015. P. 7153682.
9. Программный комплекс моделирования артиллерийского выстрела / И. Г. Русяк, А. Н. Ищенко, В. З. Касимов, В. Г. Суфиянов, М. А. Ермолаев // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 6-3. – С. 51–57.
10. Математическая модель газовой динамики, постепенного воспламенения, нестационарного и эрозионного горения порохов в артиллерийских системах / И. Г. Русяк, А. Н. Ищенко, В. З. Касимов, В. Г. Суфиянов, М. А. Ермолаев, В. М. Широков // XXIII Семинара по струйным, отрывным и нестационарным течениям. Томск : Изд-во НИТПУ, 2012. С. 305-309.
11. Русяк, И. Г. К вопросу о постановке сопряженных задач газовой динамики и горения артиллерийских порохов // VII Всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики». – Томск : Изд-во НИТГУ, 2011. – С. 181–183.
12. Русяк, И. Г. Математические модели проектирования боеприпасов на основе уравнений механики гетерогенных реагирующих сред // Вопросы оборонной техники. Серия 14. Проектирование систем вооружения, боеприпасов и измерительных комплексов. – 2011. – № 2. – С. 3–11.
13. Расчет траектории движения снаряда в атмосфере с учетом гидродинамики его обтекания / И. Г. Русяк, А. И. Карпов, С. А. Королев, С. А. Карсканов // Вопросы оборонной техники. Серия 14. – 2015. – № 2. – С. 130–140.
14. Королев, С. А. К вопросу о точности решения прямой задачи внешней баллистики / С. А. Королев, А. М. Липанов, И. Г. Русяк // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2017. – № 47. – С. 63–74. – DOI: 10.17223/19988621/47/7.
15. Численное решение задачи обтекания для определения аэродинамических коэффициентов метаемых тел / А. М. Липанов, И. Г. Русяк, С. А. Королев, С. А. Карсканов // Инженерно-физический журнал. – 2019. – Т. 92. – № 2. – С. 496–504.

16. *Дмитриевский, А. А.* Внешняя баллистика / А. А. Дмитриевский, Л. Н. Лысенко. – Москва : Машиностроение, 2005.
17. *Липанов, А. М.* Результаты комплексного математического моделирования процесса бронепробития / А. М. Липанов, И. Г. Русяк, В. Г. Суфиянов // IX Всероссийская конференция «Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и ствольных системах» (ICOS'2017). – Ижевск, 2017. – С. 168–179.
18. Математическое моделирование разлета осколков при срабатывании снаряда на траектории / А. М. Липанов, И. Г. Русяк, В. А. Тененев, В. Г. Суфиянов // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2015. – № 3. – С. 79–84.
19. *Суфиянов, В. Г.* Моделирование угловых характеристик опорно-поворотного механизма измерительно-регистрающей аппаратуры при слежении за движением снаряда по внешнебаллистической траектории / В. Г. Суфиянов, С. А. Королев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2016. – № 4(31). – С. 116–119.

## Повышение качества стволов огнестрельного оружия на основе упрочняющих технологий

В. Б. Дементьев<sup>1,2</sup>, А. М. Липанов<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Институт механики УдмФИЦ УрО РАН,

<sup>2</sup> Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова,

<sup>3</sup> Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН

*В статье рассмотрены упрочняющие технологии изготовления ствольных заготовок на основе высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) винтовым обжатием трубной заготовки и регулируемым охлаждением (закалкой). Для высокотемпных систем разработаны способы биметаллизации с жаропрочным внутренним слоем (наплавка, пайка, горячее прессование).*

**Ключевые слова:** ствольная заготовка, термомеханическая обработка, винтовое обжатие, биметаллизация, жаропрочный слой.

Современное вооружение и военная техника (В и ВТ) все более направлены на выполнение задач, связанных с повышением дульной энергетика, дальности и кучности стрельбы, что, соответственно, влечет за собой рост эксплуатационных нагрузок и рабочих напряжений. В связи с этим актуальной является проблема развития технологического обеспечения изготовления изделий, испытывающих экстремальные нагрузки. В полной мере это относится к ствольному огнестрельному оружию и будет определяться комплексом показателей качества (физико-механическими свойствами материала, точностью размеров и формы, качеством поверхности, характером распределения и величиной остаточных напряжений и др.), что в целом будет определяться уровнем технологии производства.

Для производства стволов гладкоствольного и нарезного оружия на сегодня весьма актуальна проблема использования в машиностроительном цикле металлургической трубной заготовки, что позволяет повысить коэффициент использования металла (КИМ) в 1,5–1,7 раза и существенно снизить трудоемкость механической обработки за счет исключения из технологического процесса операции глубокого сверления. Кроме того, актуальны вопросы, связанные с заменой радиального обжатия, возникающие в силу того, что радиально-обжимные машины весьма дороги, а их парк находится на пределе эксплуатационных характеристик.

Традиционно в производстве стволов используется исходная заготовка сплошного сечения (горячекатаный прокат, периодический прокат, поковка ГKM), а формообразование канала начинается с операции глубокого сверления. При этом низок КИМ (до 0,3) и достаточно велико штучное время на операции

глубокого сверления (до 0,2 н/ч). Механические свойства материала ствола формируются на отдельно выполняемых операциях термической обработки (закалка с отпуском) с экологически неблагоприятными технологическими факторами.

Для трубных заготовок с параметром толстостенности  $a = 2 - 4$ , наиболее характерным для стволов ( $a = D/d$ , где  $D$  – наружный диаметр,  $d$  – диаметр канала заготовки), практически единственным способом получения в металлургическом цикле является прошивка с последующим редуцированием на станах поперечно-винтовой прокатки. Этот процесс отличается высокой производительностью, но при этом имеет такие недостатки, как:

- сохранение винтового следа на наружной поверхности и в канале трубной заготовки с высотой гребня до 0,5 мм и шагом 25–30 мм от прошивной оправки;
- разброс диаметра канала в партии заготовок до 1 мм, разностенность до 0,6–0,8 мм, непрямолинейность оси канала до 0,9 мм;
- наличие слоя окалины на наружной и внутренней поверхности толщиной до 0,3 мм, низкое качество поверхности, а также высокая анизотропия механических свойств по длине и сечению заготовки.

Наличие такого рода дефектов затрудняет использование металлургических горячекатаных трубных заготовок в машиностроительном цикле с той эффективностью, на которую они и были ориентированы.

Для применения в машиностроительном цикле металлургических трубных заготовок данного диапазона размеров и гаммы материалов целесообразно проводить калибровку горячекатаных заготовок, используя в начале машиностроительного цикла процесс ВТМО (высокотемпературной термомеханической обработки) с деформацией трубной металлургической заготовки винтовым обжатием (ВО) в неприводной трехроликовой клетки на короткой удерживаемой охлаждаемой оправке (рис. 1). В настоящее время данная технологическая схема, инструмент и оснастка разработаны и опробованы в условиях выпуска опытно-промышленных партий трубных заготовок [1–3]. Согласно этой схеме заготовка непрерывно-последовательно проходит три стадии обработки, объединенных в одном технологическом цикле, а именно:

- индукционный нагрев токами высокой частоты до температуры аустенизации;
- пластическую деформацию в неприводной трехроликовой клетки на оправке);
- охлаждение (закалку) в спрейерном устройстве (одностороннее наружное, одностороннее внутреннее, комбинированное с регламентированным отношением расходов охладителя в наружном и внутреннем спрейерах – в зависимости от требований к структуре и свойствам материала по сечению стенки заготовки.

Как показали исследования, при этом обеспечиваются:

- точность размеров канала на уровне 9–11-го квалитетов точности;
- разностенность на уровне 0,2 мм;
- непрямолинейность оси канала 0,2–0,25 мм;



- качество поверхности на уровне 1,25 мкм;
- сочетание высокой прочности (1500 МПа) и вязкости (0,6 МДж/м<sup>2</sup> и более). При этом повышается КИМ до 0,6–0,7 и снижается трудоемкость и себестоимость изготовления на 15–20 %. Иными словами, обеспечивается комплексное формирование повышенных показателей качества и повышение эффективности производства подобных изделий.

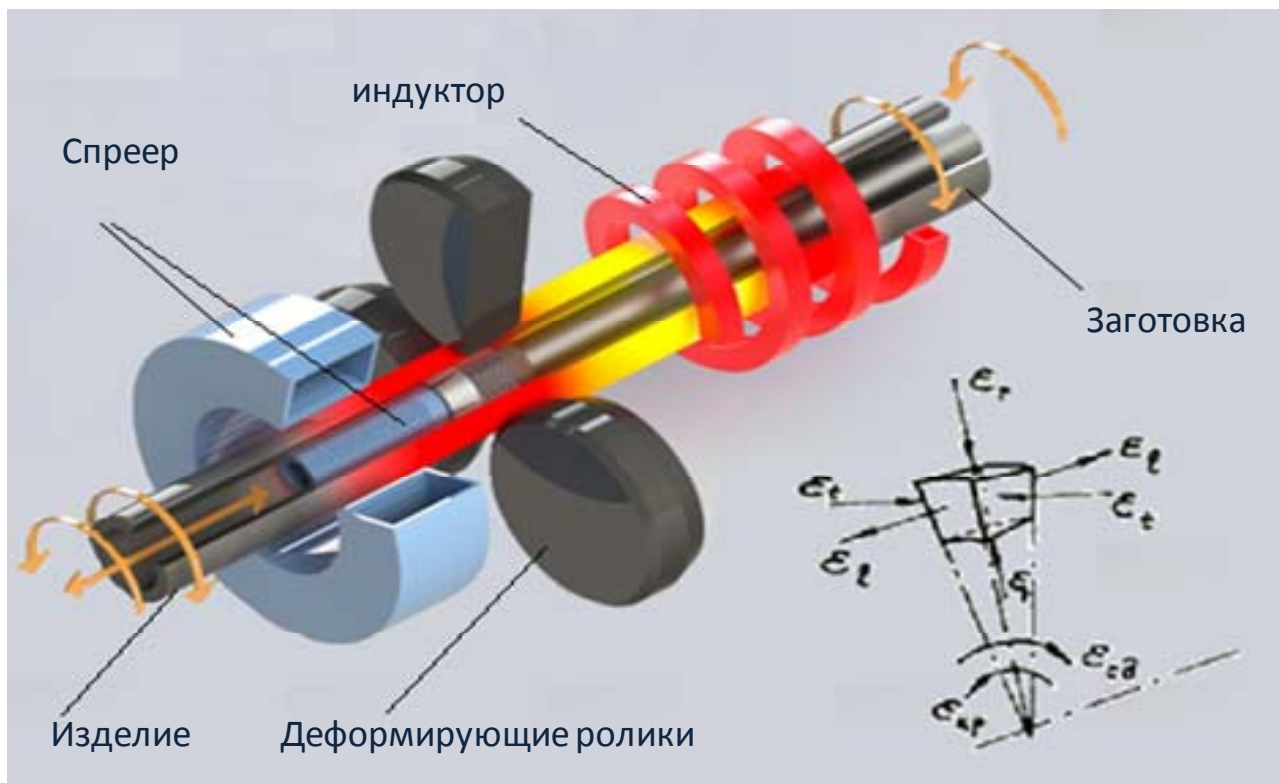


Рис. 1. Технологическая схема ВТМО ВО трубных заготовок на короткой удерживаемой охлаждаемой оправке

Поэтому в области производства стволов стрелкового оружия целесообразно ориентироваться на работы по использованию технологии и оборудования процесса ВТМО винтовым обжатием (ВТМО ВО) металлургической трубной или полученной глубоким сверлением заготовки в условиях серийного производства как с калибровкой гладкого канала, так и с получением нарезов в том числе с нетрадиционным профилем.

Операцию ВТМО ВО, а точнее, горячее винтовое обжатие (ГВО) необходимо применять как в начале технологического процесса для калибровки исходной горячекатаной трубной заготовки, так и в конце (собственно ВТМО ВО) для формообразования профиля канала ствола. Этот вариант маршрута на наш взгляд является наиболее перспективным, т. к. позволяет исключить из технологического процесса радиальное обжатие, которое при всех положительных сторонах процесса (высокая производительность, возможность одновременного формообразования направляющей части канала ствола и патронника) не лишено недостатков (увод оси канала на последующих операциях механической обработки, изменение размеров патронника). В силу этого в проектных маршрутных технологических процессах предусмотрено использование и других спосо-



бов окончательного формообразования канала ствола – электрохимической обработки, дорнования и, возможно, строжки или протягивания. Также предполагается использование технологии таких операций по полуставовой обработке канала, как гидроабразивная с переменным направлением потока в канале или развертывание инструментом с винтовым зубом или регулируемым шагом. В дополнении к исключению операций глубокого сверления и термообработки это позволит исключить комплекты мерного режущего инструмента – разверток – и сократить машинное время на данной операции. В принципе, ВТМО ВО (ГВО) может выполняться в металлургическом цикле производства, тогда технологический процесс механической обработки ствола в машиностроительном цикле будет еще менее трудоемким.

С точки зрения стабильности процесса оправочного деформирования и, в конечном итоге, обеспечения производительности процесса представляет интерес работа оправки в очаге деформации и единичное обжатие  $e$ , характеризующее деформацию заготовки в клети за один оборот (1):

$$e = \frac{4\pi \operatorname{tg} \beta_p \operatorname{tg} \alpha}{q \left( 1 + \frac{1}{a_n} \right)}. \quad (1)$$

Погрешность вычисления единичного обжатия по формуле (1) не превышает 7 %, что позволяет использовать ее в инженерной практике при оценке проработки сечения трубных заготовок при винтовом обжатии и назначении технологических режимов. Так для коэффициента изменения отверстия  $C_d$  ( $C_d = \frac{d_k}{d_n}$ , где  $d_k$  – конечный диаметр отверстия,  $d_n$  – начальный диаметр отверстия заготовки, мм), на предварительной стадии методом аппроксимирующих функций получена следующая зависимость:

$$C_d = -7,854 + 0,065 \sin 22'' a_n'' + 0,024 \cos'' e'' + 8,778 \cos \left( \frac{D_p / D_k}{30} \right).$$

Коэффициент множественной корреляции  $K = 0,896$ ,  $F$  – критерий  $-12,22$ .

Говоря о применении оправок при калибровке трубных заготовок винтовым обжатием, следует отметить, что из двух основных схем оправочного деформирования на длинных неудариваемых и коротких удариваемых оправках последняя обладает более широкими технологическими возможностями за счет управления положением рабочей части оправки в очаге деформации, возможности различной профилировки рабочей части, обеспечения комбинированного охлаждения заготовки изнутри и снаружи, что ведет к формированию благоприятного распределения остаточных напряжений [4].

Для высокотемпературных систем разработаны способы биметаллизации с жаропрочным внутренним слоем (наплавка, пайка, горячее прессование).

Образование биметаллического соединения связано с последовательным прохождением двух взаимосвязанных основных этапов: технологического

и физико-химического. Главный параметр диффузии – перенос массы металла через единицу площади сечения за единицу времени. Основной причиной перемещения растворенного вещества служат разность его концентраций в соседних объемах и стремление к равномерному распределению. Длительность протекания физико-химического этапа определяется как технологическими параметрами метода соединения, так и свойствами соединяемых материалов. Формирование биметаллического соединения металлов заканчивается на стадии взаимной диффузии химических элементов. Во многих случаях биметаллы подвергаются дополнительной термической обработке, что вызывает дальнейшее диффузионное перераспределение атомов химических элементов на границе соединения и увеличение диффузионной зоны. Для управления процессом получения биметаллического соединения разработаны технология и режимы термодиффузионной обработки для направленности диффузии атомов на границе соединения, и получения определенной ширины диффузионной зоны в биметаллических соединениях в зависимости от химических составов соединяемых материалов [5].

Разработанные технологии позволяют:

- повысить характеристики прочности, пластичности и ударной вязкости одновременно;
- повысить характеристики конструктивной прочности в 1,3–1,5 раза;
- снизить трудоемкость механической обработки;
- исключить из технологии производства кислотные методы удаления окалины;
- использовать при закалке (упрочнении) экологически чистые воду и водовоздушные среды взамен масел, солей, полимеров и т. п.

### Список использованных источников и литературы

1. *Дементьев, В. Б.* Перспективы применения совмещенных процессов деформации и термической обработки для обеспечения эксплуатационной надежности деталей // Сб. статей. Ижевск: Ижевский механический институт. – 1989. – Вып. 1. – С. 3–16.
2. О направленности упрочнения при термомеханической обработке / О. И. Шаврин, Л. Л. Лукин, Л. Т. Крекнин, А. С. Ефремов, В. Б. Дементьев // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1983. – № 11. – С. 116–119.
3. *Шаврин, О. И.* Методика исследования деформированного состояния трубных заготовок / О. И. Шаврин, В. Б. Дементьев, В. А. Иванов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1984. – № 3. – С. 135–136.
4. *Дементьев, В. Б.* Управление распределением остаточных напряжений в трубных заготовках в процессе упрочнения / В. Б. Дементьев, В. А. Четкарев // Материалы Всесоюзного симпозиума «Технологические остаточные напряжения». – Москва, 1988. – С. 152–156.
5. *Липанов, А. М.* Термомеханические технологии – резерв повышения эффективности ствольных систем / А. М. Липанов, В. Б. Дементьев, Н. А. Спичкин // Современная баллистика и смежные вопросы механики : сб. матер. науч. конф. – Томск, ТГУ, 2009. – С. 26–30.

## Прямое численное моделирование турбулентных течений

С. А. Карсканов<sup>1</sup>, А. М. Липанов<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Институт механики УдмФИЦ УрО РАН

<sup>2</sup> Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

<sup>3</sup> Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*Описываются особенности и возможности использования прямого численного моделирования. Показано, что увеличение мощности сетки детализирует течение. Увеличение порядка точности разностных схем также позволяет рассчитывать более мелкие высокочастотные вихревые структуры, свойственные данному течению.*

**Ключевые слова:** уравнения Навье – Стокса, высокий порядок аппроксимации, турбулентность, прямое численное моделирование.

Описание течений газа и жидкости на основе уравнений Навье – Стокса имеет богатую историю. В настоящее время созданы и успешно применяются многочисленные коммерческие пакеты программ, реализующие численные алгоритмы решения этих уравнений. Однако используемые в них подходы нельзя считать совершенными. Значительные успехи в области построения различных полуэмпирических моделей турбулентности, достигнутые в 60–70-х годах прошлого века, породили надежду на создание универсальной RANS-модели, то есть модели, пригодной для расчета любых турбулентных течений. Однако многочисленные последующие экспериментальные и расчетные исследования убедительно показали, что локальные осредненные характеристики турбулентных потоков подвержены существенному глобальному влиянию устойчивых, крупномасштабных трехмерных и нестационарных вихревых структур [1]. «Гипотеза локальности», на которой базируются RANS-модели турбулентности, не выполняется [2], что в принципе исключает возможность построения идеальной модели такого типа и делает надежды на возможность построения универсальной RANS-модели турбулентности несбыточными.

В последнее время метод прямого численного моделирования (DNS) привлекает все большее внимание специалистов, профессиональная деятельность которых связана с расчетом турбулентных течений. Существует точка зрения, что термином «прямое численное моделирование» принято обозначать расчеты турбулентных течений, в которых разрешаются движения всех присутствующих в течении масштабов - от характерных размеров самого течения, задаваемых геометрией задачи, до колмогоровского масштаба, то есть размера мельчайших вихрей, еще не диссипирующих под действием вязкости. Можно сказать, что это взгляд на DNS с точки зрения физики.

Однако под прямым численным моделированием понимается еще и решение уравнений Навье – Стокса без привлечения дополнительных моделей, эмпирических констант, подсеточных функций и т. п. Говоря о прямом численном моделировании на основе уравнений Навье – Стокса, по сути осуществляется переход к исследованию данных уравнений, которые решаются с помощью аппроксимационных схем высокого порядка аппроксимации. Компромисс между математикой и физикой заключается в том, что уравнения решаются с высокой (определенной) точностью, таким образом неразрешаемые высокочастотные пульсации вносят вклад, меньший принятой точности.

Известно, что реализация счета методом DNS связана с большими вычислительными затратами. Затраты на проведение DNS растут с ростом числа Рейнольдса как  $Re^{11/4}$  и оказываются огромными при представляющих практический интерес значениях этого параметра [1]. Даже бурный рост производительности компьютеров не позволяет методу прямого численного моделирования выйти за рамки фундаментальных исследований течений с относительно простой геометрией и низкими числами Рейнольдса, целью которых является получение детальной информации о структуре и основных закономерностях турбулентности.

Далее, демонстрируется численное решение задачи протекания дозвукового потока вязкого газа в прямоугольном канале с резким расширением на основе прямого численного моделирования.

Задача решается для прямоугольного канала (рис. 1), имеющего на входе квадратное отверстие.

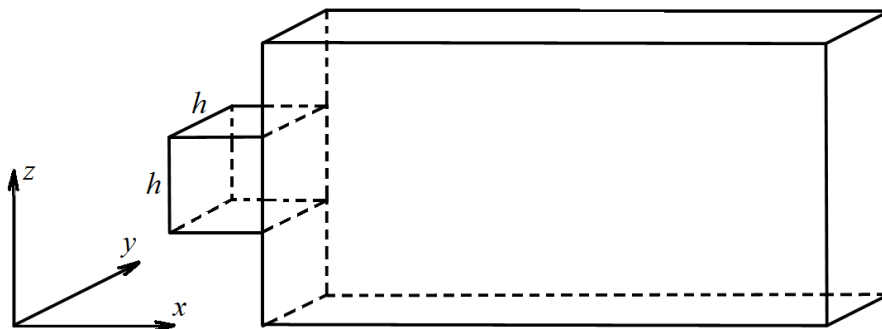


Рис. 1. Область интегрирования

При этом вдоль координаты  $y$  линейные размеры изменяются в три раза, а вдоль координаты  $z$  - не меняются. После скачка площади поперечного сечения канал становится прямоугольным со сторонами 3 и 1. Длина канала равна двадцати безразмерным единицам. Число Маха на входе в канал равно  $M = 0,6$ , число Рейнольдса  $Re^{1/4} = 0,5 \cdot 10^4$ , число Прандтля  $Pr = 0,7$ . Движущаяся среда – воздух.

Интегрирование по времени осуществляли со вторым порядком точности по явно-неявной схеме с пересчетом.

Пространственные частные производные рассчитывали: вдали от границ - на основе центральных разностей различных порядков точности, включая 2-й; на границе - с помощью предельно асимметричных разностных схем; в переходных зонах - используя асимметричные разностные схемы, постепенно переходящие в симметричные [3]. Во всех узловых точках ОИ пространственные частные производные рассчитывались с одинаковым порядком точности.

Количество узловых точек, использованных при выполнении исследования в шести их вариантах, приведено в табл. 1.

**Таблица 1. Расчетные сетки, использованные при исследовании**

№ п/п	Кол-во узлов в направлениях $x, y, z$	Мощность сетки (млн узлов)
1	400×45×15	0,27
2	600×63×21	0,8
3	800×93×31	2,3
4	1600×183×61	17,8
5	1920×273×91	47,7
6	2400×363×111	96,7

Общее число узловых точек разностной сетки в шестом варианте превышает их число в первом варианте более чем в 350 раз, а пятый вариант отличается от первого более чем в 170 раз. На рубеже 80–90-х годов прошлого века один миллион узловых точек в области интегрирования был пределом. В настоящее время можно использовать на два порядка большее количество узловых точек. Поэтому работа на современных вычислительных системах открывает перед исследователями новые возможности и позволяет по-другому взглянуть на те же проблемы. Расчеты выполнялись на вычислительной многопроцессорной системе «Уран» (ИММ УрО РАН, г. Екатеринбург).

На рис. 2 приведены продольные сечения полей вектора скорости потока для трех вариантов сеток (первого, третьего и четвертого) при четвертом порядке аппроксимации пространственных производных. Из результатов расчетов следует, что на грубой сетке имеем крупные отрывные зоны (рис. 2, а). В результате такого расчета получаем ламинарную струю, формирующуюся под воздействием схемной вязкости. Очевидно, что численные данные, полученные на грубой сетке, не имеют ничего общего с реальными. На сетке с шагами в два раза меньшими картина меняется, практически, радикально (рис. 2, б). Канал заполнен существенно более мелкими вихрями, а струя размывается окружающими ее вихрями. При измельчении разностной сетки еще в два раза тенденция образования более мелких вихрей сохраняется (рис. 2, в). Итак, измельчение сетки при постоянном порядке точности аппроксимации пространственных частных производных позволяет рассчитывать заметно более мелкие вихри.

Далее, рассмотрим гидромеханические процессы при сохранении шагов разностной сетки, но при различных порядках аппроксимации пространственных частных производных. В качестве примера возьмем третью из рассмотренных сеток (рис. 3).

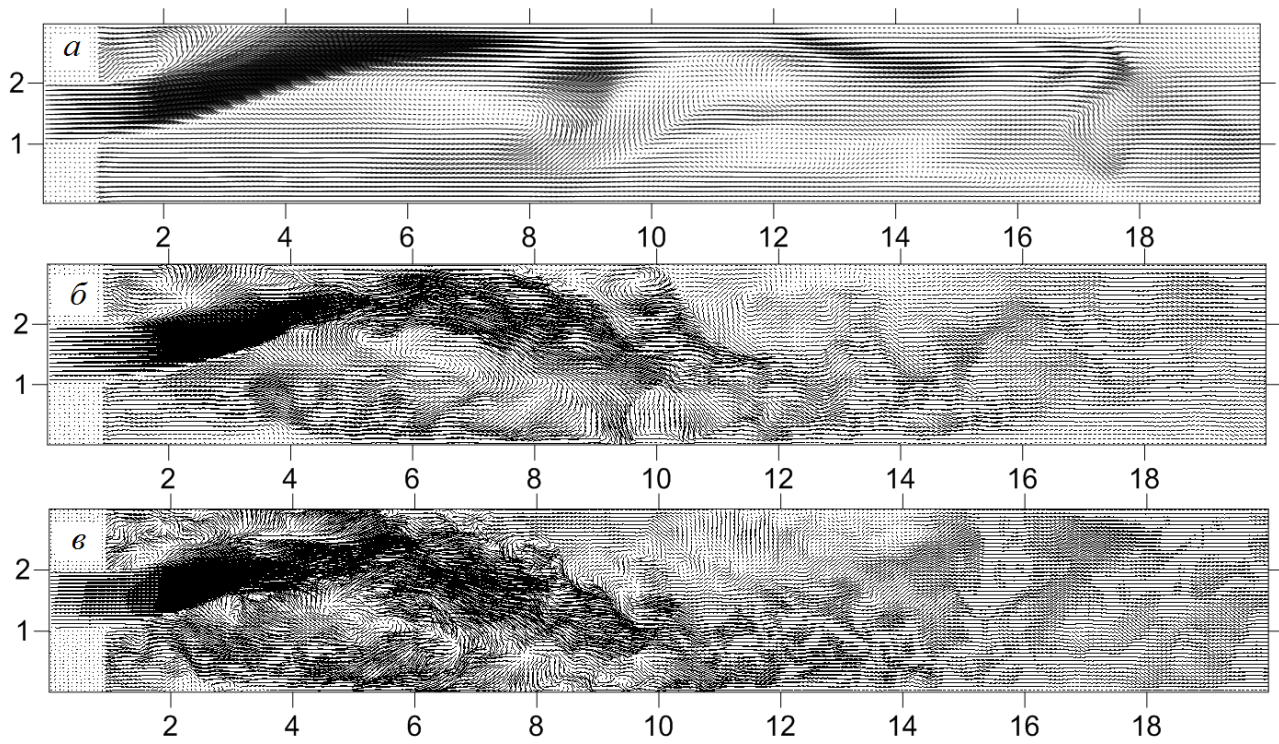


Рис. 2. Векторы скорости в центральной плоскости  $XU$  при расчете с четвертым порядком аппроксимации на различных сетках:  $a - 400 \times 45 \times 15$ ,  $б - 800 \times 93 \times 31$ ,  $в - 1600 \times 183 \times 61$

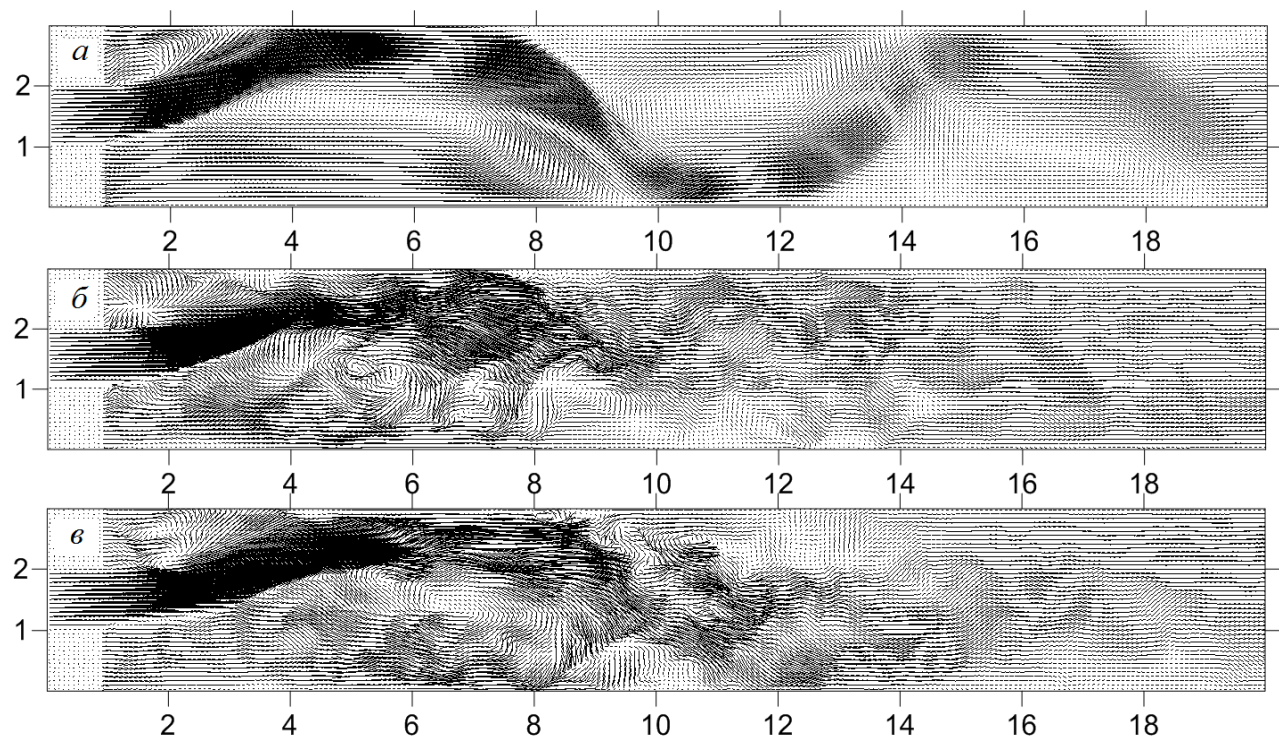


Рис. 3. Векторы скорости в центральной плоскости  $XU$  на сетке  $800 \times 93 \times 31$  при расчете с различными порядками аппроксимации:  $a -$  второй,  $б -$  шестой,  $в -$  восьмой

Анализируя данные рисунка, можно сказать, что второй порядок аппроксимации дает ламинарную картину течения, так как объем канала заполнен струей и крупными отрывными зонами. Очевидно, схемная вязкость второго



порядка аппроксимации подавляет вязкость физическую. Шестой и восьмой порядки дают более сложную картину течения. И хотя структуры потока соответствуют одному и тому же моменту времени, фазовые состояния потока не совпадают. Если при шестом порядке аппроксимации струя, частично отражаясь от верхней границы канала, исчезает примерно в его центре, то при восьмом - она почти доходит до нижней границы канала и только потом исчезает. Повышение порядка точности аппроксимации при расчете пространственных частных производных, как и измельчение разностной сетки, позволяет рассчитывать более мелкие вихри, увеличивая точность расчетов параметров. Это значит, что результаты при восьмом порядке точности аппроксимации более достоверные. При этом и крупные вихри рассчитываются тоже. Итак, на структуру потока влияют как густота разностной сетки, так и порядок точности аппроксимации пространственных частных производных. Другими словами, структура потока является функцией обоих вышеназванных аргументов.

Далее определимся с целевой функцией, используя которую сможем определять оптимальный порядок аппроксимации для каждого варианта разностной сетки. Для этого рассмотрим модуль вектора вихря  $\omega$ . В турбулентном потоке область интегрирования заполнена вихрями различных размеров, в сущности, являющимися наиболее типичными элементами структуры турбулентного потока. Модуль вектора вихря равен:

$$\omega = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2},$$

где

$$\omega_x = \frac{\partial W}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial z}, \quad \omega_y = \frac{\partial W}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial z}, \quad \omega_z = \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}.$$

Будем далее рассматривать максимальное значение модуля вектора вихря  $\omega_{\max}$  на оси симметрии канала осредненного поля вектора скорости и координату  $x$ , в которой этот максимум достигается.

**Таблица 2. Усредненные значения  $\omega_{\max}$  на оси симметрии канала**

Сетка \ Порядок	1 (0,27 млн)	2 (0,8 млн)	3 (2,3 млн)	4 (17,8 млн)	5 (47,7 млн)	6 (96,7 млн)
2	0,19, $x=2,42$	2,61, $x=1,98$	3,70, $x=2,28$	4,49, $x=2,43$	4,41, $x=2,43$	4,18, $x=2,40$
4	3,06, $x=2,12$	3,78, $x=2,38$	4,58, $x=2,64$	3,90, $x=2,44$	3,28, $x=2,48$	3,17, $x=2,35$
6	2,91, $x=2,22$	3,96, $x=2,22$	4,45, $x=2,61$	3,55, $x=2,45$	3,36, $x=2,32$	3,18, $x=2,16$
8	2,92, $x=2,32$	4,00, $x=2,41$	4,36, $x=2,44$	3,23, $x=2,40$	3,23, $x=2,15$	3,21, $x=2,18$
10	2,88, $x=2,37$	4,00, $x=2,31$	4,30, $x=2,56$	3,27, $x=2,42$	3,21, $x=2,16$	3,20, $x=2,17$

В табл. 2 усредненные значения  $\omega_{\max}$  на различных сетках представлены в зависимости от порядка точности аппроксимации пространственных частных производных. Стабилизация усредненного  $\omega_{\max}$  наступает при порядках аппроксимации, равных 8 и 10, как на редких, так и на густых сетках. Поэтому можно сделать вывод о том, что пространственные частные производные целесообразно считать с восьмым порядком точности. Измельчение же разностной

сетки позволило значительно уточнить результаты расчетов в канале и получить существенно более мелкие вихри. Можно сказать, что картина течения при переходе с пятой на шестую сетку принципиально не меняется. Таким образом, сетки мощностью в 47,7 млн узлов и восьмого порядка аппроксимации достаточно для получения адекватных результатов при решении поставленной задачи.

#### **Список использованных источников и литературы**

1. Современные подходы к моделированию турбулентности : учеб. пособие / А. В. Гарбарук [и др.]. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 234 с.
2. *Spalart, P. R.* Philosophies and fallacies in turbulence modeling // Progress in Aerospace Sciences, 2015. Vol. 74. N. 1. P. 1–15.
3. *Липанов, А. М.* Теоретическая гидромеханика ньютоновских сред. – Москва : Наука, 2011. – 551 с.



## Математическое моделирование и баллистическое проектирование газодинамических ствольных ускорителей тел

Н. В. Быков

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

*Предложена согласованная система квазиодномерных математических моделей внутрикамерных процессов в баллистических ствольных ускорителях тел различной конструкции (на сжатом газе, смеси химически реагирующих газов, порохе, с гидродинамическим эффектом). Разработаны методики баллистического проектирования рассматриваемых установок. Поставлена обобщенная задача баллистического проектирования (задача структурно-параметрического синтеза) газодинамических ускорителей тел, предложена методика и разработан алгоритм ее решения.*

**Ключевые слова:** внутренняя баллистика, баллистическое проектирование, генетические алгоритмы, газовая динамика, химическая физика.

Баллистические установки являются широко распространенным типом лабораторных ускорителей макротел, которые находят применение при аэробаллистических исследованиях, моделировании взаимодействия космического мусора с обшивкой летательных аппаратов, исследовании высокоскоростного соударения, испытаниях элементов приборов на перегрузки и т. д. [1–3]. Наиболее широко используемым в исследованиях типом баллистических установок являются пороховые баллистические установки (ПБУ), в основе работы которых лежит процесс горения пороха и последующего расширения продуктов сгорания, совершающих полезную работу.

В настоящее время можно выделить следующие схемы порохового разгона макротел: классические пороховые баллистические установки [4, 5]; ПБУ с гидродинамическим эффектом [6, 7], представляющие собой комбинированные установки, использующие порох для разгона сборки и деформацию пластического поршня в сужающемся (как правило, коническом) участке ствола; легкогазовые баллистические установки (ЛБУ) [1–4, 7] – комбинированные установки, использующие пороховой разгон деформируемого поршня, сжимающего легкий газ (обычно водород или гелий) для достижения высоких значений абсолютных скоростей (выше 10 км/с для тел массой в доли грамма); баллистические установки с присоединенной камерой подгона (эстафетная схема) [8] или на присоединенном заряде [9]. В то же время наблюдается тенденция к поиску альтернативных источников энергии для лабораторных установок, что связано с неудобством использования порохов в ряде случаев. Помимо традиционных баллистических установок на сжатых газах, практически возможно-

сти которых по скоростям ограничены значениями порядка 1,7–1,8 км/с [10], рассматриваются более энергоемкие установки на химически реагирующих смесях газов (например, кислород-водород-гелий) [11].

Широкое многообразие способов разгона тел позволяет осуществлять их комбинацию в зависимости от поставленных целей и располагаемых возможностей. Такие комбинации позволяют повысить эффективность разгона тел, снизить габариты установки и т. п. Рассмотрение таких комбинированных газодинамических баллистических установок (КГБУ) и оценка их возможностей требует разработки соответствующего методического аппарата, которому и посвящена данная работа. На этом этапе встает вопрос о выборе сложности математической модели. В настоящей работе в основу математического описания процессов разгона положено квазиодномерное описание движения сплошной среды. В первую очередь обоснование квазиодномерного подхода основано на использовании описания горения порохов, которое содержит геометрический закон горения, точность которого невелика. При этом выигрыш за счет более точного описания течения не всегда может дать повышение общей точности модели в целом. Кроме того, квазиодномерная задача по быстрдействию существенно лучше двумерной, что является принципиальным при решении задач синтеза.

На основании системы квазиодномерных моделей, построенной для различных типов баллистических установок (см. работы [12–15]), составлена обобщенная математическая модель внутренней баллистики КГБУ, включающая области со сжатым газом, реагирующая смесью газов, пороха и деформируемых поршней, представляемая в виде векторного уравнения

$$\frac{\partial}{\partial t}(\mathbf{q}S) + \frac{\partial}{\partial x}(\mathbf{f}S) = \mathbf{h}S,$$

в котором векторы  $\mathbf{q}$ ,  $\mathbf{f}$  и  $\mathbf{h}$  имеют вид:

$$\mathbf{q} = (\varphi\rho \quad \varphi\rho v \quad \varphi\rho E \quad \varphi\rho Y_1 \quad \dots \quad \varphi\rho Y_N \quad \beta\delta z \quad \beta\delta \quad \beta\delta u)^T,$$

$$\mathbf{f} = \begin{pmatrix} \varphi\rho v \\ \varphi(\rho v - \sigma^{xx}) \\ \varphi\rho v H \\ \varphi\rho v Y_1 \\ \dots \\ \varphi\rho v Y_N \\ \beta\delta z u \\ \beta\delta u \\ \beta(\delta u^2 - \sigma^{xx} + R_p) \end{pmatrix}; \quad \mathbf{h} = \begin{pmatrix} \xi_1 G \\ \xi_1(Gu - f_p) + \xi_2 2\pi R \sigma_w^{n\tau} - \sigma_w^{mn} \partial_x S / S \\ \xi_1 E_c + \xi_2 2\pi R \sigma_w^{n\tau} v + \xi_3 \sum_{i=1}^n G_i \Delta H_i \\ \xi_3 G_1 \\ \dots \\ \xi_3 G_N \\ \xi_1(\beta\delta p^v / I_k - Gz) \\ -\xi_1 G \\ \xi_1 [p \partial_x (\beta S) / S - (Gu - f_p)] \end{pmatrix}.$$

Здесь  $\rho$ ,  $v$ ,  $p$ ,  $E$  и  $H$  – плотность, скорость, давление, полная удельная энергия и полная удельная энтальпия соответственно среды (газа, газопороховой смеси, деформируемого поршня);  $\varphi$  – объемная доля несущей фазы;  $Y_1, \dots, Y_n$  – массовые концентрации компонентов смеси;  $\delta$  – плотность конденсированной фазы;  $G_1, \dots, G_n$  – интенсивность образования (масса, образующаяся в единицу времени в единице объема)  $i$ -го компонента смеси в результате химических реакций в газовой фазе;  $G$  – интенсивность газообразования в результате горения конденсированной фазы;  $S$  – площадь поперечного сечения канала;  $f_p$  – сила межфазного взаимодействия, обусловленная разностью скоростей фаз;  $u$  – скорость конденсированной фазы;  $\sigma^{xx} = -p + \xi_2 \tau^{xx}$  – осевая составляющая тензора напряжения;  $\sigma_w^{nt}$  – касательное напряжение на стенке;  $\sigma_w^{nn}$  – нормальное напряжение на стенке;  $\xi_1, \xi_2, \xi_3$  – переключающиеся коэффициенты:  $\xi_1$  отвечает на наличие реакций в конденсированной фазе;  $\xi_2$  отвечает за учет деформаций;  $\xi_3$  отвечает за наличие химических реакций в газовой фазе. Если положить  $\varphi = 1$ , система описывает однофазное течение. Таким образом,  $\varphi$  в этой системе также является своеобразным переключающимся коэффициентом. Приведенная система содержит  $6 + N$  уравнений, где  $N$  – количество компонентов газовой фазы. Система уравнений решается численно на подвижной расчетной сетке.

Принцип декомпозиции структуры КГБУ основан на построении вектора входных данных, отвечающего конкретной структурной схеме (рис. 1).

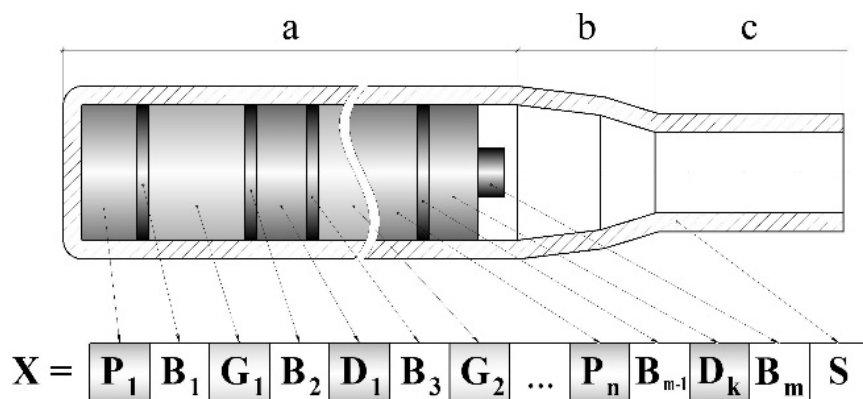


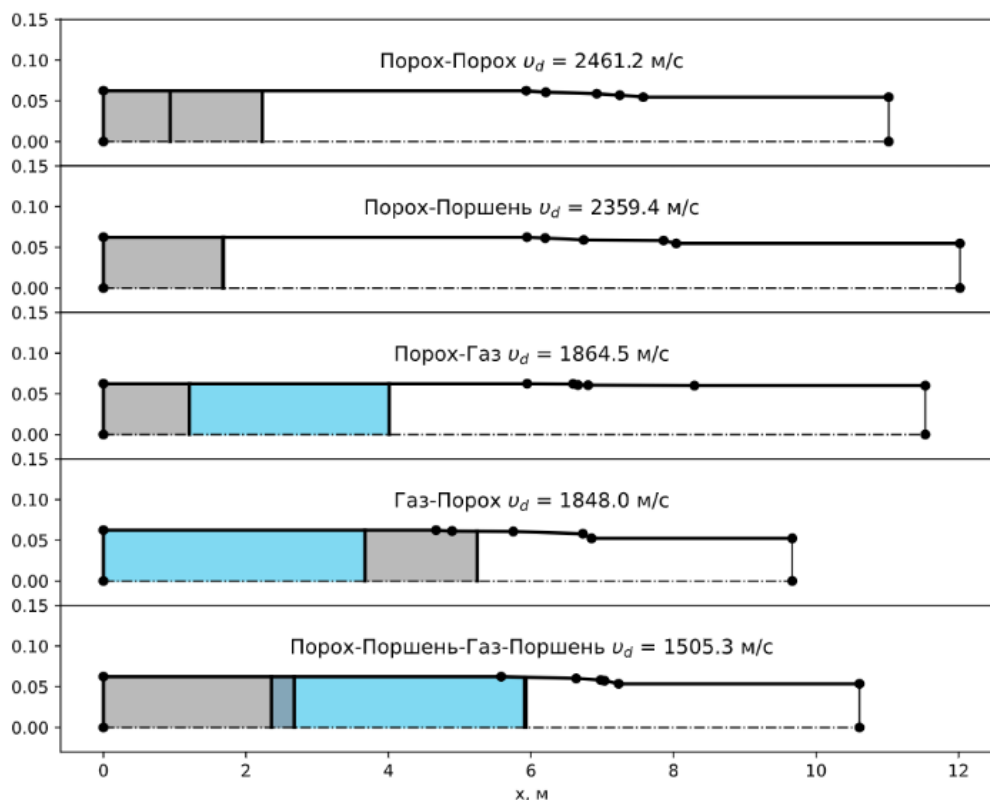
Рис. 1. Структура вектора входных данных для расчета прямой задачи внутренней баллистики КГБУ

Геометрия канала ствола представляется в виде композиции первичного (зона  $a$ ) и вторичного (зона  $c$ ) цилиндрических участков с набором конических переходников между ними (зона  $b$ ) и задается в виде матрицы  $\mathbf{S}$ , содержащей набор пар «координата-диаметр», соответствующих точкам излома. В трубе помещается набор расчетных областей, каждая из которых характеризуется своим набором параметров, в том числе начальными условиями. Область типа «сжатый газ» описывается вектором  $\mathbf{G} = (n_g, W_0, p_0, T_0)$ , где  $n_g$  – тип газа;  $W_0$  – объем, занимаемый областью в начальный момент времени;  $p_0$  – начальное давление газа,  $T_0$  – начальная температура газа. Область типа «реагирующая смесь» задается вектором  $\mathbf{C} = (n_m, W_0, E_{ch}, t_{ign})$ , где  $n_m$  – тип смеси;  $E_{ch}$  – полная химическая энергия смеси;  $t_{ign}$  – момент воспламенения. Область типа «порох»

описывается вектором  $\mathbf{P} = (n_p, W_0, \omega, t_{ign})$ , где  $n_p$  – марка пороха;  $\omega$  – масса пороха. Область типа «деформируемый поршень» характеризуется типом материала  $n_d$  и массой поршня  $m_d$ :  $\mathbf{D} = (n_d, m_d)$ . Граница (в том числе метаемый элемент) описывается вектором вещественных параметров  $\mathbf{V} = (m, p_f)$ , где  $m$  – масса границы;  $p_f$  – давление форсирования (минимальное значение давления, при котором граница начинает двигаться). Одно решение, таким образом, кодируется набором необходимых векторов, обозначенным за  $\mathbf{X}$ .

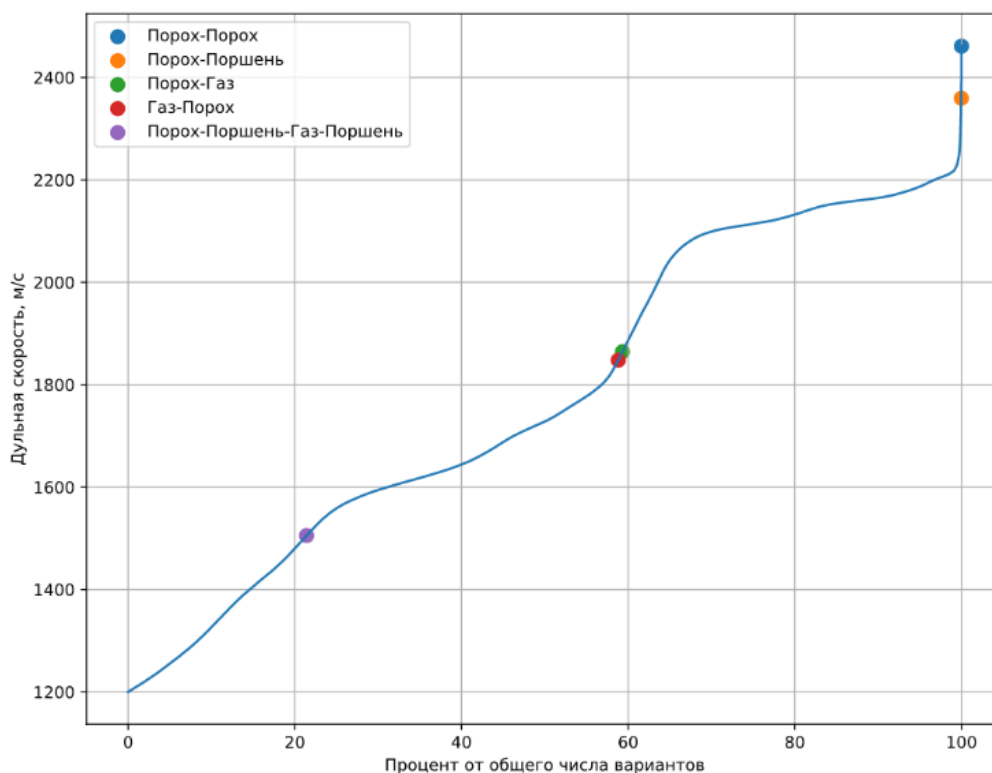
Общая задача структурно-параметрического синтеза КГБУ состоит в нахождении такого набора  $\mathbf{X}$ , который обеспечивает оптимальное значение выбранного критерия при заданных ограничениях. Для решения этой задачи используется вариация генетического алгоритма, для которого разработаны алгоритмы кроссовера и мутации [16]. Единичное решение (хромосома)  $\mathbf{X}$  представляет собой совокупность описанных выше векторов:  $\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{G}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{V}$  и  $\mathbf{S}$ .

На рис. 2 показан пример решения задачи структурно-параметрического синтеза для КГБУ 125 / 85 (калибр первичного ствола – 125 мм, калибр вторичного ствола – не менее 85 мм). Следует подчеркнуть, что структуры формируются автоматически в процессе работы алгоритма структурно-параметрического синтеза, а не вручную. Как видно из результатов, для этой группы калибров с точки зрения критерия дульной скорости наилучшей оказывается система класса «порох-порох», т. е. эстафетная схема. Для малых калибров (30/23, например) оптимальной структурой является классическая легкогазовая установка с деформируемым поршнем (см. [16]).



а

Рис. 2. Решение задачи структурно-параметрического синтеза 125/85 КГБУ:  
а – эволюция структур лучших решений КГБУ (окончание на с. 44)



б

Рис. 2. Окончание: б – эволюция дульной скорости МЭ для соответствующих вариантов структур (начало на с. 43)

В результате проведенного исследования разработан научно-методический аппарат для решения задач баллистического проектирования газодинамических баллистических установок, включающий методики анализа и синтеза комбинированных газодинамических баллистических установок, позволяющий учитывать многообразие их возможных структурно-компоновочных схем и осуществлять расчет внутрибаллистических параметров и решение задач баллистического проектирования для дальнейшей выработки рекомендаций по формированию технического облика комбинированных газодинамических баллистических установок в части их внутрибаллистических параметров: структурно-компоновочной схемы, условий заряжания и геометрии канала ствола.

### Список использованных источников и литературы

1. Hypervelocity launchers / Ed. by F. Seiler and O. Igra. Springer, 2016.
2. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях / Н. А. Златин, А. П. Красильщиков, Г. И. Мишин, Н. Н. Попов. – Москва : Наука, 1974.
3. Герасимов, А. В. Защита космических аппаратов от техногенных и естественных осколков. Эксперимент и численное моделирование / А. В. Герасимов, С. В. Пашков, Ю. Ф. Христенко // Вестник Томского государственного университета. Матем. и мех. – 2011. – № 4. – С. 70–78.
4. Русяк, И. Г. Физические основы и газовая динамика горения порохов в артиллерийских системах / И. Г. Русяк, А. М. Липанов, В. М. Ушаков. – Ижевск ; Москва : РХД, 2016.

5. Хоменко, Ю. П. Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах / Ю. П. Хоменко, А. Н. Ищенко В. З., Касимов. – Новосибирск : Издательство СО РАН, 1999.
6. Bykov, N. V. Numerical modelling of physical processes in a ballistic laboratory setup with a tapered adapter and plastic piston used for obtaining high muzzle velocities // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. 572, 012055.
7. Пилюгин, Н. Н. Методы повышения эффективности легкогазовых установок / Н. Н. Пилюгин, Н. Е. Леонтьев, А. Н. Голубятников // Успехи механики. – 2003. – № 2. – С. 97–124.
8. Зоркин, В. А. Анализ баллистических возможностей установки с присоединенными камерами подгона / В. А. Зоркин, Н. А. Мазаев, А. И. Сафронов // Известия вузов. Физика. – 2013. Т. 56, № 6–3. – С. 27–29.
9. Ермолаев, Б. С. Конвективное горение и низкоскоростная детонация пористых энергетических материалов / Б. С. Ермолаев, А. А. Сулимов. – Москва : ТОРУС ПРЕСС, 2017.
10. Быков, Н. В. Влияние уширения газового ресивера на баллистические характеристики одноступенчатых установок на сжатом газе / Н. В. Быков, И. Е. Шестаков // ЖТФ. – 2020. – Т. 90. – Вып. 3. – С. 365–371.
11. Kruczynski D., Massey D. Combustion Light Gas Gun Technology Demonstration, ADA462130, 2007.
12. Быков, Н. В. Математическое моделирование и визуализация внутрикамерных процессов в баллистических установках с гидродинамическим эффектом / Н. В. Быков, Е. А. Нестеренко // Научная визуализация. – 2015. – Т. 7, № 1. – С. 65–77.
13. Быков, Н. В. Оптимизация процесса передачи энергии при одноступенчатом разгоне тел сжатым газом // ПМТФ. – 2019. – Т. 60, № 3. – С. 29–37.
14. Особенности процесса высокоскоростной экструзии полиэтилена при ускорении метаемых элементов в баллистических установках / Н. В. Быков, А. С. Карнейчик, А. А. Макаров, М. С. Товарнов // ПМТФ. – 2019. – Т. 60, № 4. – С. 206–216.
15. Bykov N. V., Shestakov I. E. Simulation of piston acceleration in a single-stage combustion light gas gun // AIP Conference Proceedings. 2021. Vol. 2318. 060002.
16. Bykov N., Tovarnov M. Evolutionary method for combined ballistic launchers structural and parametric optimization // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2103, 020003.

Секция 1  
**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРЯЖЕННЫХ ЗАДАЧ  
МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД**

УДК 004.94:629.735.4

**Разработка и реализация математической модели движения гексакоптера  
и системы пространственной визуализации результатов  
вычислительного эксперимента**

*И. В. Басов, С. М. Хуссин, В. Г. Суфиянов*

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*В статье рассматриваются вопросы построения математической модели движения гексакоптера в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Разработан программно-вычислительный комплекс математического моделирования и пространственной визуализации движения гексакоптера. Для трехмерной визуализации выбрана мультиплатформенная система Unigine, обладающая рядом преимуществ по сравнению с другими программными средствами.*

**Ключевые слова:** трехмерная визуализация, гексакоптер, математическое моделирование, программно-вычислительный комплекс.

В нынешнем мире достаточно высокий уровень развития компьютерных технологий. Это позволяет также быстро развиваться рынку симуляторов – программных продуктов, которые предназначены для моделирования и визуализации реальных объектов в виртуальном пространстве. Использование симуляторов позволяет еще на этапе проектирования объектов исследовать их характеристики, уменьшая при этом количество опасных и дорогостоящих натуральных экспериментов.

В данной работе представлены результаты разработки программно-вычислительного комплекса математического моделирования и визуализации движения гексакоптера с использованием универсальной среды разработки трехмерных проектов Unigine [1].

## Описание гексакоптера

Гексакоптер (рис. 1) состоит из следующих составных элементов [2]: шестилучевой рамы с возможными дополнительными установками; 6 моторов; 6 несущих винтов, иногда с защитой этих винтов; электронные контроллеры скорости; аккумулятор; полетный контроллер.



Рис. 1. 3D-модель гексакоптера

Электронный контроллер скорости позволяет полетному контроллеру управлять скоростью и направлением вращения мотора. Большинство электронных контроллеров скорости позволяют мотору вращаться, как правило, только в одном направлении. Полетный контроллер – это плата, содержащая центральный процессор, память, дополнительные порты ввода/вывода, аналого-цифровой преобразователь. Полетные контроллеры оснащены специальными сенсорами, такими как акселерометр, гироскоп, инерционный измерительный блок, магнитометр, барометр, система геопозиционирования, датчик расстояния [2].

## Математическая модель гексакоптера

Для трехмерной визуализации движения гексакоптера необходимо определить системы координат (рис. 2).

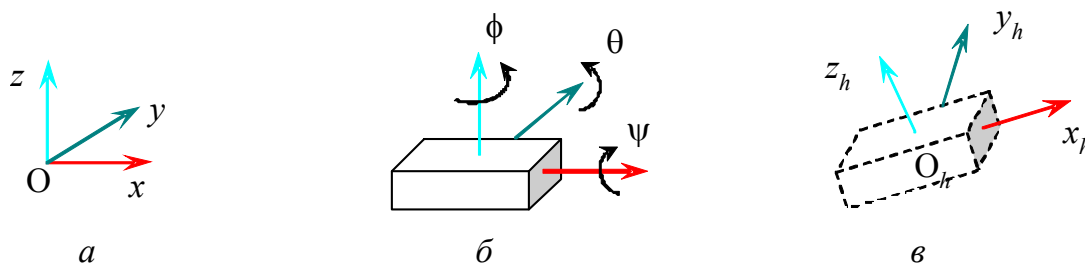


Рис. 2. Системы координат движения гексакоптера: а – земная система координат; б – углы поворота гексакоптера относительно земной системы координат; в – система координат гексакоптера при повороте



На рис. 2 представлена локальная земная система координат  $O_{uz}$ , по отношению к которой движется инерционная система координат, связанная с центром масс гексакоптера. Углы крена, тангажа и рысканья  $\phi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$  определяют вращение гексакоптера относительно инерционной системы координат  $O_h x_h y_h z_h$ .

В данной работе для описания движения гексакоптера используется математическая модель, представляющая собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений с учетом управляющих параметров и внешних возмущающих факторов, влияющих на движение гексакоптера [3, 4]:

$$\begin{cases} \dot{u} = -\frac{k_t}{m}u + g \sin(\theta) - (qw - vr) + \frac{F_{d1}}{m}, \\ \dot{v} = -\frac{k_t}{m}v + g \sin(\phi) \cos(\theta) - (ru - pw) + \frac{F_{d2}}{m}, \\ \dot{w} = \sum_{i=1}^6 |T_i| - \frac{k_t}{m}w + g \cos(\phi) \cos(\theta) - (pv - qu) + \frac{F_{d3}}{m}, \\ \dot{p} = -\frac{\sqrt{3}}{2J_x}l(|T_3| - |T_4| - |T_5| + |T_6|) - \frac{k_r}{J_x}p - qr \frac{(J_z - J_y)}{J_x} + \frac{M_{d1}}{J_x}, \\ \dot{q} = -\frac{1}{2J_y}l(|T_3| - |T_4| + |T_5| - |T_6| + 2|T_1| - 2|T_2|) - \frac{k_r}{J_y}q - pr \frac{(J_x - J_z)}{J_y} + \frac{M_{d2}}{J_y}, \\ \dot{r} = -\frac{\rho C_Q AR^3}{J_z}l(\omega_1^2 + \omega_4^2 + \omega_6^2 - \omega_2^2 - \omega_3^2 - \omega_5^2) - \frac{k_r}{J_z}r - pq \frac{(J_y - J_x)}{J_z} + \frac{M_{d3}}{J_z}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $u, v, w$  – определяют вектор линейной скорости  $\mathbf{V} = (u, v, w)^T$ ;  $p, q, r$  – определяют вектор угловой скорости  $\mathbf{\Omega} = (p, q, r)^T$ ;  $m$  – масса гексакоптера;  $k_t$  – постоянная аэродинамической силы;  $g$  – гравитационная постоянная;  $T_i$  и  $\omega_i$  – подъемные силы и скорости вращения винтов,  $i = 1, 2, \dots, 6$ ;  $J_x, J_y, J_z$  – инерционные моменты твердого тела вдоль осей  $x, y, z$ ;  $k_r$  – постоянная аэродинамического момента;  $l$  – расстояние от центра тяжести до центров двигателей;  $C_Q$  – коэффициент крутящего момента двигателя;  $\rho$  – плотность воздуха;  $R, A$  – радиус и площадь диска, образованного винтом;  $\mathbf{F}_{dist} = (F_{d1}, F_{d2}, F_{d3})^T$  – возмущающие силы;  $\mathbf{M}_{dist} = (M_{d1}, M_{d2}, M_{d3})^T$  – возмущающие моменты.

Численное решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (1) находится методом Рунге – Кутты четвертого порядка [4].

Положение гексакоптера в земной системе координат определяется из следующего соотношения:

$$\ddot{\xi} = (\ddot{x} \ \ddot{y} \ \ddot{z})^T = \mathbf{C}_b^n \cdot \mathbf{V}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{C}_b^n$  – матрица поворота

$$C_b^n = \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \varphi \sin \theta \cos \psi - \cos \varphi \sin \psi & \sin \varphi \sin \psi + \cos \varphi \sin \theta \cos \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \cos \varphi \cos \psi + \sin \varphi \sin \theta \sin \psi & \cos \varphi \sin \theta \sin \psi - \sin \varphi \cos \psi \\ -\sin \theta & \sin \varphi \cos \theta & \cos \varphi \cos \theta \end{pmatrix}.$$

Угловое положение гексакоптера относительно инерционной системы координат определяется из соотношения:

$$\ddot{\sigma} = (\ddot{\varphi} \quad \ddot{\theta} \quad \ddot{\psi})^T = \mathbf{S} \cdot \Omega, \quad (3)$$

где  $\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{pmatrix}$  – кососимметричная матрица.

Проинтегрировав уравнения (2) и (3), получим уравнения для связи с положением гексакоптера в пространстве.

Разработанный программно-вычислительный комплекс содержит 4 модуля, которые представлены на рис. 3.

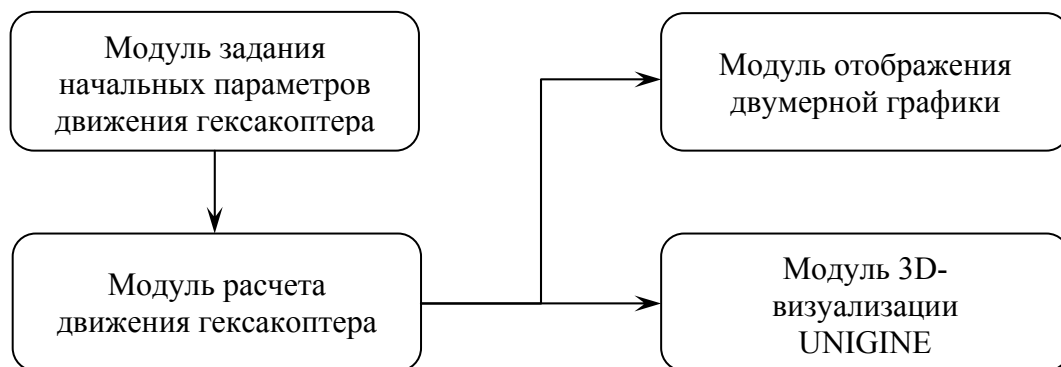


Рис. 3. Структура программно-вычислительного комплекса моделирования движения гексакоптера

Модуль задания начальных параметров движения гексакоптера предназначен для взаимодействия с пользователем для ввода и редактирования начальных параметров гексакоптера.

Модуль расчета движения гексакоптера решает систему обыкновенных дифференциальных уравнений (1) методом Рунге – Кутты.

Модуль отображения двумерных графиков предназначен для построения двумерных графиков результатов моделирования движения гексакоптера.

В модуле 3D-визуализации Unigine связываются параметры трехмерной геометрической модели и отображается пространственное движения гексакоптера по результатам моделирования движения гексакоптера.

### **Разработка программно-вычислительного комплекса моделирования и визуализации движения гексакоптера**

Трехмерная геометрическая модель гексакоптера создавалась с использованием специализированной программы создания и редактирования трехмерных объектов Blender.

Средствами Unigine в среде Visual Studio Code на языке программирования C# был разработан программно-вычислительный комплекс (рис. 4) моделирования движения гексакоптера по модели (1) и определены связи между параметрами математической и геометрической моделей.



Рис. 4. Программный комплекс моделирования и визуализации движения гексакоптера

Unigine является мультиплатформенной средой разработки 3D- и 2D-проектов, т. е. с помощью средств Unigine имеется возможность создания приложений в операционных системах Windows и Linux. Он также используется для создания игр, систем виртуальной реальности, программ интерактивной визуализации, различных трехмерных имитаторов.

Разработанный программно-вычислительный комплекс предназначен для численного моделирования и трехмерной визуализации движения гексакоптера с учетом влияния внешних сил и моментов. Дальнейшее использование разработанного комплекса связано с реализацией модуля управления динамикой гексакоптера при наличии стохастических возмущений с марковскими скачками [8].

### Результаты моделирования

Рассмотрим задачу моделирования подъема гексакоптера. Определим скорости вращения винтов в виде логистической функции:

$$\omega_i = \frac{\omega_{\max}}{1 + e^{-\gamma(t-t_0)}}, \quad i = 1, 2, \dots, 6, \quad (4)$$

где  $\omega_{\max}$  – максимальная скорость вращения винтов;  $\gamma$  – коэффициент управляющий темпом набора скорости;  $t_0$  – время достижения половины максимальной скорости вращения винтов;  $t$  – текущее время.

Положения гексакоптера в пространстве определяются интегрированием уравнения (2):

$$\dot{\xi}(t) = \dot{\xi}(0) + \int_0^t \mathbf{C}_b^n \cdot \mathbf{V} dt, \quad (5)$$

$$\xi(t) = \xi(0) + \int_0^t \dot{\xi}(t) dt, \quad (6)$$

а вращение определяются интегрированием уравнения (3):

$$\dot{\sigma}(t) = \dot{\sigma}(0) + \int_0^t \mathbf{S} \cdot \mathbf{\Omega} dt, \quad (7)$$

$$\sigma(t) = \sigma(0) + \int_0^t \dot{\sigma}(t) dt. \quad (8)$$

Начальные значения для решения системы уравнений (1), (2), (3) принимались равными нулю:

$$\begin{aligned} (x(t), y(t), z(t), \dot{x}(t), \dot{y}(t), \dot{z}(t), \phi(t), \theta(t), \psi(t), \dot{\phi}(t), \dot{\theta}(t), \dot{\psi}(t)) = \\ = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0). \end{aligned}$$

Параметры вращения винтов (4) задавались следующим образом:

$$\gamma = 1, \quad t_0 = 10,$$

а значение  $\omega_{\max}$  фиксировалось на уровне  $\omega_{\max} = 580$  и постепенно уменьшалось до  $\omega_{\max} = 505$ .

На рис. 5 представлен график зависимости скорости вращения винтов от времени.

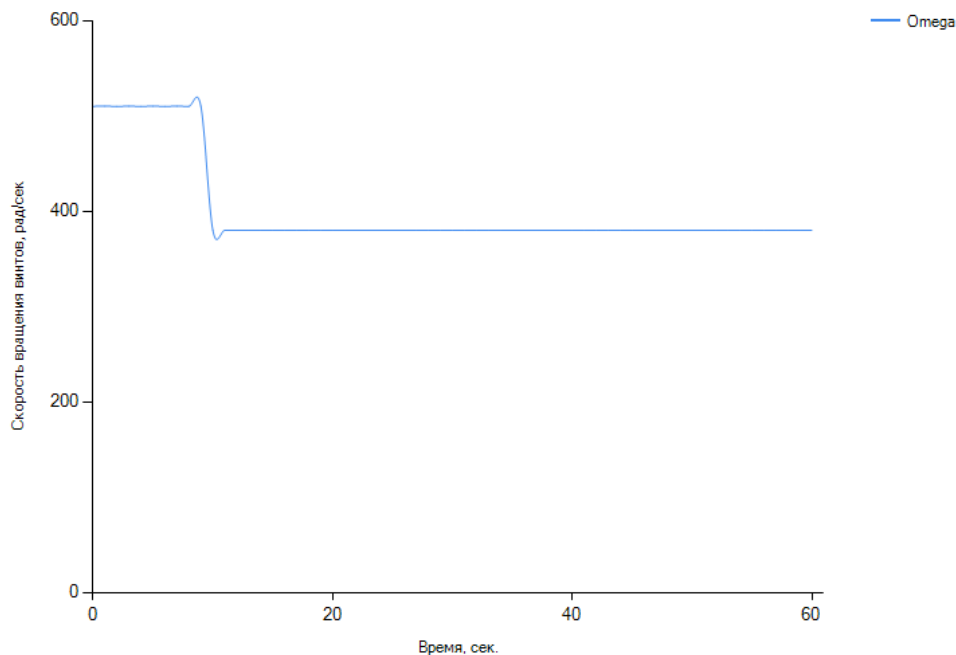


Рис. 5. Диаграмма скорости вращения винтов

Результаты моделирования подъема гексакоптера при различных значениях  $\omega_{\max}$  представлено на рис. 6.

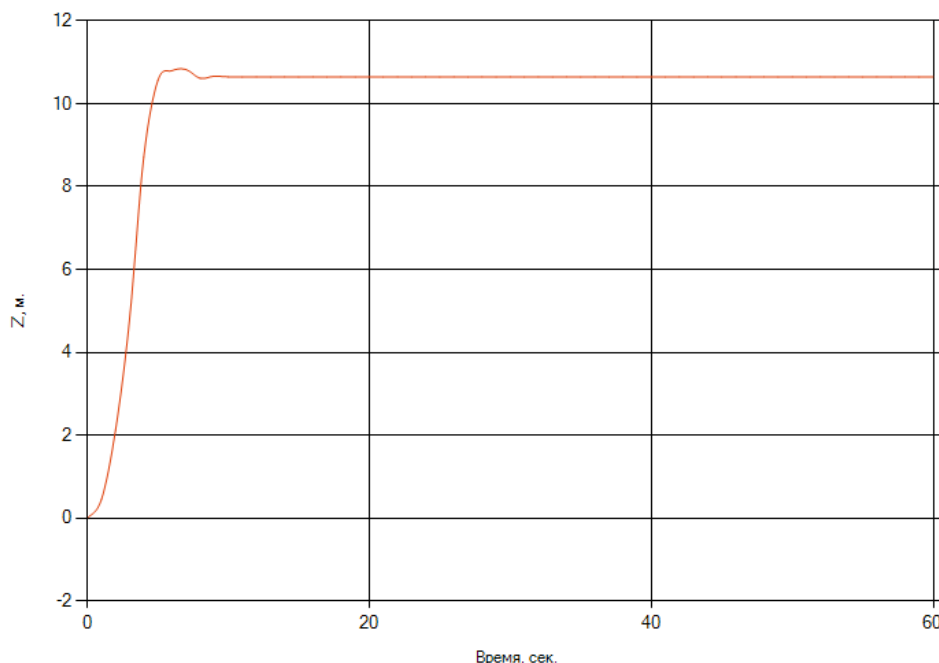


Рис. 6. Динамика набора высоты гексакоптером

Как видно из рис. 6, гексакоптер поднимается до определенной высоты, начинает снижение при уменьшении скорости вращения винтов и зависает на определенной высоте при прекращении уменьшения скорости вращения.

Дальнейшее использование разработанного комплекса связано с реализацией модуля управления динамикой гексакоптера при наличии стохастических возмущений с марковскими скачками [8].

## Выводы

В ходе выполнения работы реализована математическая модель, описывающая движение гексакоптера. Определены связи между параметрами математической и геометрической моделей и разработан программно-вычислительный комплекс моделирования и трехмерной визуализации движения гексакоптера. Представлены примеры моделирования движения гексакоптера и определены скорости вращения винтов, при которых гексакоптер «зависает» на заданной высоте.

## Список использованных источников и литературы

1. Unigine // Unigine. 2005-2021. – URL: <https://unigine.com/ru/> (дата обращения: 01.04.2021).
2. ДроноМания : онлайн-журнал о дронах // ДроноМания. – 2021. – URL: <https://dronomania.ru> (дата обращения: 02.04.2021).
3. Ibrahim, I. N. Modeling and predictive control of nonlinear coupled and under actuated dynamics of a hexacopter // Вестник ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2016. – № 4 (72). – С. 35–38.

4. *Ibrahim, I. N.* Designing a real mathematical model of a hexacopter in the inertial frame // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2017. – № 1. – С. 91–94.
5. *Вержбицкий, В. М.* Основы численных методов : учебник для вузов. – Москва : Высш. шк., 2002. – 840 с.
6. Digboxdji официальный дилер // digboxdji. 2014–2021. – URL: <https://digbox.ru> (дата обращения: 02.04.2021).
7. NeoAxis Engine // NeoAxis. 2008 – 2021. – URL: <http://www.neoaxis.com> (дата обращения: 02.04.2021).
8. *Хуссин, С. М.* Разработка программно-вычислительного комплекса моделирования движения гексакоптера при наличии стохастических возмущений с марковскими скачками / С. М. Хуссин, В. Г. Суфиянов // Выставка инноваций – 2020 (осенняя сессия) : сборник материалов XXX Республиканской выставки-сессии студенческих инновационных проектов. – 2021. – С. 221–226.

## Исследование влияния геометрического облика ракеты на характеристики активного участка полета

*Е. К. Виссарионова*

Воткинский филиал ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

*Представлена математическая модель полета ракеты на активном участке траектории. Исследовано влияние диаметра миделя ракеты на основные параметры полета и получены функции зависимостей. На основании этих зависимостей построены графики влияния калибра ракеты на параметры полета.*

**Ключевые слова:** ракета, активный участок полета, скорость ракеты, параметры движения.

В настоящее время интеллектуальное и технологическое развитие человечества достигло состояния, когда создаются гиперзвуковые ракеты, которые имеют большую дальность, маневренность и при этом являются легкими, надежными и экономичными.

Для того, чтобы полет ракеты был эффективным необходимо снизить действенность как можно большего количества факторов, препятствующих движению.

Одним из основных факторов, определяющих сопротивляемость движению, является геометрический облик (форма) ракеты. Важнейшей характеристикой, определяющей облик является калибр ракеты – диаметр его максимального сечения (диаметр миделя).

Как известно, траектория полета ракеты состоит из двух участков: активный и пассивный. От важнейших характеристик ракеты – скорости и дальности полета, зависят параметры движения в конце АУТ [1]. К этим параметрам относятся:  $H$ ,  $L$  – высота и дальность полета в конце АУТ;  $V$  – скорость движения ракеты (по Циолковскому);  $V_g$ ,  $V_a$ ,  $V_h$  – гравитационные, атмосферные и угловые потери скорости.

Исследуем влияние диаметра миделя –  $D_m$  на эти параметры.

Для этого в программной среде MathCAD 14 воспользуемся математической моделью полета ракеты [2], учитывающей свойства, выраженные в параметрах стандартной атмосферы [ГОСТ 4401–81]:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{R_p - F_a \cdot p(H) \cdot \cos[\alpha(M)] - V_a}{m(t)} - g(H) \cdot \sin[Q(\mu)],$$

$$\frac{dH}{dt} = V \cdot \sin[Q(\mu)],$$

$$\frac{dL}{dt} = V \cdot \cos[Q(\mu)],$$

$$\frac{dm}{dt} = -G,$$

$$\frac{dV_i}{dt} = \frac{R_p - F_a \cdot p(H) - X}{m(t)} - g(H) \cdot \sin[Q(\mu)],$$

$$\frac{dV_h}{dt} = \frac{F_a \cdot p(H)}{m(t)},$$

$$\frac{dV_a}{dt} = \frac{X_a}{m(t)},$$

$$\frac{dV_g}{dt} = g(H) \cdot \sin[Q(\mu)],$$

где  $F_a$  – площадь среза сопла;  $R_p$  – пустотная тяга двигателя, принимается зависящей от времени;  $X_a$  – сила лобового сопротивления, которая зависит от скорости полета.

Давление и ускорение свободного падения изменяются по высоте и в общем случае представляются зависимостями  $p = p(H)$  и  $g(H)$ . Угол наклона вектора скорости к горизонту задается зависимостью  $Q = Q(\mu)$ . Значение угла атаки зависит от числа Маха и в модели представлено в форме  $\alpha = \alpha(M)$ . Зависимость массы ракеты от времени принимается в виде:  $m(t) = m_0 - G \cdot t$  (где  $m_0$  – стартовая масса, а  $G$  – секундный массовый расход).

На основе этой математической модели полета определим зависимости параметров движения ракеты от диаметра миделя, который изменяется от 0,6 м до 2,0 м. Данные зависимости представим в графической форме (рис. 1–6).

Анализ этих зависимостей позволяет утверждать следующее. При изменении диаметра миделя от 0,6 до 2,0 м дальность АУТ сокращается в 1,9 раза. В результате аппроксимации этого графика (рис. 1) методом наименьших квадратов (МНК) получена функция

$$L_k(D_m) = 31763,051 - 9028,27 \cdot D_m^{1,01} \dots$$

Полученная функция позволяет утверждать, что дальность АУТ линейно зависит от диаметра миделя ракеты.

Рассмотрим влияние диаметра миделя  $D_m$  на высоту конца АУТ  $H_k$ . При увеличении диаметра  $D_m$  высота АУТ уменьшилась в 1,75 раза (рис. 2). Аппроксимация этих данных методом наименьших квадратов позволила получить функцию

$$H_k(D_m) = 38368,456 - 9717,4 \cdot D_m^{1,05} \dots$$



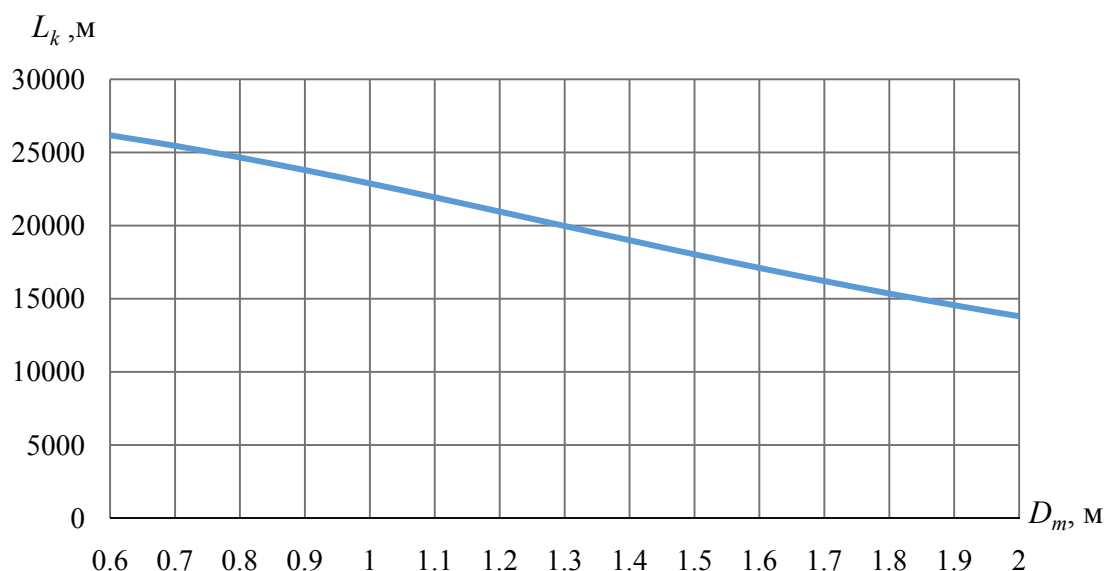


Рис. 1. График зависимости дальности АУТ от диаметра миделя

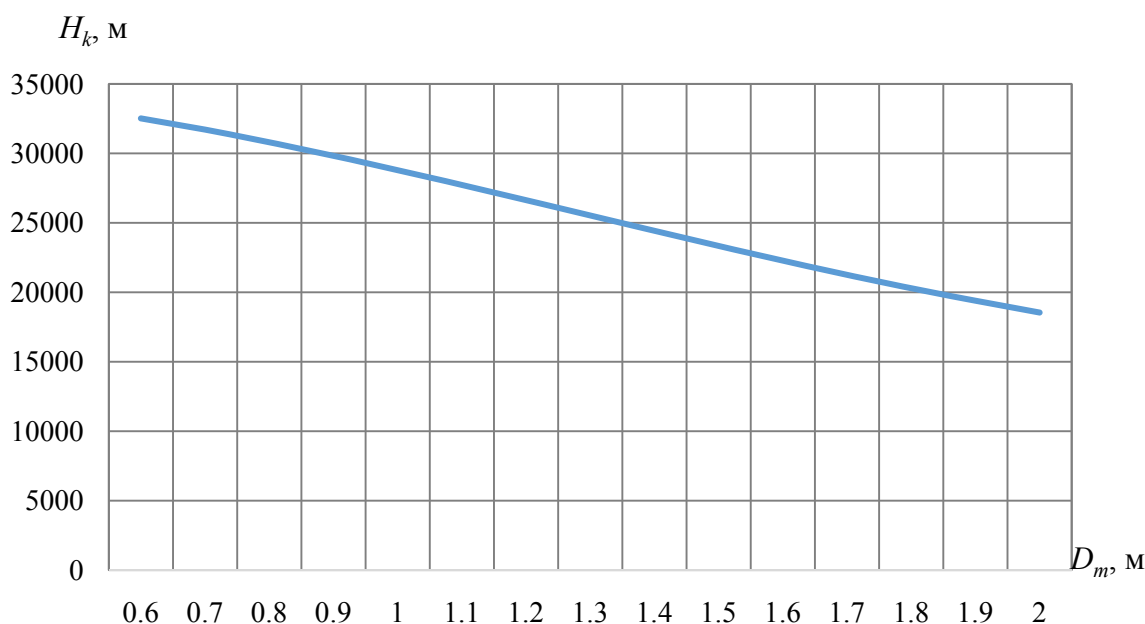


Рис. 2. График зависимости высоты АУТ от диаметра миделя

Анализ функции  $H_k$  позволяет утверждать, что связь между высотой точки конца АУТ и диаметром миделя ракеты – линейная.

Зависимость скорости ракеты в конце АУТ от диаметра миделя по форме напоминает параболу (рис. 3). С увеличением диаметра миделя в 3,3 раза скорость ракеты уменьшается в 2,1 раза. Математически эта зависимость имеет вид:

$$V_k(D_m) = 2001,428 - 503,63 \cdot D_m^{1,25}.$$

Помимо основных параметров движения ракеты не менее влиятельными являются потери скорости.

Потери обусловлены влиянием атмосферного воздуха на тягу ракетного двигателя (высотные потери), притяжения Земли (гравитационные потери) и аэродинамического сопротивления (атмосферные потери) [3].

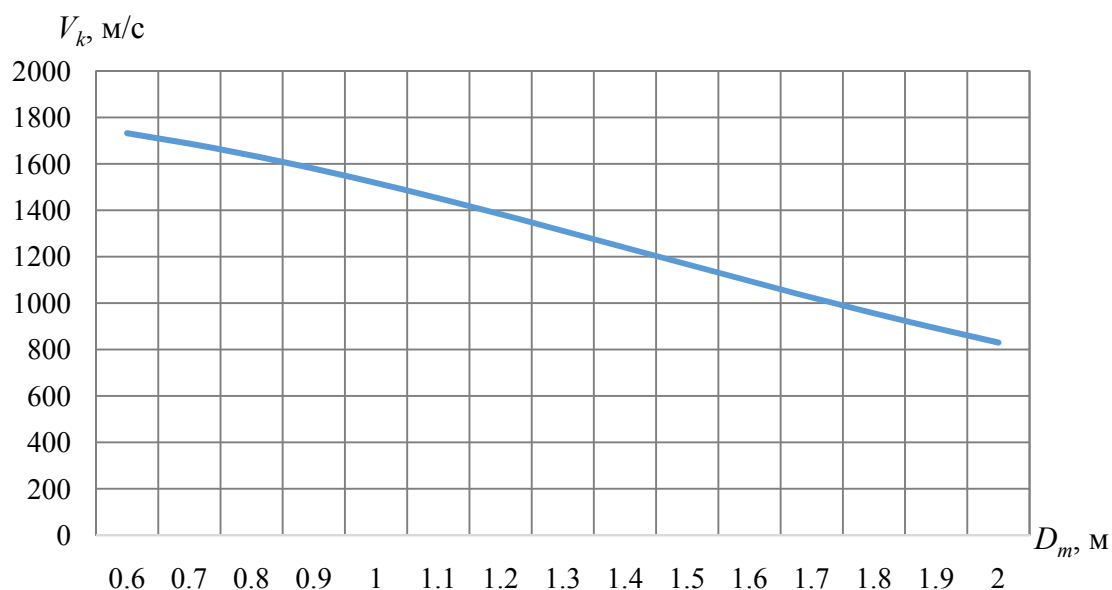


Рис. 3. График зависимости скорости в конце АУТ от диаметра миделя

Высотные потери скорости количественно оцениваются показателем  $V_h$ . Их влияние с использованием математической модели представлено на графике (рис. 4). Заметим, что с изменением калибра ракеты  $D_m$  высотные потери скорости ракеты увеличиваются в 1,2 раза. Сам график зависимости (рис. 4) имеет вид плавно растущей параболы. Аппроксимация этого графика позволила математически определить функцию зависимости высотных потерь на АУТ от диаметра миделя:

$$V_h(D_m) = 78,8932 + 5,9066 \cdot D_m^{1,76},$$

что подтверждает это утверждение.

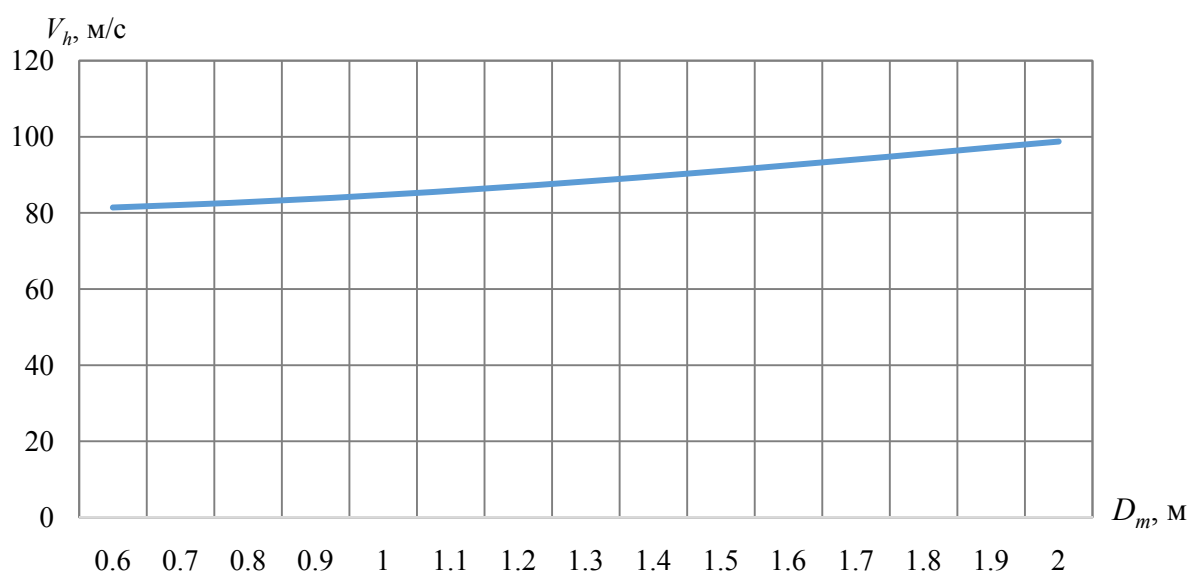


Рис. 4. График зависимости высотных потерь на АУТ от диаметра миделя

Атмосферные потери. Как показали расчеты, с ростом диаметра миделя потери скорости ракеты выросли в 7,8 раза с 130,351 м/с до 1022 м/с. Это связано, в первую очередь, с увеличением диаметра, так как увеличивается сила лобового сопротивления за счет увеличения характерной площади сечения ракеты. Анализ графика зависимости указывает на зависимость в виде резко возрастающей функции. Математическое описание зависимости имеет вид:

$$V_a(D_m) = -169,8617 + 526,825 \cdot D_m^{1,2}.$$

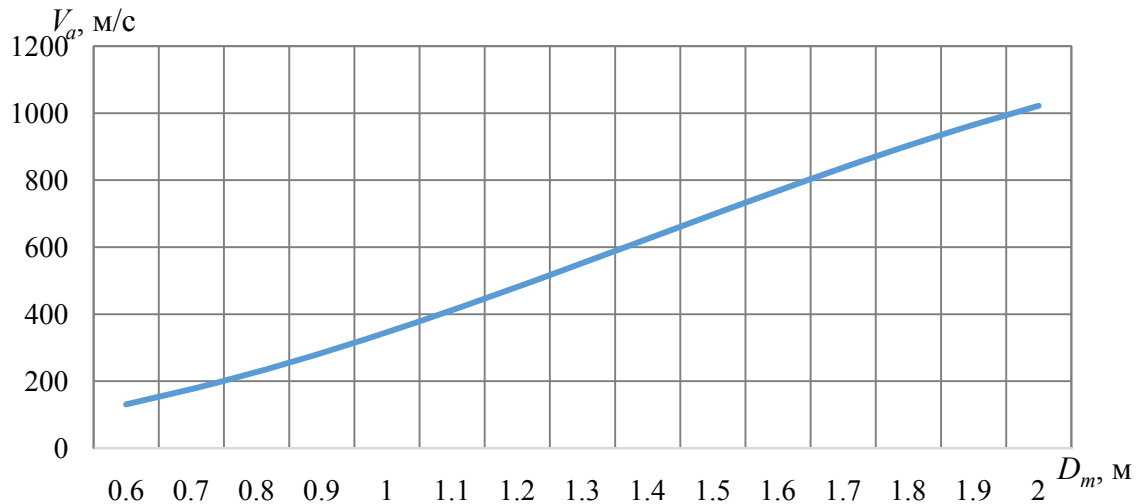


Рис. 5. График зависимости атмосферных потерь на АУТ от диаметра миделя

Гравитационные потери. Как показывают расчеты (рис. 6), они слабо влияют на изменение скорости полета ракеты. С увеличением максимального диаметра ракеты  $D_m$  гравитационные потери выросли всего в 1,001 раза со значения 529,144 м/с до 529,632 м/с. График имеет практически горизонтальную прямую. Математически эти изменения можно записать так:

$$V_g(D_m) = 528,92 + 0,363 \cdot D_m^{0,993}.$$

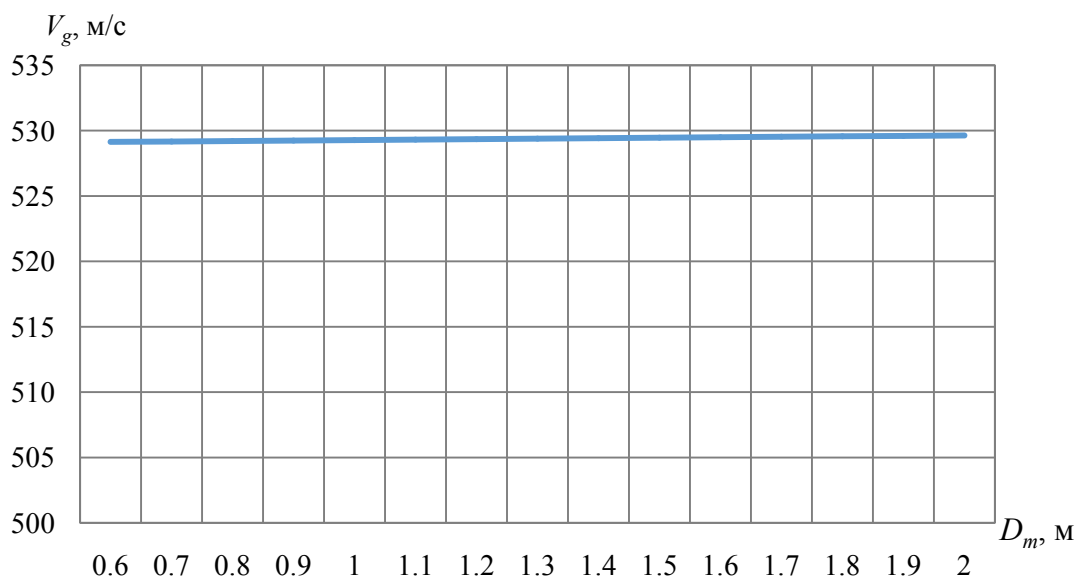


Рис. 6. График зависимости гравитационных потерь на АУТ от диаметра миделя

Итак, подведем итоги. В результате анализа зависимости параметров движения ракеты от диаметра миделя  $D_m$  с помощью моделирования полета ракеты было установлено, что с увеличением диаметра миделя от 0,6 до 2,0 м полетные характеристики ракеты ( $V_k, L_k, H_k$ ) ухудшаются. При этом практически в два раза сокращается дальность АУТ и уменьшается скорость полета ракеты.

Менее чувствительно к изменению диаметра  $D_m$  – высота АУТ. С увеличением калибра ракеты значительно увеличиваются атмосферные потери скорости ракеты. В то же время высотные и гравитационные потери скорости незначительно зависят от диаметра миделя ракеты.

Очевидно, для того, чтобы добиться наилучших полетных характеристик ракеты, необходимо выбирать минимально возможный (ограниченный прочностью) калибр ракеты и использовать максимально плотную компоновку.

### **Список использованных источников и литературы**

1. Самарский, А. М. Теория полета / А. М. Самарский, В. В. Чернов. – Москва : Изд-во МАИ, 1984. – 80 с.
2. Идентификация проектных параметров баллистических ракет : учеб. пособие / В. Н. Гринберг, В. Г. Толмачев, С. Н. Храмов, Б. А. Якимович. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2002. – 180 с.
3. Лысенко, Л. Н. Наведение баллистических ракет : учеб. пособие / Л. Н. Лысенко. – Москва : Издательство МГТУ им. Баумана, 2016. – 445 с.
4. Рыбин, А. Н. Особенности конструктивно-компоновочных схем головных частей ракет и ракетоносителей / А. Н. Рыбин, Ф. А. Уразбахтин // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке : сб. трудов II Всеросс. науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием. – Ижевск : ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2013. – С. 188–189.

## **Программно-математическое обеспечение для автоматизации процедуры определения лобового сопротивления в баллистическом эксперименте**

*С. Н. Илюхин, В. И. Ананьев*

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

*В статье рассмотрен алгоритм проведения баллистического эксперимента по определению коэффициента лобового сопротивления. Приводится описание автоматизации рассмотренной в статье методики. Описаны преимущества автоматизированного эксперимента по сравнению с «ручным».*

**Ключевые слова:** баллистическая трасса, хронографы, коэффициент лобового сопротивления, автоматизация, моделирование полета.

### **Введение**

Создание новой артиллерийской системы или ракетного комплекса всегда начинается с баллистического проектирования [1]. Однако при решении задач проектной баллистики необходимо вводить множество допущений и упрощений, и полученный в ходе математического моделирования результат носит приближенный, оценочный характер, который позволяет конструкторам-разработчикам выявлять существенные недостатки системы и вносить необходимые новые уточняющие данные. Поэтому одним из основных направлений внешней баллистики считается экспериментальная баллистика. Проводимые летные испытания изделий и опытные стрельбы позволяют учесть действие тех факторов, которые были отброшены на этапе баллистического проектирования. Это позволяет не только оценить степень точности полученной математической модели, но и исследовать малоизученные или вновь обнаруженные явления в баллистике, а также уточнять и дополнять имеющуюся базу о различных процессах, которые охватывает баллистическая теория.

Как правило, экспериментальные исследования можно разделить на две взаимосвязанные составляющие: измерение физических величин и обработка результатов. Измерение физических величин подразумевает использование различной измерительной аппаратуры, а обработка результатов – математических средств.

### **Измерение скорости**

Одной из важнейших физических величин, подлежащих определению в ходе баллистического расчета, является скорость. Ее определяют различными способами, в основе которых лежат физические процессы и явления. Измерение

скорости осуществляется с помощью измерительных приборных устройств (ИПУ), расположенных вне объекта, скорость которого подлежит измерению. Выделяют две группы методов определения скорости: 1) методы определения средней скорости на фиксированном участке пути или за фиксированный промежуток времени и 2) методы определения действительной скорости [3].

Далее рассмотрен выбранный для автоматизации процедуры определения коэффициента лобового сопротивления метод определения скорости в баллистическом эксперименте. Данный метод относится к первой группе методов измерения скорости, а в качестве ИПУ используются два прибора, называемые хронографами.

Хронограф представляет собой приборное устройство, состоящее из двух блокирующих устройств, счетчика времени (хронометра) и вспомогательной электронной аппаратуры, производящей обработку или хранение информации о полученных в ходе измерения данных. Блокирующие устройства (БУ) расположены на фиксированном удалении друг от друга, называемым измерительной базой.

Первое БУ выдает электрический сигнал на аппаратуру обработки в момент прохождения телом рабочей плоскости, в этот момент запускается счетчик времени. При прохождении телом рабочей плоскости второго БУ выдается электрический сигнал, который останавливает счетчик. Аппаратура обработки рассчитывает среднюю скорость на участке пути, равном измерительной базе, по известной зависимости:

$$V_{\text{ср}} \approx \frac{\Delta l}{\Delta t},$$

где  $\Delta l$  – измерительная база,  $\Delta t$  – время, отсчитанное хронометром.

Баллистический эксперимент по определению скорости полета летательного аппарата (ЛА) или модели проводят на баллистических трассах (рисунок). Баллистической называют специально оборудованную стрелковую трассу, позволяющую в полигонных или лабораторных условиях производить стрельбу специальными моделями ЛА или реальными боеприпасами с измерением различных параметров движения тела в ряде точек траектории.

### **Определение коэффициента лобового сопротивления**

При полете осесимметричных неуправляемых ЛА в плотных слоях атмосферы наибольшее влияние на параметры траектории и движения оказывает продольная сила, возникающая при силовом воздействии среды на движущееся в ней тело.

В данной работе коэффициент лобового сопротивления  $c_{xa}$  рассчитывается аналитически по результатам опытных данных. В основе теоретического расчета лежит изменение кинетической энергии, или так называемый закон живых сил [5].

Приближенное аналитическое выражение для определения среднего коэффициента лобового сопротивления на измеряемом участке  $L$ , полученное согласно закону живых сил:

$$c_{xa}(M_{cp}) = \frac{4m}{S_{хар} L \rho} \cdot \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2},$$

где  $V_{cp} = \frac{V_1 + V_2}{2}$ ,  $M_{cp} = \frac{V_{cp}}{a}$ ,  $a$  – местная скорость звука,  $m$  – масса ЛА,  $S_{хар}$  – его характерная площадь,  $\rho$  – плотность атмосферы на уровне баллистической трассы,  $V_1, V_2$  – показания первого и второго хронографов соответственно.



Баллистическая трасса кафедры СМ-3 МГТУ им. Н. Э. Баумана

### **Баллистический эксперимент**

Баллистический эксперимент проводится согласно следующей последовательности. На большой баллистической трассе кафедры «СМЗ» МГТУ им. Н. Э. Баумана устанавливается два хронографа лазерного типа, и с помощью лазерного дальномера определяется точное расстояние между серединами измерительных баз обоих приборов. Ствол винтовки (или пистолета) размещается на специальном держателе-упоре. Дульный срез ствола оружия должен располагаться на наименьшем удалении от блокирующего устройства (лазерного датчика) первого (ближнего к стрелку) хронографа. В таком случае показания скорости первого прибора можно считать за начальную скорость при проведении цифрового моделирования.

После получения «качественной» выборки на ее основании по указанным ранее зависимостям определяется коэффициент лобового сопротивления для каждого выстрела, а затем и средний по выборке, который будет использован в математическом моделировании.

Для ускорения выполнения расчетов и уменьшения человеческих затрат проведена автоматизация указанной методики. Ниже изложен алгоритм автоматизации определения коэффициента лобового сопротивления.

В первую очередь осуществлена автоматизация записи результатов измерения скорости с приборов. При «ручной» работе на запись результатов одного



выстрела уходило от 7 до 9 секунд. Для проведения баллистического эксперимента в самом простом случае требуется около 210 выстрелов. Если рассчитать затраченное время на запись результатов, получается 1680 секунд, или 28 минут. В автоматическом режиме результаты измерений записываются непосредственно в память хронографа, откуда с интервалом в 1 секунду приходит обновленная информация на персональный компьютер (ПК). Выигрыш в затраченном времени очевиден.

Для проведения дальнейших расчетов необходимо занести полученные значения в Microsoft Excel. Ручной ввод показаний одного выстрела занимает в среднем 12 секунд времени (по 5 секунд на каждое из значений скорости и еще 2 на переключение между нужными ячейками), для 210 выстрелов получается около 42 минут затраченного времени. В случае автоматизированной работы с программным обеспечением, сопровождающим используемые хронографы 0022 АСС «Стрелец», под названием «Strely», необходимо лишь перенести данные из одного файла Excel в другой, общий для двух хронографов, что не занимает у оператора более 2 минут времени.

### **Функционал программного обеспечения**

Далее изложен алгоритм работы с программно-математическим обеспечением. Перед запуском необходимо заранее выбрать цель расчета: тарировка хронографов или определение коэффициента лобового сопротивления пневматической пули (или ее модификации) и моделирование полета. При первом запуске для каждого вида оружия необходима тарировка хронографов, поэтому необходимо сохранить в файлы «1.txt» и «2.txt» результаты тарировочной серии выстрелов. После этого в коде программы необходимо установить объем тарировочной выборки (нужная строка помечена комментарием). По умолчанию установлено значение 20 выстрелов. Также при необходимости можно изменить некоторые начальные данные, такие как диаметр пули, геометрические параметры ствольной системы, которые определяют угол бросания, плотность атмосферы на уровне баллистической трассы и другие.

После запуска программы появляется консоль, в которую нужно ввести расстояние между хронографами и массу пули, а также выбрать цель расчета (тарировка – 1, определение  $c_{xa}$  и моделирование полета – 0).

Далее при успешном открытии файлов на экран выводится сообщение «Файл открыт» и содержимое каждого файла с указанием номера выстрела. После представления данных, хранящихся во втором файле, на экран выводится тарировочный коэффициент, который одновременно с этим записывается в отдельный файл (при успешном открытии которого выводится аналогичное сообщение). Именно благодаря этому отпадает необходимость расета тарировочного коэффициента при каждом запуске программы.

После нажатия любой клавиши на экран выводятся два столбца с тарированными значениями скорости. В идеальном случае все значения первого столбца должны совпадать со значениями второго, но в силу множества случайных возмущающих факторов и отклонений начальных условий от номинальных различия все же будут. Поэтому они выводятся в консоль для того,

чтобы пользователь мог проверить корректность и точность осуществленной тарировки.

По нажатию клавиши консоль закрывается, а полученный тарировочный коэффициент записан в файл «Tar.txt».

Далее рассмотрен случай проведения эксперимента по определению коэффициента лобового сопротивления при известном тарировочном коэффициенте (который должен храниться в файле «Tar.txt» в папке с программой). В файлы «1.txt» и «2.txt» необходимо записать результаты итоговой выборки для определения  $c_{xa}$ .

После запуска программы предлагается ввести начальные данные и выбрать цель расчета, как и в предыдущем случае. После выбора «0» открывается файл «Tar.txt», и на экран выводится хранящееся в нем значение тарировочного коэффициента.

Далее, как и в предыдущем случае, на экран выводится содержимое файлов «1.txt» и «2.txt» с той лишь разницей, что теперь выводимые значения сразу тарированы. С целью экономии места данный этап не приведен.

На заключительном этапе работы программы рассчитываются коэффициенты лобового сопротивления для каждого выстрела, после чего рассчитывается средний  $c_{xa}$  по выборке, и все выводится на экран и в текстовый файл «resultsCxa.txt». Для проведения цифрового моделирования полета необходимо знать еще начальную скорость. Программа рассчитывает ее на основании данных с первого хронографа. Для удобства работы с программой значение средней начальной скорости тоже выводится на экран.

Теперь программа проводит моделирование полета пули на баллистической трассе. Интегрирование системы уравнений движения осуществляется численным методом Рунге – Кутта 4-го порядка с начальным шагом 0,0005 с. При приближении пули к точке пересечения траектории с горизонтом оружия шаг несколько раз делится для повышения точности момента останова цикла интегрирования.

Результаты интегрирования записываются в отдельный текстовый файл «Integration.txt».

## **Выводы**

По результатам проведенной автоматизации баллистического эксперимента можно выделить ряд существенных преимуществ по сравнению с «ручным» проведением. Время, необходимое для проведения эксперимента по определению коэффициента лобового сопротивления, сократилось более чем в два раза. В первую очередь это связано с автоматической записью результатов. Также немалую часть времени работы экспериментатора удалось сократить за счет автоматизации расчетов тарировочного коэффициента и  $c_{xa}$ . Цифровое моделирование позволило проанализировать некоторые физические (в том числе аэродинамические) явления, связанные с обтеканием малых быстровращающихся тел на дозвуковых скоростях полета. По результатам верификации компьютерного моделирования с результатами натуральных стрельб можно сделать

вывод о большой точности проведенной автоматизации, расчетов среднего по выборке коэффициента лобового сопротивления и, наконец, цифрового моделирования полета малого ЛА на баллистической трассе.

Достиженные результаты способствовали проведению дальнейших исследований и модификации программно-математического обеспечения. Сейчас на кафедре «СМ-3» МГТУ им. Н. Э. Баумана закончена работа по модификации описанного в данной статье программно-математического обеспечения для полной автоматизации указанной методики. Программа получила возможность самостоятельно получать данные с хронографов в режиме реального времени и рассчитывать коэффициент лобового сопротивления для каждого выстрела. Далее по завершении эксперимента программа удаляет «неудачные» выстрелы и рассчитывает средний  $c_{xa}$  по оставшейся выборке без участия оператора-экспериментатора. После указанной модификации время на проведение баллистического эксперимента было сокращено до минимально возможного, то есть времени, необходимого стрелку для проведения требуемого количества выстрелов. Это позволяет существенно увеличить объем выборки, которую можно использовать для наиболее точного расчета коэффициента лобового сопротивления.

Одним из важнейших достижений можно считать сокращение единовременно задействованных в эксперименте человек. Для «ручного» проведения эксперимента требовались по крайней мере 2 экспериментатора: стрелок, который производил запись результатов, и человек, снимающий показания скорости на втором хронографе. Теперь же достаточно одного стрелка, которому нет никакой необходимости в записи результатов каждого выстрела и дальнейших математических и статистических расчетов. Все это за него сделает программа.

### Список использованных источников и литературы

1. *Дмитриевский, А. А.* Внешняя баллистика : учебник для студентов вузов / А. А. Дмитриевский, Л. Н. Лысенко. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 2005. – 608 с.
2. *Медведева, Н. П.* Экспериментальная баллистика. Часть I (Методы измерения давления) : учеб. пособие. – Томск : Том. ун-т, 2006. – 172 с.
3. *Устинов, В. Ф.* Определение скорости движения тел : учебное пособие по курсу «Теория полета» / В. Ф. Устинов, Ю. Ф. Кольцов, Н. Н. Смирнов. – Москва : МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1983.
4. *Аэродинамика : учеб. пособие / [А. Г. Голубев и др.] ; А99 под ред. В. Т. Калугина.* – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 687 с.
5. *Илюхин, С. Н.* Методики нахождения коэффициента лобового сопротивления при проведении экспериментальных исследований на баллистической трассе // Молодёжный научно-технический вестник. – 2014. – № 1. – URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/704437.html>.
6. *Казаковцев, В. П.* К14 Обработка стрельб : метод. указания к лабораторным работам / В. П. Казаковцев, В. Д. Жилейкин. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 27 с.
7. ГОСТ 20058–80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения. – Москва : Издательство стандартов, 1981.

## Внутренняя баллистика гладкоствольных орудий

Д. А. Корепанова

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*Улучшена математическая модель гладкоствольного орудия, сформулированная еще в 2012 году, но имевшая проблемы с устойчивостью. Программная реализация улучшенной модели в среде Delphi показала, что она имеет устойчивое решение даже при методе Эйлера с шагом меньшим 10–4 с. Сделано предположение о возможности аппроксимации горения зерен простой формы горением сферических зерен того же максимального горящего свода. Численным экспериментом установлено, что лучшую сходимость дают сферические зерна той же начальной площади поверхности горения, что и реальные зерна. Численный эксперимент с призматическими зернами сложной формы, горящими в несколько фаз, показал невозможность их подобной аппроксимации с помощью сферических зерен.*

**Ключевые слова:** математическая модель, гладкоствольное орудие, устойчивость решения, метод интегрирования, горение, пороховые зерна, аппроксимация.

### Введение

Организация «Gunnery Fire Control Group» несколько лет назад предприняла попытку создания базы данных по баллистике нарезной крупнокалиберной артиллерии. Данная база оказалась востребована среди создателей компьютерных игр, но кроме этого, она помогла в раскрытии некоторых загадок истории.

Дальнейшей работой в этом направлении должна была стать подобная база данных по гладкоствольной артиллерии, однако реализация этого проекта показала, что существует много вопросов, как технических, так и исторических, преодолеть которые оказалось совсем не простой задачей. Нарезная артиллерия как техническая система, несомненно, сложнее гладкоствольной. Но в сфере нарезной артиллерии была проделана большая работа множеством организаций, чтобы создать надежные и апробированные математические модели. Для гладкоствольных же систем таких моделей попросту нет, так как долгое время им не уделялось должного внимания.

Кроме того, удалось установить, что имеющаяся в доступе информация о внутренней баллистике гладкоствольных орудий была получена умозрительно или на основе некорректной интерполяции экспериментов, проведенных в XIX веке. Несмотря на то что эта информация повторяется во множестве работ по гладкоствольной артиллерии, ее корректность вызывает большие сомнения.

## Математическая модель гладкоствольного орудия

Математическая модель гладкоствольного орудия состояла из нескольких основных уравнений:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{(p - p_h)F}{m} - g(\sin \alpha - f \cos \alpha),$$

где  $p$  – давление пороховых газов;  $p_h$  – давление окружающей среды;  $F$  – площадь мишеля ядра  $\left(F = \frac{\pi d^2}{4}\right)$ ;  $m$  – масса ядра;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\alpha$  – угол возвышения орудия;  $f$  – коэффициент трения,  $v$  – скорость ядра.

$$p = \frac{MRT}{V},$$

где  $M$  – текущая масса пороховых газов;  $RT$  – «сила пороха»;  $V$  – объем за ядром:  $V = V_k + Sl + V_s$ ,  $V_k$  – объем камеры;  $V_s$  – объем сгоревшего пороха;  $S$  – площадь канала ствола  $\left(S = \frac{\pi D^2}{4}\right)$ ;  $\ell$  – текущая координата ядра при движении по каналу ствола:

$$\frac{d\ell}{dt} = v.$$

$$\frac{dM}{dt} = G_1 - G_2,$$

где  $G_1$  – газоприход (в случае прогорания зерна он обнуляется);  $G_2$  – газорасход.

При этом скорость горения можно определить, считая закон горения артиллерийским:

$$\frac{de}{dt} = Ap,$$

где  $de/dt$  – скорость горения,  $A$  – постоянная скорости горения

Более подробное описание формул и математической модели можно найти в статье «Проблема создания модели дульнозарядного гладкоствольного орудия» [1].

Были проведены эксперименты на пиротехнической установке «Ника» (калибр 35 мм) и стенде для ударных испытаний. Натурные испытания показали результаты, совпадающие с достаточной точностью с результатами по математической модели.

### Доработка математической модели

У модели имелся существенный недостаток, несмотря на неплохое совпадение с результатами натурных испытаний. Возникали проблемы с устойчиво-

стью решения. Это можно увидеть в работах Н. Н. Соломенникова [2] и А. В. Титовой [3].

Поэтому было принято решение доработать уже имеющуюся математическую модель.

Три полученных дифференциальных уравнения составили основу доработанной математической модели, программно реализованной в среде Delphi.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{de}{dt} S + vF,$$

$$\frac{d\rho_{\Gamma}}{dt} = \frac{1}{V} \left( \rho \frac{de}{dt} S(e) - G_2 \right) - \frac{\rho_{\Gamma}}{V} \frac{dV}{dt},$$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{k-1}{V} \left( \rho \frac{de}{dt} S(e) c_p T - G_2 c_p T \right) - \frac{p}{V} \frac{dV}{dt}.$$

Здесь  $e$  – горящий свод,  $p$  – давление в камере,  $V$  – объем за пушечным ядром (складывается из объема камеры и части объема ствола),  $S$  – текущая площадь горения порохового зерна,  $G_2$  – массовый расход порохового газа через зазор между ядром и каналом ствола,  $v$  – скорость движения ядра в канале ствола,  $F$  – площадь канала ствола,  $\rho$  – плотность пороха,  $\rho_{\Gamma}$  – плотность пороховых газов;  $k$  – показатель адиабаты,  $c_p$  – теплоемкость пороховых газов,  $T$  – температура пороховых газов.

С выведение данных дифференциальных уравнений и решением проблемы устойчивости модели можно ознакомиться в статье «Проблема устойчивости решения математической модели пиротехнического устройства» [4].

Главное окно программы представлено на рисунке.

Программная реализация доработанной математической модели в среде программирования Delphi

Были проведены расчеты штатного 40-мм подствольного гранатомета для автомата АКМ. Расчеты показали, что доработанная математическая модель имеет устойчивое решение даже при методе Эйлера с шагом меньше  $10^{-4}$ . Расчеты также приведены в статье [4], где можно ознакомиться с таблицей, куда сведены все результаты.

Нужно учитывать, что модель сформулирована в адиабатической постановке, то есть считается, что теплообмен с окружающей средой отсутствует. На первый взгляд, неучет теплообмена является чрезвычайно грубым допущением, что впоследствии было опровергнуто в статье, где был проведен расчет ствола установки в системе ANSYS [5].

## Применение

1. Работа уже нашла свое применение в области **совершенствования** уже существующих образцов боевой техники на примере гранаты ВОГ-25. Если добавить медленногорящие пороха в пороховую навеску, то реактивный снаряд может стать активно-реактивным.

2. Также данная модель была применена к расчету вылета **метеоракеты** из контейнера с учетом небольших изменений и сохранением основного макета формул. Была изменена формула для горения артиллерийского пороха на формулу Велли и поверхность горения, так как в данном случае рассчитывались шашки со сквозным отверстием.

3. Программа может помочь в **исторической реконструкции**, поскольку многие исходные данные являются неполными, а некоторые еще и неточными. Ко всему прочему большинство пороховых зерен неизвестной формы. Мы предполагаем, что для того времени использование определенного зерна было само собой разумеющимся, поэтому данные о форме просто не вносились.

Было проведено исследование возможности сведения горения зернового артиллерийского пороха середины XIX в. неизвестной формы к закону горения сферического зерна. Оно показало, что горение пороховых зерен простой формы, характерной для середины XIX в., с достаточной степенью точности можно свести к случаю горения сферических зерен того же максимального горящего свода. Наилучшую сходимость дает количество сферических зерен определенных из условия равенства начальной площади горения, а не начального объема или равной массы навески. Однако для зерен сложной формы, характерной для второй половины XIX в., это условие не работает, так как сведение их к горению сферического зерна равной поверхности дает большую погрешность из-за того, что они горят в несколько фаз. Более подробно об этом можно узнать в статье «О возможности сведения горения пороховых зерен неизвестной формы к закону горения сферического зерна» [6].

## Выводы

Для проведения задачи реконструкции баллистики гладкоствольных орудий на языке программирования Delphi была разработана программа, на которую получено свидетельство о государственной регистрации [7].



Поскольку на орудиях XIX в. мог применяться порох с гранулами разной скорости горения, этот же способ оказался достаточно простым способом модернизации системы, использующим активный способ метания в активно-реактивный [8]. Несмотря на то, что при этом может создаваться минимальная тяга, наличие работающего реактивного двигателя может быть полезным, например, для уменьшения донного сопротивления и, как следствие, для увеличения дальности стрельбы.

Были предложены подходы, позволяющие проводить научно-обоснованную историческую реконструкцию баллистических характеристик гладкоствольной дульнозарядной артиллерии с зерновым порохом неизвестной формы. Зерновой порох неизвестной формы можно с достаточной точностью описать горением сферических зерен той же начальной поверхности горения и того же свода.

### Список использованных источников и литературы

1. Проблема создания модели дульнозарядного гладкоствольного орудия / К. Р. Крауфорд, Д. А. Корепанова, Н. В. Митюков, Е. Л. Бусыгина // Военный сборник. – 2020. – Т. 8, № 2. – С. 39–46. – DOI:10.13187/vs.2020.2.39.

2. Соломенников, Н. Н. Математическая модель пиротехнической установки для испытания ракетной техники // Новый университет. Сер. «Технические науки». – 2013. – № 8–9. – С. 110–118.

3. Титова, А. В. Влияние шага интегрирования на решение модели горения пиротехнического устройства // Молодежная наука в развитии регионов: Матер. VIII Всеросс. науч.-практ. конф. (г. Березники, 25 апреля 2018 г.). Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2018. С. 226–228.

4. Митюков, Н. В. Проблема устойчивости решения математической модели пиротехнического устройства / Н. В. Митюков, Д. А. Корепанова, Е. Л. Бусыгина // Вестник полиции. – 2020. – Т. 7, № 1. – С. 10–18. – DOI: 10.13187/vesp.2020.1.10.

5. Соломенников, Н. В. Оптимизация параметров мобильной пиротехнической установки для ударных испытаний / Н. В. Соломенников, Н. В. Митюков // Новый университет. Сер. Технические науки. – 2015. – № 11–12. – С. 11–16. DOI: 10.15350/2221-9552.2015.11-12.

6. О возможности сведения горения пороховых зерен неизвестной формы к закону горения сферического зерна / К. Р. Крауфорд, Н. В. Митюков, Д. А. Корепанова, Е. Л. Бусыгина // Химическая физика и мезоскопия. – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 18–26.

7. Корепанова Д. А., Митюков Н. В. Программа численного моделирования внутренней баллистики подствольного гранатомета (№ 2021614383).

8. Корепанова, Д. А. Возможность простой модернизации активного снаряда в активно-реактивный / Д. А. Корепанова, Н. В. Митюков // Решение-2020 : Матер. IX всероссийской научно-практической конференции (г. Березники, 17 октября 2020 г.). Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2020. – С. 93–94.

## **Исследование дальности стрельбы активно-реактивным снарядом\***

*С. А. Королев, Р. Р. Мансуров*

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова

*Повышение дальности полета снаряда является актуальной проблемой совершенствования ствольной артиллерии. Одним из способов повышения дальности стрельбы является применение реактивного двигателя в конструкции артиллерийского снаряда, так называемый активно-реактивный снаряд (АРС). Это позволяет при фиксированной мощности метательного заряда, за счет разгона снаряда на траектории существенно повысить дальность стрельбы. Разработанное в ходе исследований математическое и программное обеспечение позволяет рассчитать траекторию полета АРС, рассмотреть различные схемы реализации реактивного действия, а также оптимизировать параметры АРС с целью повышения тактико-технических параметров.*

**Ключевые слова:** внешняя баллистика, активно-реактивный снаряд, математическое моделирование, повышение дальности стрельбы.

Существует несколько различных способов увеличения дальности стрельбы артиллерийским снарядом. Одним из направлений исследований является повышение дальности стрельбы путем использования реактивного двигателя (РД) в конструкции снаряда, придающего дополнительное ускорение на траектории его движения [1].

Активно-реактивный снаряд (АРС) – представляет собой вид артиллерийского снаряда, в котором одновременно встречаются характеристики традиционного – активного снаряда и снаряда с реактивной тягой. Спустя определенное время после вылета снаряда из ствола орудия включается реактивный двигатель, придавая ему дополнительное ускорение. Применение АРС позволяет существенно увеличить дальность стрельбы при статичной массе орудия, а также уменьшить удельный вес орудия при заданном ограничении на дальность [2].

### **Математическая модель внешней баллистики активно-реактивного снаряда**

Для исследования потенциала повышения дальности стрельбы была разработана математическая модель внешней баллистики активно-реактивного снаряда. Система дифференциальных уравнений движения АРС учитывает действие сил тяжести, аэродинамического сопротивления, тяги реактивного двигателя, распределение давления и температуры по высоте атмосферы, а также влияние ветра.

---

© Королев С. А., Мансуров Р. Р., 2021

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-01-00072.

Траектория движения снаряда строится в стартовой системе координат  $Ox_c y_c z_c$ , связанной с точкой расположения орудия и ориентированной по направлению стрельбы. Характеристики движения снаряда определяются в траекторной системе координат  $Ox_k y_k z_k$ , связанной с центром масс снаряда и ориентированной по вектору скорости (рис. 1).

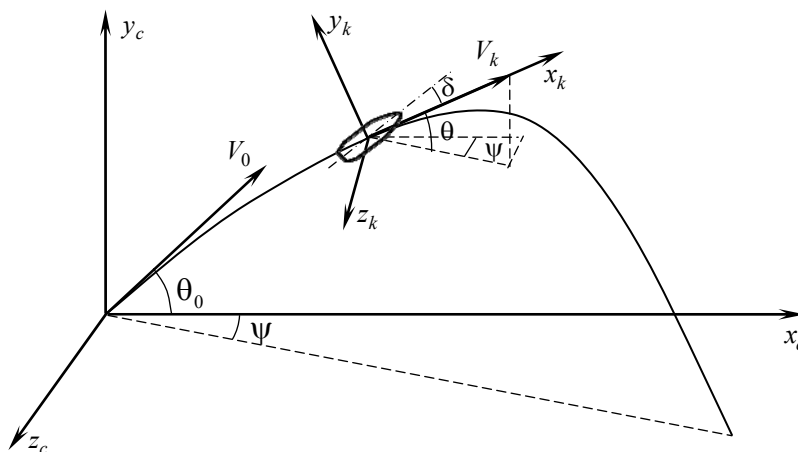


Рис. 1. Стартовая ( $Ox_c y_c z_c$ ) и траекторная ( $Ox_k y_k z_k$ ) системы координат

Система дифференциальных уравнений движения для случая активно-реактивного снаряда имеет вид [3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx_c}{dt} = V_k \cos \theta \cos \psi, \\ \frac{dy_c}{dt} = V_k \sin \theta, \\ \frac{dz_c}{dt} = -V_k \cos \theta \sin \psi, \\ \frac{dV_k}{dt} = -g \sin \theta - \frac{P - C_{x_k} q S_M}{m}, \\ \frac{d\theta}{dt} = -\frac{g \cos \theta}{V_k} - \frac{C_{y_k} q S_M}{m V_k}, \\ \frac{d\psi}{dt} = \frac{f_{z_k} - C_{z_k} q S_M}{m V_k \cos \theta}, \\ \frac{d\omega_x}{dt} = -\frac{m_x q S_M l}{I_x}, \\ \frac{dm}{dt} = -\mu, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $x_c, y_c, z_c$  – координаты центра масс снаряда: дальность, высота, боковое отклонение;  $V_k$  – скорость снаряда;  $\theta$  – угол наклона траектории;  $\psi$  – угол направ-

ления;  $\omega_x$  – аксиальная угловая скорость вращения снаряда;  $m$  – масса снаряда;  $l$  – длина;  $I_x$  – аксиальный момент инерции;  $S_M = \pi d^2/4$  – площадь миделева сечения;  $d$  – калибр;  $P$  – тяга реактивного двигателя;  $f_{z_k}$  – коэффициент деривации вращающегося снаряда.

Аэродинамические силы и моменты задаются через безразмерные коэффициенты сопротивления  $C_{x_k}, C_{y_k}, C_{z_k}$  и коэффициент аксиального момента  $m_x$ . Сила тяжести определяется ускорением свободного падения  $g$ .

Тяга реактивного двигателя:

$$P = \mu_p I_1,$$

где  $I_1$  – единичный импульс тяги реактивного двигателя.

Выражение для скоростного напора воздуха  $q$  в уравнениях (1) имеет вид:

$$q = \frac{a^2 M^2 p(y)}{2RT(y)},$$

где  $a$  – скорость звука;  $M$  – число Маха;  $R$  – удельная газовая постоянная для воздуха;  $p(y)$ ,  $T(y)$  – распределение давления и температуры воздуха по высоте, принимается в виде стандартных распределений для нормальной артиллерийской атмосферы, либо по данным метеоизмерений.

Аэродинамические коэффициенты снаряда определяются на основе численного моделирования внешнего обтекания снаряда [4] или по законам сопротивления воздуха 1943 или 1958 годов [3]. На активном участке траектории во время работы реактивного двигателя коэффициент сопротивления снаряда  $C_{x_k}$  снижается на 10–15 % за счет снижения донного сопротивления.

Система обыкновенных дифференциальных уравнений (1) решалась численно методом Рунге – Кутты четвертого порядка. Шаг интегрирования выбирался исходя из заданной точности расчетов по правилу Рунге [5].

### **Постановка задачи оптимизации параметров АРС с целью повышения дальности стрельбы**

Для выбора оптимальных баллистических условий стрельбы решалась задача максимизации дальности [6]:

$$D = F(m_0, V_0, \theta_0, t_1, I_p, \Delta t_p, i_x) \rightarrow \max, \quad (2)$$

где  $m_0 = m_n + m_p$  – начальная масса активно-реактивного снаряда;  $m_n$  – пассивная масса снаряда;  $m_p$  – масса заряда РД;  $V_0$  – начальная скорость;  $\theta_0$  – угол стрельбы;  $t_1$  – время старта РД;  $I_p$  – суммарный импульс тяги РД;  $\Delta t_p$  – время работы РД;  $i_x$  – коэффициент формы, определяющий изменение лобового сопротивления в зависимости от аэродинамической формы снаряда.

В качестве оптимизируемых параметров будем рассматривать угол стрельбы, время старта РД и коэффициент формы снаряда. Остальные парамет-

ры, такие как масса и скорость снаряда, импульс и время работы РД, являются постоянными и зависят от типа орудия, снаряда и реактивного двигателя.

Для решения задачи многомерной оптимизации применялся метод Хука – Дживса, так как он относится к прямым методам – не требует производной и обладает высокой скоростью сходимости [7]. Блок-схема алгоритма Хука – Дживса представлена на рис. 2.

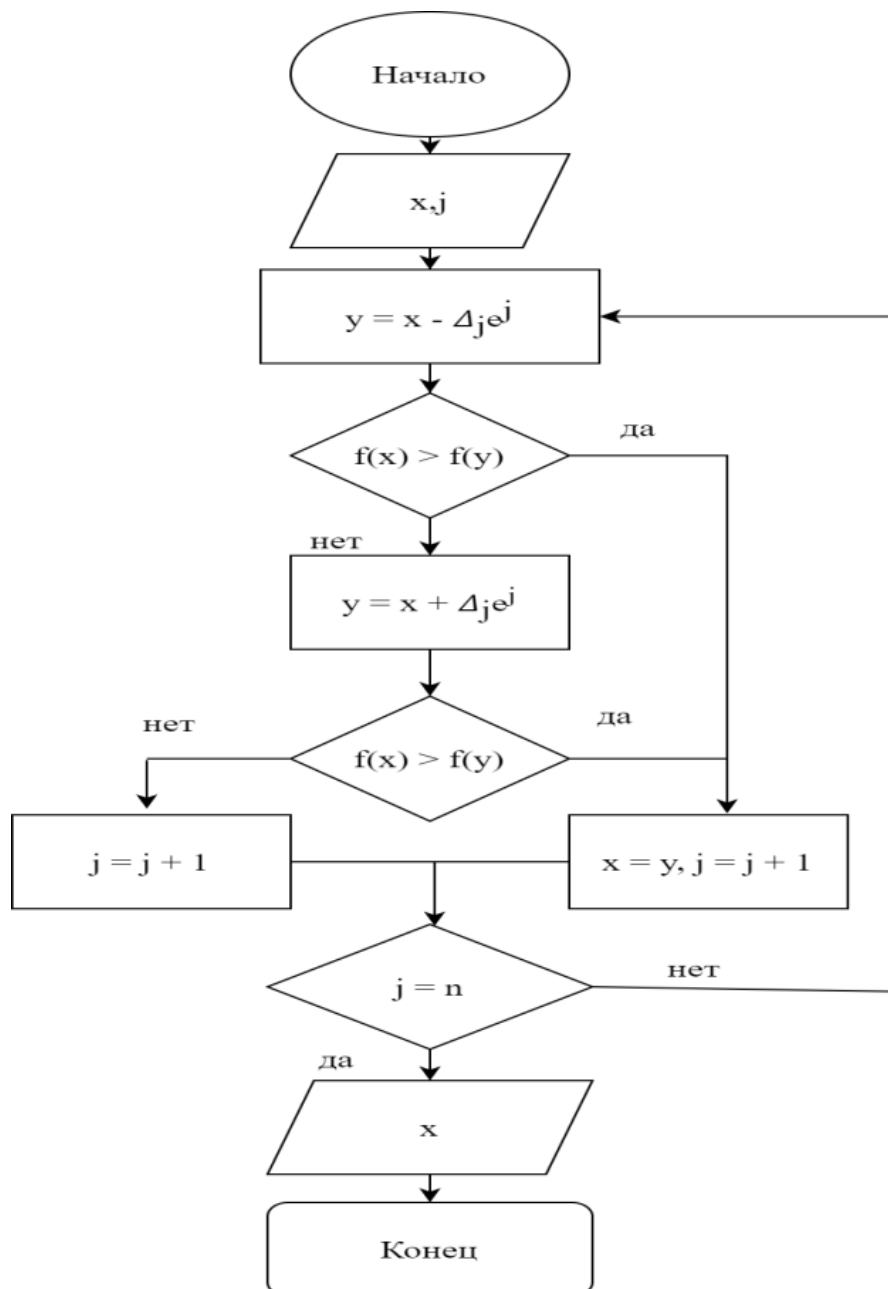


Рис. 2. Блок схема метода Хука – Дживса

### Исследование дальности стрельбы АРС

В качестве снаряда с реактивной тягой был выбран осколочно-фугасный снаряд калибра 152 мм, оснащенный реактивным двигателем, параметры снаряда и РД представлены в таблице [6].

### Параметры активно-реактивного снаряда

$d$ , мм	$m_0$ , кг	$m_p$ , кг	$I_p$ , кН·с	$\Delta t_p$ , с	$i_x$
152	51,0	5,0	12,0	3,0	1,02

Исследуем потенциал повышения дальности стрельбы за счет снижения аэродинамического сопротивления снаряда. Для этого определим зависимость между максимальной дальностью полета снаряда и коэффициентом формы (рис. 3). В работе [7] показано, что для осколочно-фугасного снаряда калибра 152 мм за счет оптимизации параметров формы коэффициент сопротивления можно снизить на 10 %. При этом дальность стрельбы АРС повышается на 5,5 %.

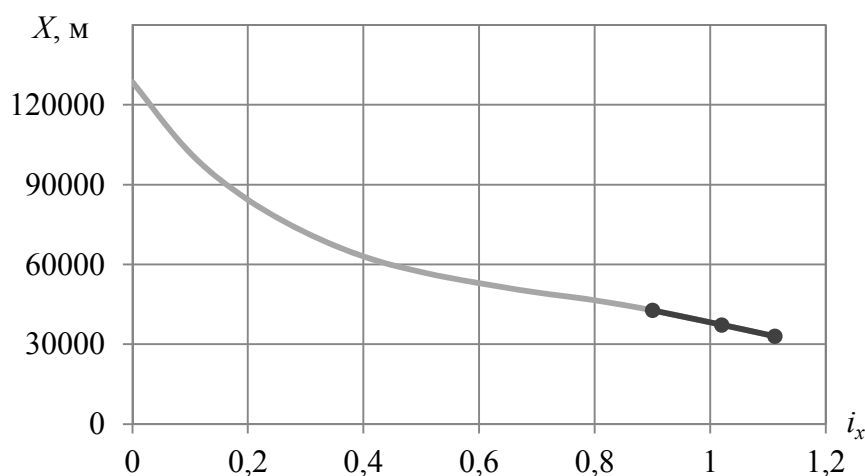


Рис. 3. Влияние коэффициента формы на дальность полета снаряда

На рис. 4, 5 представлены траектории движения снаряда при различных углах стрельбы (время старта РД  $t_1 = 0$ ) и различном времени старта реактивного двигателя (угол стрельбы  $\theta_0 = 45^\circ$ ).

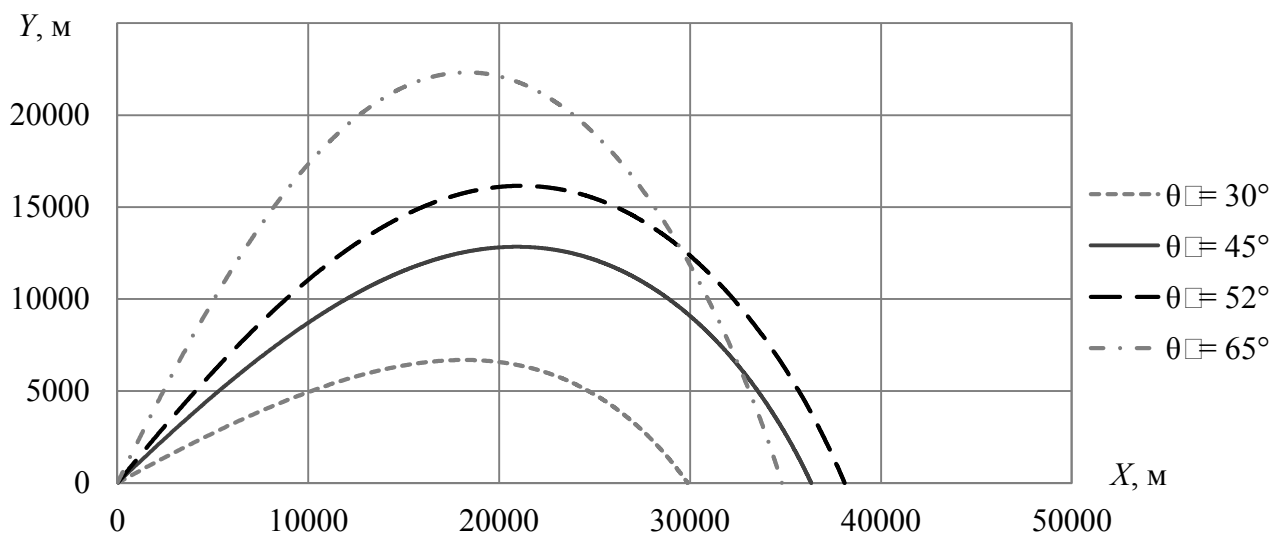


Рис. 4. Траектории движения снаряда при различном угле стрельбы  $\theta_0$  ( $t_1 = 0$  с)

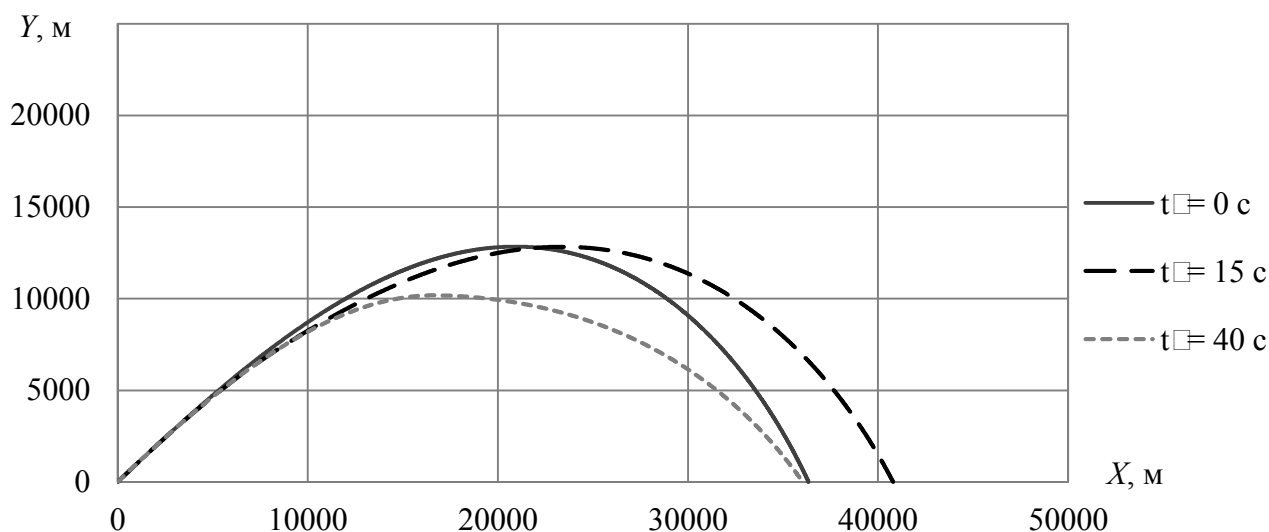


Рис. 5. Траектории движения снаряда при различном времени  $t_1$  старта РД ( $\theta_0 = 45^\circ$ )

Как видно из результатов, представленных на рис. 4, 5, оптимальный угол стрельбы для данного снаряда составляет  $\theta_0 = 52^\circ$ . Изменение времени старта РД при фиксированном угле стрельбы ( $\theta_0 = 45^\circ$ ) дает прирост дальности на 12 %.

На рис. 6 представлены траектории движения снаряда при комплексной оптимизации угла стрельбы и времени старта РД.

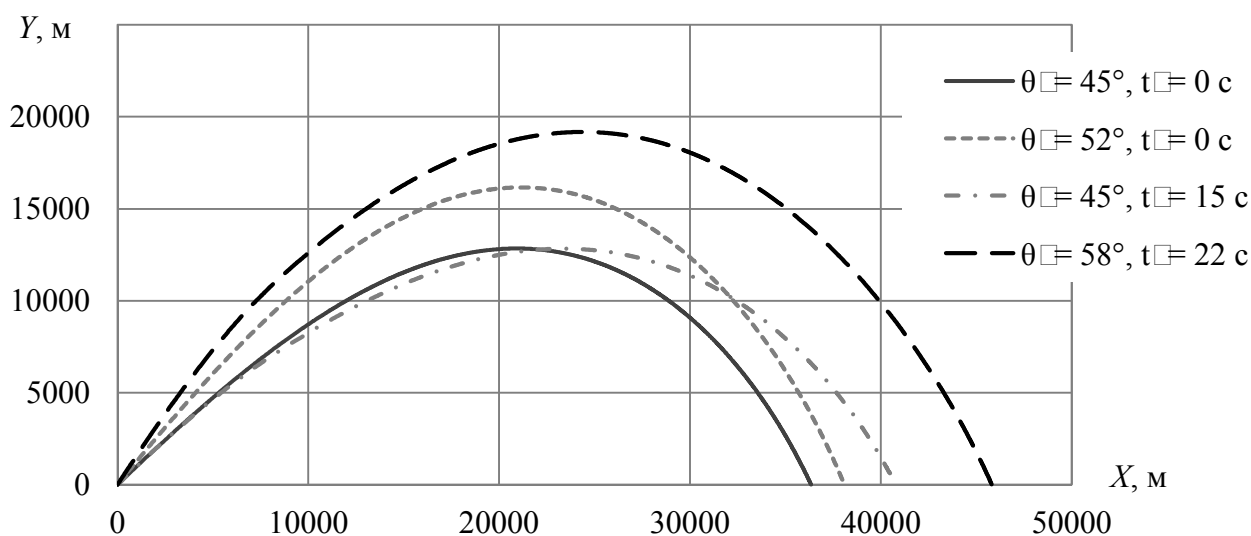


Рис. 6. Траектории движения снаряда при различных начальных параметрах: угол стрельбы и время старта РД

Результаты исследований показывают, что выбор оптимального угла стрельбы при старте РД в момент вылета снаряда из ствола позволяет повысить дальность на 5 %, выбор оптимального времени старта РД при фиксированном угле стрельбы позволяет повысить дальность на 12 %. Максимальное увеличение дальности на 26 % удастся достигнуть при комплексной оптимизации параметров стрельбы активно-реактивным снарядом, при этом угол стрельбы  $\theta_0 = 58^\circ$ , время старта РД  $t_1 = 22$  с.



## Список использованных источников и литературы

1. Способы повышения баллистической эффективности артиллерийских управляемых снарядов / В. И. Бабичев, В. В. Ветров, В. П. Елесин и др. // Известия РАН. – 2010. – Вып. 3 (65). – С. 3–9.
2. Баллистика ствольных систем / В. В. Бурлов и др. ; под ред. Л. Н. Лысенко и А. М. Липанова. – Москва : Машиностроение, 2006. – 461 с.
3. *Дмитриевский, А. А.* Внешняя баллистика / А. А. Дмитриевский, Л. Н. Лысенко. – Москва : Машиностроение, 2005. – 608 с.
4. Численное решение задачи обтекания для определения аэродинамических коэффициентов метаемых тел / А. М. Липанов, И. Г. Русяк, С. А. Королев, С. А. Карсканов // Инженерно-физический журнал. – 2019. – Т. 92, № 2. – С. 496–504.
5. *Бахвалов, Н. С.* Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – Москва : Лаборатория базовых знаний, 2001. – 630 с.
6. *Королев, С. А.* Исследование путей повышения дальности стрельбы ствольной артиллерии / С. А. Королев, А. М. Липанов, И. Г. Русяк // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2018. – Т. 21, № 3. – С. 185–191.
7. *Аттетков, А. В.* Методы оптимизации / А. В. Аттетков, С. В. Галкин, В. С. Зарубин ; под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – 2-е изд. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 440 с.
8. *Lipanov A. M., Korolev S. A., Rusyak I. G.* Optimization of aerodynamic form of projectile for solving the problem of shooting range increasing // XXV Conference on High-Energy Processes in Condensed Matter (HEPCM 2017). AIP. Conf. Proc. 1893. AIP Publishing, 2017. P. 030085. DOI: 10.1063/1.5007543.

## Разработка и реализация алгоритма решения обратной задачи внешней баллистики при стрельбе с подвижного носителя\*

С. А. Королев, Д. В. Микрюков

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*В данной статье представлена реализация решения обратной задачи внешней баллистики при стрельбе с подвижного носителя. Для решения задачи разработан итерационный метод и многослойная нейронная сеть, реализованная с использованием библиотек на языке программирования Python.*

**Ключевые слова:** внешняя баллистика, обратная задача, подвижный носитель, нейронная сеть.

### Введение

Для решения задач внешней баллистики требуется применение сложных математических моделей с учетом большого количества факторов, которые влияют на полет снаряда в пространстве. Современные методы и технологии обработки данных позволяют решать данные задачи, зависящие от большого количества факторов. В данной статье рассмотрены способы решения обратной задачи внешней баллистики с использованием итерационного метода и многослойной нейронной сети.

Нейронная сеть представляет собой совокупность нейронов, которые взаимодействуют между собой. Обучение сети заключается в нахождении коэффициентов связей между нейронами. Многослойная нейронная сеть состоит из множества слоев нейронов: входного, нескольких скрытых и выходного слоя. В процессе обучения нейронная сеть способна выявлять сложные зависимости между входными и выходными данными.

### Математическая модель внешней баллистики

При стрельбе с подвижного носителя начальные условия выстрела определяются параметрами движения носителя, скоростью полета и ориентацией в пространстве. Начальные условия решения задачи внешней баллистики:  $V_0$  – начальная скорость;  $\theta_0, \psi_0$  – начальные значения углов возвышения и направления, определяются следующими выражениями [1]:

---

© Королев С. А., Микрюков Д. В., 2021

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-01-00072.

$$V_0 = \sqrt{\left(V_{\text{чн}} \cos \theta^{\text{пн}} \cos \psi^{\text{пн}} + V_{x_c}^{\text{пн}}\right)^2 + \left(V_{\text{чн}} \sin \theta^{\text{пн}} + V_{y_c}^{\text{пн}}\right)^2 + \left(V_{\text{чн}} \cos \theta^{\text{пн}} \sin \psi^{\text{пн}} + V_{z_c}^{\text{пн}}\right)^2}; \quad (1)$$

$$\theta_0 = \arctan \left( \frac{V_{\text{чн}} \sin \theta^{\text{пн}} + V_{y_c}^{\text{пн}}}{V_{\text{чн}} \cos \theta^{\text{пн}} \cos \psi^{\text{пн}} + V_{x_c}^{\text{пн}}} \right); \quad (2)$$

$$\psi_0 = \arctan \left( \frac{V_{\text{чн}} \cos \theta^{\text{пн}} \sin \psi^{\text{пн}} + V_{z_c}^{\text{пн}}}{V_{\text{чн}} \cos \theta^{\text{пн}} \cos \psi^{\text{пн}} + V_{x_c}^{\text{пн}}} \right), \quad (3)$$

где  $V_{x_c}^{\text{пн}}, V_{y_c}^{\text{пн}}, V_{z_c}^{\text{пн}}$  – составляющие вектора скорости подвижного носителя,  $\theta^{\text{пн}}, \psi^{\text{пн}}$  – углы ориентации подвижного носителя (тангажа и рыскания), считаем, что направление стрельбы совпадает с продольной осью носителя;  $V_{\text{чн}}$  – скорость снаряда в момент выстрела.

Координаты центра масс снаряда в стартовой системе координат  $Ox_c y_c z_c$  определяются уравнениями [2]:

$$\frac{dx_c}{dt} = V_k \cos \theta \cos \psi; \quad \frac{dy_c}{dt} = V_k \sin \theta; \quad \frac{dz_c}{dt} = -V_k \cos \theta \sin \psi, \quad (4)$$

где  $x_c$  – дальность;  $y_c$  – высота полета снаряда;  $z_c$  – боковое отклонение;  $V_k$  – скорость центра масс снаряда (рис. 1). Начальные значения переменных  $(x_c, y_c, z_c) = (0, y_0, 0)$ , где  $y_0$  – высота полета носителя.

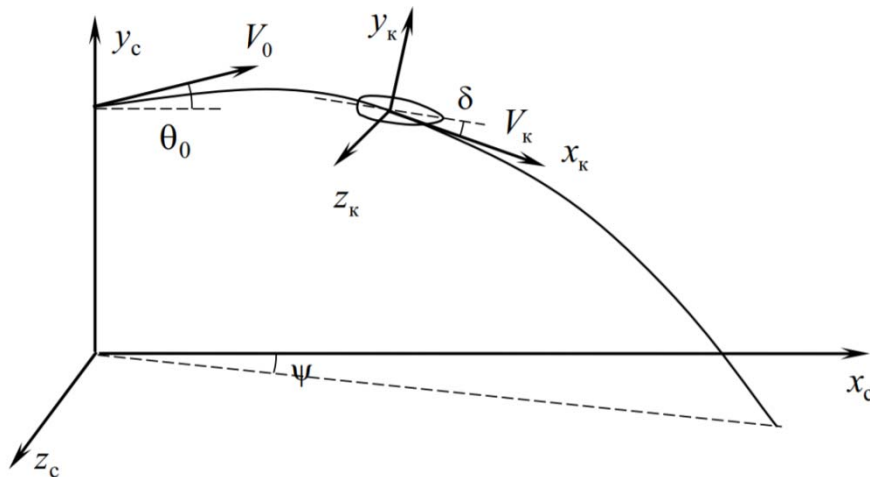


Рис. 1. Траектория движения снаряда

Параметры движения снаряда определяются в траекторной системе координат  $Ox_k y_k z_k$  уравнениями [1, 2]:

$$\frac{dV_k}{dt} = -g \sin \theta - \frac{C_{x_k} q S_M}{m}; \quad (5)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{g \cos \theta}{V_k} - \frac{C_{y_k} q S_M}{m V_k}, \quad (6)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = -\frac{C_{z_k} q S_M}{m V_k \cos \theta}, \quad (7)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $C_{x_k}, C_{y_k}, C_{z_k}$  – коэффициенты составляющих аэродинамической силы;  $q = \rho M^2 a^2 / 2$  – скоростной напор воздуха;  $M$  – число Маха;  $a$  – скорость звука в воздухе;  $S_M = \pi d^2 / 4$  – площадь миделева сечения снаряда;  $d$  – калибр;  $m$  – масса снаряда.

Начальные условия для системы (4)–(7) задаются соотношениями (1)–(3).

Для решения системы дифференциальных уравнений (4)–(7) был применен метод Рунге – Кутты 4-го порядка [3].

### Обратная задача

Обратная задача внешней баллистики заключается в нахождении угла наклона траектории и направления стрельбы при заданных начальных условиях и координатах точки цели. Решение обратной задачи можно представить в виде преобразования:

$$\mathbf{Q} = (\theta_0, \psi_0) = \Phi^{-1}(\mathbf{r}_k, \mathbf{r}_0, \mathbf{V}_{п.н}, \mathbf{A}), \quad (8)$$

где  $\mathbf{r}_k = (x_k, y_k, z_k)$  – конечная точка стрельбы (цель);  $\mathbf{V}_{п.н}$  – вектор скорости подвижного носителя;  $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)$  – начальная точка выстрела снаряда;  $\mathbf{A}$  – вектор, содержащий характеристики снаряда и орудия, геофизические и атмосферные данные.

Существуют несколько способов решения обратной задачи [4]. Рассмотрим два способа: в первом задача будет решаться с использованием итерационного метода на основе многократного решения прямой задачи. Так как эта процедура занимает большое количество времени, рассмотрим и второй способ, который заключается в создании и обучении многослойной нейронной сети.

В качестве подвижного носителя рассматривался вертолет «Ми-8», скорость вертолета изменялась в диапазонах:  $V_x^{п.н} = 0 \div 250$  км/ч,  $V_y^{п.н} = -50 \div 50$  км/ч,  $V_z^{п.н} = -50 \div 50$  км/ч. Вооружение – авиационная пушка калибра 30 мм с осколочно-фугасным снарядом: масса  $m = 400$  г, начальная скорость  $V_{сн} = 890$  м/с.

### Итерационный алгоритм

Итерационный алгоритм решения обратной задачи основан на методе деления отрезка пополам, блок-схема итерационного алгоритма представлена на рис. 2. Среднее время решения задачи данным методом с точностью  $\varepsilon = 10^{-4}$  составляет  $\tau = 402$  мс.

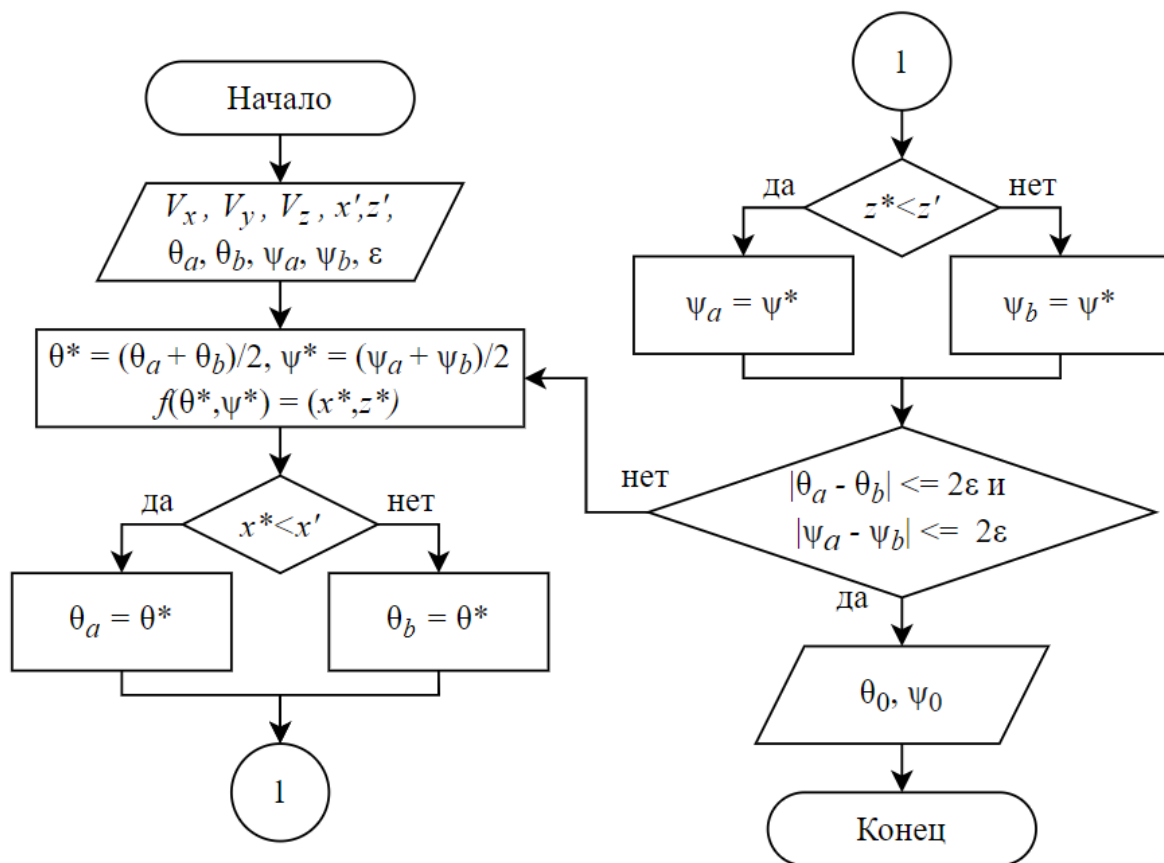


Рис. 2. Блок-схема итерационного алгоритма решения обратной задачи

### Нейронная сеть

В оперативной обстановке процесс нахождения углов наведения с помощью итерационного метода может занимать много времени, поэтому рассмотрим еще один способ решения обратной задачи на основе многослойной нейронной сети [5].

Нейронная сеть была смоделирована с помощью библиотеки Keras на языке программирования Python.

Для обучения нейронной сети создавалась выборка из  $N = 500 \div 20\,000$  наборов данных, состоящих из случайно заданных начальных условий стрельбы и результатов решения прямой задачи внешней баллистики. Для оптимизации процесса вычислений нормируем все данные на отрезке  $[0; 1]$ .

Входной слой многослойной нейронной сети состоит из 5 нейронов (рис. 3), в которые подается массив с данными скорости и конечной координаты выстрела. Далее идут 3 скрытых слоя по 15 нейронов в каждом, за ними выходной слой с 2 нейронами, которые выдают углы наклона и поворота, обеспечивающие попадание в цель.

В качестве алгоритма обучения сети был выбран алгоритм Adam (Adaptive Moment Estimation) – это алгоритм оптимизации, который является расширением стохастического градиентного спуска [6]. Ошибку аппроксимации будем вычислять с помощью среднеквадратического отклонения. При объеме выборки  $N = 20\,000$  погрешность аппроксимации составила  $\epsilon = 0,0061$ .

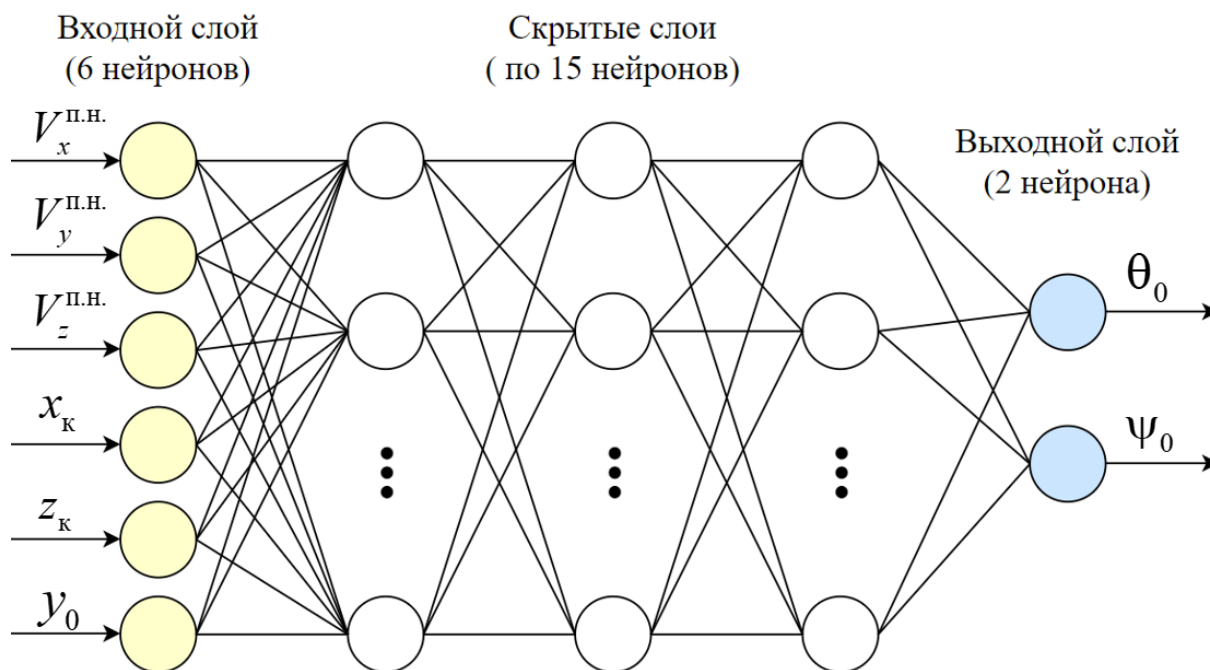


Рис. 3. Схема многослойной нейронной сети

Для оптимизации времени обучения нейронной сети компания Nvidia разработала библиотеку cuDNN (CUDA Deep Neural Network) – это библиотека примитивов для нейронных сетей с ускорением на графическом процессоре (GPU) [7]. Данная разработка поддерживается библиотекой Keras. На рис. 4 представлено сравнение времени обучения с использованием графического процессора (GPU – GeForce 940MX) и центрального процессора (CPU – Intel Core i-5 7200U).

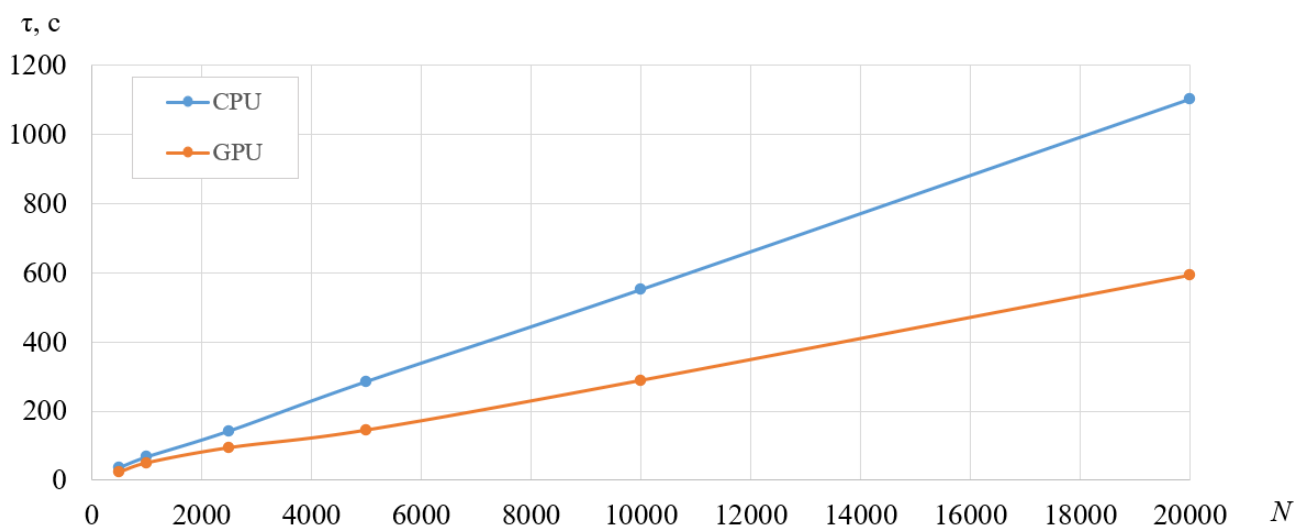


Рис. 4. Зависимость времени обучения сети от объема выборки

Как видно из данных, представленных на рис. 4, обучение нейронной сети при использовании GPU в среднем на 60 % быстрее, чем при использовании CPU. Необходимо отметить, что данная оценка ускорения времени обучения сети может меняться в зависимости от комплектующих вычислительной системы.

## Заключение

Разработаны и реализованы два алгоритма решения обратной задачи внешней баллистики при стрельбе с подвижного носителя. Итерационный алгоритм, основанный на методе деления отрезков пополам, позволяет найти решение задачи с заданной точностью (погрешность  $\varepsilon = 10^{-4}$ ), однако время решения задачи составляет в среднем  $\tau = 400$  мс. Для сокращения времени определения параметров наведения на цель была реализована многослойная нейронная сеть. При погрешности вычислений  $\varepsilon = 10^{-3} \div 10^{-2}$  нейронная сеть позволяет получить решение обратной задачи за время  $\tau = 2$  мс. Для обучения нейронной сети применялись технологии, реализующие вычисления на графическом процессоре, при этом время обучения сети в среднем на 60 % меньше, чем при вычислении на центральном процессоре.

## Список использованных источников и литературы

1. *Королев, С. А.* Методика расчета траектории движения снарядов и ракет при стрельбе с подвижного носителя / С. А. Королев, И. Г. Русяк, В. Г. Суфиянов // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. № 4 (31). С. 13–18.
2. *Дмитриевский, А. А.* Внешняя баллистика / А. А. Дмитриевский, Л. Н. Лысенко. М. : Машиностроение, 2005. 608 с.
3. *Hairer E., Norsett S.P., Wanner G.* Solving Ordinary Differential Equations. Vol. 1. Berlin: Springer-Verlag, 1991. 528 с.
4. Разработка подходов к решению обратной задачи внешней баллистики в различных условиях применения / С. А. Королев, А. М. Липанов, И. Г. Русяк, В. А. Тененев // Вестник Томского гос. ун-та. Математика и механика. 2019. № 57. С. 76–83.
5. *Круглов, В. В.* Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В. В. Круглов, В. В. Борисов. М. : Горячая линия – Телеком, 2002. 382 с.
6. *Kingma D., Ba J.* Adam: A Method for Stochastic Optimization. ICLR, 2015. 15 с.
7. NVIDIA Deep Learning cuDNN Documentation // NVIDIA Corp., США. URL: <https://docs.nvidia.com/deeplearning/cudnn/index.html> (дата обращения: 15.06.2021).

## Численное моделирование сопряженного теплообмена при охлаждении высокотемпературной металлической заготовки потоком газожидкостной среды\*

С. С. Макаров<sup>1,2</sup>, А. М. Липанов<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Институт механики УдмФИЦ УрО РАН,

<sup>2</sup> Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова,

<sup>3</sup> Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН

*Приведена математическая модель сопряженного теплообмена высокотемпературной металлической заготовки цилиндрической формы и потока охлаждающей среды в двухмерной нестационарной постановке. Для решения системы дифференциальных уравнений использован метод контрольного объема. Определены значения локальной скорости охлаждения заготовки при нерегулярном тепловом режиме.*

**Ключевые слова:** сопряженный теплообмен, охлаждение, заготовка, газожидкостная среда, численное исследование.

В металлургической и машиностроительной промышленности при производстве изделий из металлов и сплавов важной проблемой является создание рациональных условий охлаждения высокотемпературных металлических тел. Выбор теплофизических свойств охлаждающих сред, способы и режимы подачи в зону охлаждения производят согласно требуемой скорости охлаждения, которая определяется интенсивностью теплообмена между нагретым телом и средой. Выбор режима охлаждения высокотемпературных металлических заготовок во многом зависит от распределения гидродинамических и теплофизических параметров охлаждающего потока жидкости.

Исследования процесса охлаждения высокотемпературных металлических тел потоком газожидкостной среды ведутся в Институте механики УдмФИЦ УрО РАН под руководством академика РАН А. М. Липанова. В работе [1] приведено численное решение задачи охлаждения потоком воды и воздуха высокотемпературного сплошного металлического цилиндра. В работе [2] приведены результаты математического моделирования охлаждения нагретых под закалку осесимметричных металлических заготовок из конструкционной легированной стали квазистационарными потоками охлаждающей среды. В дальнейшем рассмотрен случай обтекания поверхности высокотемпературного цилиндра нестационарным одномерным потоком воды в направлении продольной оси [3]. В работе [4] рассмотрена математическая модель охлаждения полой металлической заготовки цилиндрической формы продольными квазистационар-



ными потоками воды. Приведен алгоритм численного решения задачи и результаты численных параметрических расчетов. Определение температур охлаждаемого цилиндра производилось с учетом времени релаксации тепловых напряжений и внутренних источников тепла, вызванных полиморфными превращениями в материале. Результаты расчетных параметров теплообмена цилиндра и потока среды в зависимости от геометрии, теплофизических свойств и времени процесса получены, как и во многих работах отечественных авторов, на основе критериальных зависимостей по определению условий теплоотдачи.

В работе [5] рассмотрена математическая модель сопряженной задачи конвективного теплообмена при охлаждении нагретого металлического цилиндра ламинарным потоком охлаждающей среды. Охлаждение происходит без кипения жидкости. В работе [6] предложена математическая модель сопряженного теплообмена в гетерогенной системе «твердое тело – газожидкостная среда» с учетом парообразования в охлаждающем продольном потоке жидкости у поверхности высокотемпературного металлического цилиндра. Численный алгоритм применен для исследования охлаждения металлической заготовки цилиндрической формы из конструкционной стали [7].

Целью данной работы является моделирование теплообмена при охлаждении высокотемпературного металлического цилиндра потоком газожидкостной среды в вертикальном кольцевом канале для нахождения закономерностей влияния параметров теплообмена на скорость охлаждения цилиндра. На рис. 1 приведены схемы рассматриваемой модели.

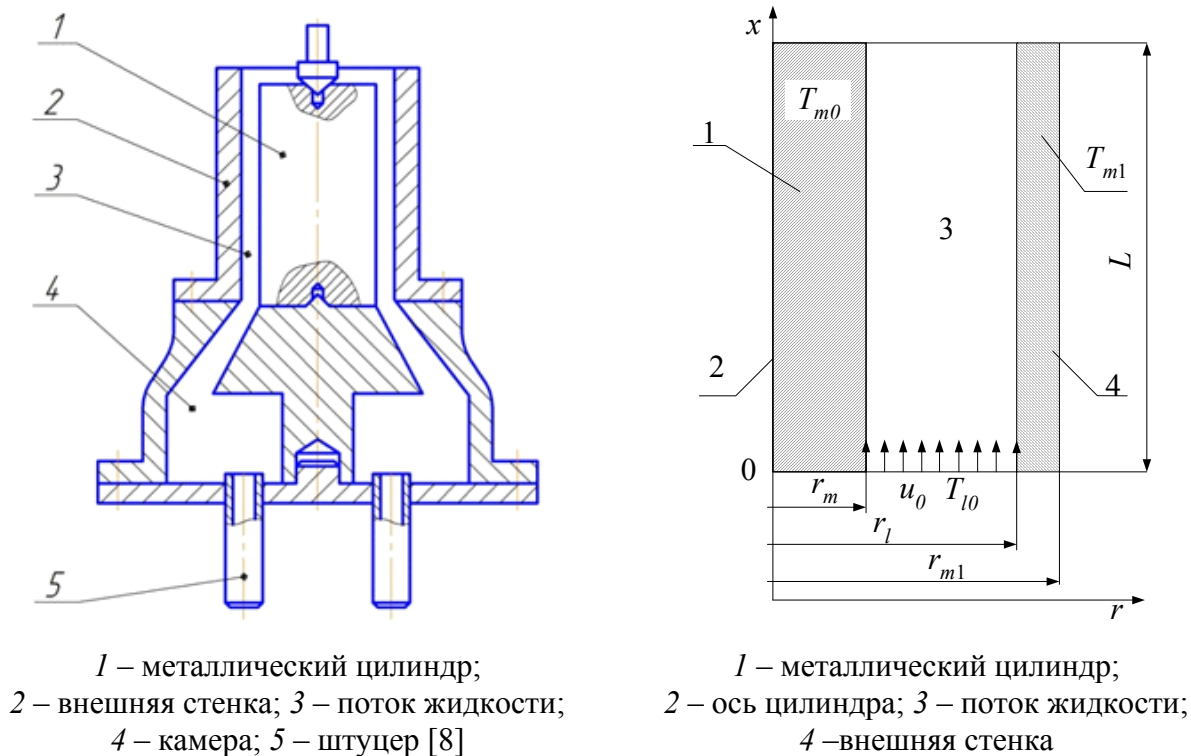


Рис. 1. Физическая и расчетная схемы

Металлический цилиндр радиусом  $r_m$  и длиной  $L$  охлаждается движущимся в направлении вертикальной оси  $x$  потоком жидкости в кольцевом зазоре  $r_l - r_m$  с начальной скоростью  $u_0$  и температурой  $T_{l0}$ . Внешний радиус металлической стенки кольцевого канала  $r_{m1}$ .

### Математическая модель сопряженного теплообмена

Математическая модель сопряженного теплообмена потока газожидкостной среды и металлической заготовки цилиндрической формы записана в двухмерной осесимметричной нестационарной постановке. Система уравнений, описывающая течение газожидкостной среды, имеет вид:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial r} = -g\rho - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \mu \frac{\partial u}{\partial r}; \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \mu \frac{\partial v}{\partial r} - \mu \frac{v}{r^2}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v)}{\partial r} = 0; \quad (3)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho c v \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} - \dot{m}_v Q_v; \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial Y_v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial Y_v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial Y_v}{\partial r} = \dot{m}_v; \quad (5)$$

удельная массовая скорость парообразования:  $\dot{m}_v = (\rho c \Delta T) / (Q_v \Delta t)$ , где

$$\Delta T = \begin{cases} 0, & \text{если } T(t + \Delta t) < T_s \\ [T(t + \Delta t) - T_n(t)], & \text{если } T(t + \Delta t) > T_s \end{cases} \quad - \quad \text{перегрев жидкости;}$$

$T_n(t) = \max[T(t); T_s]$ . Значение  $\Delta T$  может принимать как положительное, так и отрицательное значение. В первом случае учитываются затраты тепловой энергии на фазовый переход жидкости в пар. Во втором случае учитывается тепловой эффект от конденсации пара в жидкость, при условии, что в среде есть пар, т. е.  $Y_v > 0$ . Таким образом, регулируется энергетический тепломассообменный баланс системы.

Уравнение энергии для металлического цилиндра и внешней металлической стенки:

$$\rho_m c_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial r}. \quad (6)$$

Эффективные теплофизические параметры газожидкостной среды определяются следующим образом [9]:

$$\rho = \sum_2 \rho_i Y_i, \quad c = \sum_2 c_i \rho_i Y_i / \rho, \quad \lambda = \frac{1}{2} \left[ \sum_2 Y_i \lambda_i + \left( \sum_2 \frac{Y_i}{\lambda_i} \right)^{-1} \right],$$

$$\mu = \frac{1}{2} \left[ \sum_2 Y_i \mu_i + \left( \sum_2 \frac{Y_i}{\mu_i} \right)^{-1} \right], \quad \sum_2 Y_i = 1.$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} x=0: \quad 0 < r < r_m, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \\ r_m < r < r_l, \quad T = T_{l0}, \quad u = u_0, \quad v = 0, \quad \frac{\partial Y}{\partial x} = 0 \\ r_l < r < r_{m1}, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \\ x=L: \quad 0 < r < r_m, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \\ r_m < r < r_l, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial Y}{\partial x} = 0 \\ r_m < r < r_{m1}, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \\ 0 < x < L: \quad r = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \\ r = r_m, \quad -\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial r} = -\lambda_l \frac{\partial T_l}{\partial r}, \quad T_{m0} = T_l, \quad u = 0, \quad v = 0 \\ r = r_l, \quad -\lambda_{m1} \frac{\partial T_{m1}}{\partial r} = -\lambda_l \frac{\partial T_l}{\partial r}, \quad T_{m1} = T_l, \quad u = 0, \quad v = 0 \\ r = r_{m1}: \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0. \end{aligned}$$

Локальную скорость охлаждения в объеме металлического цилиндра будем определять так:

$$V_m = \frac{|T_m(t + \Delta t) - T_m(t)|}{\Delta t}. \quad (7)$$

Система дифференциальных уравнений (1)–(6) решается методом контрольного объема. Параметры поля течения (1)–(3) рассчитываются применяемым при моделировании течений жидкости алгоритмом SIMPLE [10]. Дифференциальные уравнения приводятся к системе линейных алгебраических уравнений и решаются итерационно методом Гаусса – Зейделя с использованием коэффициента нижней релаксации. Для проведения расчетов используется сетка, имеющая сгущающийся профиль на границах металлический цилиндр – жидкость, жидкость – внешняя металлическая стенка, со стороны жидкости и металла. Расчетный шаг по продольной координате постоянный.

## Результаты численных расчетов

Для расчета примем исходные данные: материал заготовки и кольца – сталь 12X18Н9Т, геометрические размеры:  $r_m = 0,015$  м,  $r_i = 0,025$  м,  $r_{m1} = 0,03$  м,  $L = 0,1$  м; начальная температура заготовки  $T_{m0} = 840$  °С; начальная температура потока воды  $T_{i0} = 20$  °С; начальная температура металлического кольца  $T_{m1} = T_{i0}$ . Расчеты проведены для скорости потока а) –  $u_0 = 0,1$  м/с и б) –  $u_0 = 1$  м/с.

На рис. 2, 3 приведены поля скорости охлаждения в объеме металлической заготовки для расчетного времени  $t = 1$  с,  $t = 2$  с, и  $t = 10$  с охлаждения.

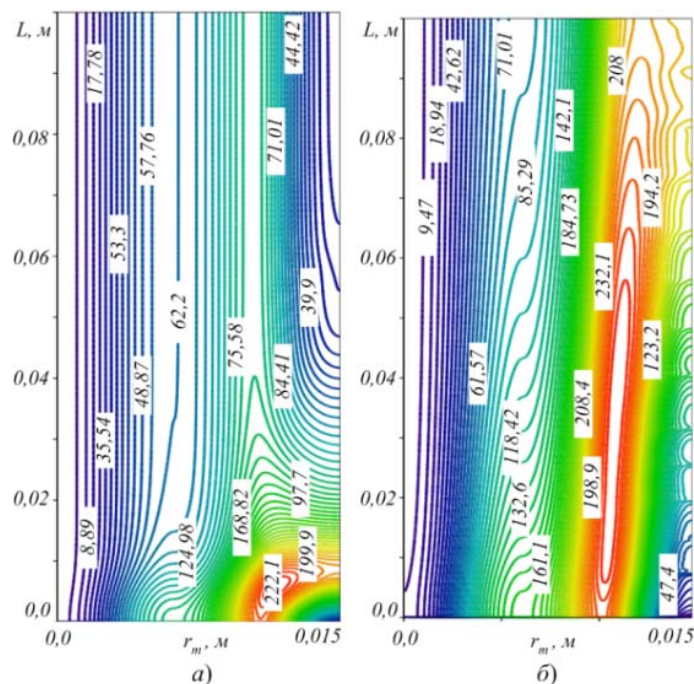


Рис. 2. Скорость охлаждения заготовки,  $t = 1$  с

Видно, что распределения локальных скоростей охлаждения в объеме заготовки происходят неравномерно, имея очаговый характер при меньшей скорости (рис. 2, а) на начальном участке контакта с охлаждающей средой. Абсолютные значения величины локальной скорости охлаждения заготовки по объему различаются на порядок. При увеличении скорости потока газожидкостной среды (рис. 2, б) картина распределения локальных скоростей охлаждения в объеме металла становится более равномерной по сечению. При этом скорости охлаждения имеют один порядок по длине расчетной области.

По мере увеличения времени охлаждения видно, что полученные значения локальной скорости охлаждения сохраняют общую динамику снижения.

При меньшей скорости потока (рис. 3, а) жидкости наблюдается локализованная картина интенсивного теплообмена в объеме металла на начальном участке охлаждаемой заготовки. При большей скорости потока охлаждающей среды (рис. 3, б) картина охлаждения заготовки характеризуется пологим профилем линий локальной скорости охлаждения в объеме металла. Видно, что фронт охлаждения смещается к оси заготовки, а средняя скорость охлаждения объема металла составляет 100 °С/с.

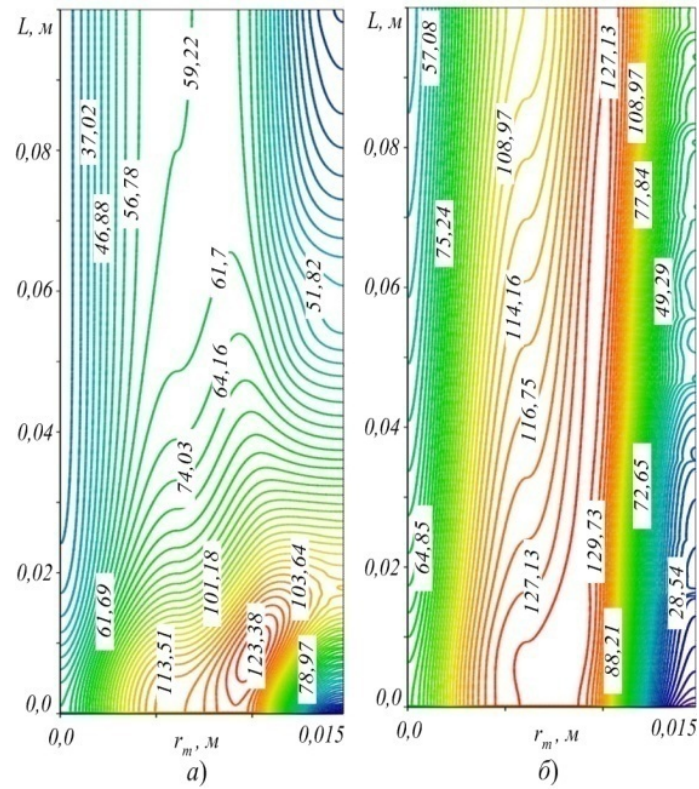


Рис. 3. Скорость охлаждения заготовки,  $t = 2$  с

Общая тенденция распределения температур с течением времени по объему заготовки для скоростей потока жидкости (рис. 4, а и б) сохраняется.

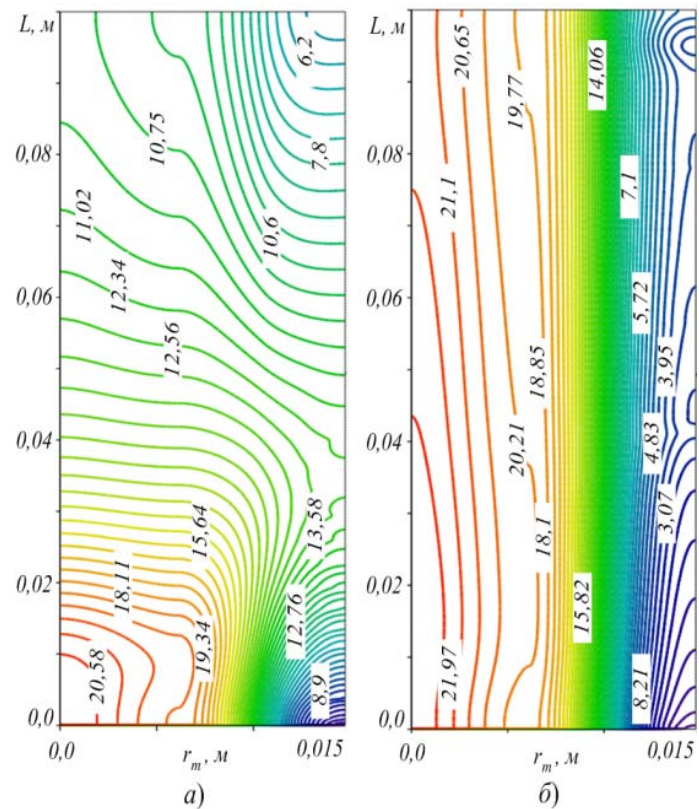


Рис. 4. Скорость охлаждения заготовки,  $t = 10$  с

Полученные результаты параметрических исследований изменения скорости охлаждения материала металлической заготовки при нерегулярном тепловом режиме позволяют производить прогноз формирующейся структуры и физико-механических свойств материала, что важно, например, на режимах термомеханического упрочнения металлических заготовок из конструкционных сталей.

### **Заключение**

Таким образом, основываясь на подходах механики сплошных сред, создана математическая модель сопряженного теплообмена, позволяющая получать результаты численных параметрических исследований охлаждения высокотемпературной металлической заготовки из конструкционной стали потоком газожидкостной среды в вертикальном кольцевом канале.

### **Список использованных источников и литературы**

1. *Липанов, А. М.* Численное решение задачи охлаждения потоком воды и воздуха высокотемпературного сплошного металлического цилиндра / А. М. Липанов, С. С. Макаров // *Машиностроение и инженерное образование.* 2014. № 1. С. 36–41.
2. Математическое моделирование охлаждения при закалке осесимметричных металлических заготовок / С. С. Макаров, К. Э. Чекмышев, С. Н. Храмов, Е. В. Макарова // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова.* 2014. Вып. 3 (63). С. 38–43.
3. *Макаров, С. С.* Математическая модель охлаждения цилиндрической заготовки одномерным нестационарным потоком воды / С. С. Макаров, К. Э. Чекмышев, Е. В. Макарова // *Научно-технические ведомости СПбГПУ.* 2014. № 4 (207). С. 196–202.
4. *Липанов, А. М.* Численное решение задачи охлаждения полых металлических заготовок цилиндрической формы продольными потоками воды / А. М. Липанов, С. С. Макаров // *Химическая физика и мезоскопия.* 2014. Т. 16. № 4. С. 524–529.
5. *Макаров, С. С.* Математическая модель конвективного теплообмена при взаимодействии потока охлаждающей жидкости, двигающегося вдоль поверхности нагретого металлического цилиндра / С. С. Макаров, А. И. Карпов, Е. В. Макарова // *Химическая физика и мезоскопия.* 2016. Т. 18. № 1. С. 32–40.
6. Численное исследование охлаждения высокотемпературного металлического цилиндра потоком газожидкостной среды / А. М. Липанов, С. С. Макаров, А. И. Карпов, Е. В. Макарова // *Теплофизика и аэромеханика.* 2017. Т. 24. № 1. С. 53–59.
7. *Makarov S. S., Dement'yev V. B., Makarova E.V.* Mathematical Modeling of Cooling High-Temperature Cylindrical Workpieces // *ProcediaEngineering V. 150.* 2016. P. 393–399. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.734.
8. А.С. 128545 СССР, К.З. Шепеляковский (1960).
9. *Варнатц, Ю.* *Горение.* Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Ю. Варнатц, У. Маас, Р. Деббл ; пер. с англ. под ред. П. А. Власова. М. : Физматлит, 2006. 352 с.
10. *Патанкар, С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М. : Энергоатомиздат, 1984. 152 с.



## Испытание боеприпасов на пожаростойкость электронагревательной печью

Е. А. Прокопович, Е. А. Хмельников, Т. Е. Заводова

Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ

*В статье рассматривается методика для проведения испытания боеприпасов и его элементов на пожаростойкость. Произведена оценка старой методики испытания и определение ее недостатков, за счет этого предлагается новая методика проведения испытания, в основе которого используется электронагревательная печь. Создана модель для проведения и анализа испытания, для рассмотрения распределения тепла внутри самой печи*

**Ключевые слова:** электронагревательная печь; методика проведения испытания; боеприпасы; моделирование; сравнение.

Федеральное казенное предприятие «Нижнетагильский институт испытания боеприпасов» – один из старейших испытательных полигонов России, где на сборочно-испытательном производстве боеприпасов, в отделе испытания вооружения военной и специальной техники проводятся ряд проверок для серийно изготавливаемых, разрабатываемых или модернизируемых боеприпасов и их элементов, которым, в настоящее время, относятся и испытания по пожаростойкости изделий с целью обеспечения их сохранности и безопасности.

В зависимости от условий хранения и размещения боеприпасов в боевых машинах и на боевых кораблях в тактико-технических заданиях задаются возможные режимы нагрева изделий до различной температуры:

- 1)  $T = 800 \pm 50$  °С – имитация горения жидкого топлива (дизельное топливо, бензин, керосин);
- 2)  $T = 550 \dots 700$  °С – имитация горения твердых типов топлива (хворост, сухая трава);
- 3)  $T = 350 \pm 50$  °С – имитация «пожара за стенкой» (имитация теплового поля с повышенной температурой без контакта с открытым пламенем).

Цель работы – разработка новой установки для испытаний, которая бы позволила отказаться от применения в испытаниях открытого пламени.

В настоящее время на Федеральном казенном предприятии «Нижнетагильский институт испытания боеприпасов» существует методика испытаний на пожаро-взрывобезопасность открытым пламенем пожара (быстрый нагрев), которая не обеспечивает условий для выполнения требований по проведению испытаний в диапазоне температур  $350 \pm 50$  °С.



Рис. 1. Площадка испытаний с ветрозащитными барьерами: 1 – ветрозащитные барьеры, 2 – испытуемое изделие в ящике, 3 – подставки, 4 – емкость с горючей жидкостью

Для уменьшения возможного ветрового воздействия место испытаний ограждается ветровыми барьерами (1). Над емкостями с горючей жидкостью на высоте вершин пламени устанавливается изделие (2). Внутри тары или на изделие, в зависимости от вида испытаний, устанавливаются термодатчики. После этого устанавливаются подставки под изделия для нахождения его над уровнем очага возгорания (3).

К достоинствам данной методики можно отнести то, что для проведения эксперимента используются общедоступные материалы, которые широко используются в других отраслях производства.

Рассмотрим недостатки существующей методики проведения испытаний:

1. Невозможность осуществлять управление горением и скоростью нагрева;
2. Нестабильность процесса горения, невозможность выдержать режим температурного воздействия в узком интервале температур;
3. Вредность материалов (дизельное топливо, АИ-92), используемых при проведении испытания;
4. Установка одноразовая для использования.

В разрабатываемой конструкции предлагается использование нового испытательного стенда на базе электронагревательных элементов, управление которыми позволяет получать заданный режим нагрева.

Установка для проведения испытаний (рис. 2) представляет собой печь из листа Стали 20 толщиной 5 мм [2], состоящих из внешней (1) и внутренней (2) оболочек, между которыми находится базальтовая вата (3) толщиной 100 мм. Внутри самой печи расположены 4 нагревательных элемента типа ТЭН Харвия (4), тележка для погрузки и разгрузки испытуемых изделий (5).

Особенностью конструкции является подъемная дверь (6), а также два откидывающихся люка (7), через которые осуществляется доступ к установке датчиков на испытуемом изделии.

Принцип работы установки предполагает работу в следующем режиме: изделие помещается в холодную печь и осуществляется нагрев изделия до заданной температуры.



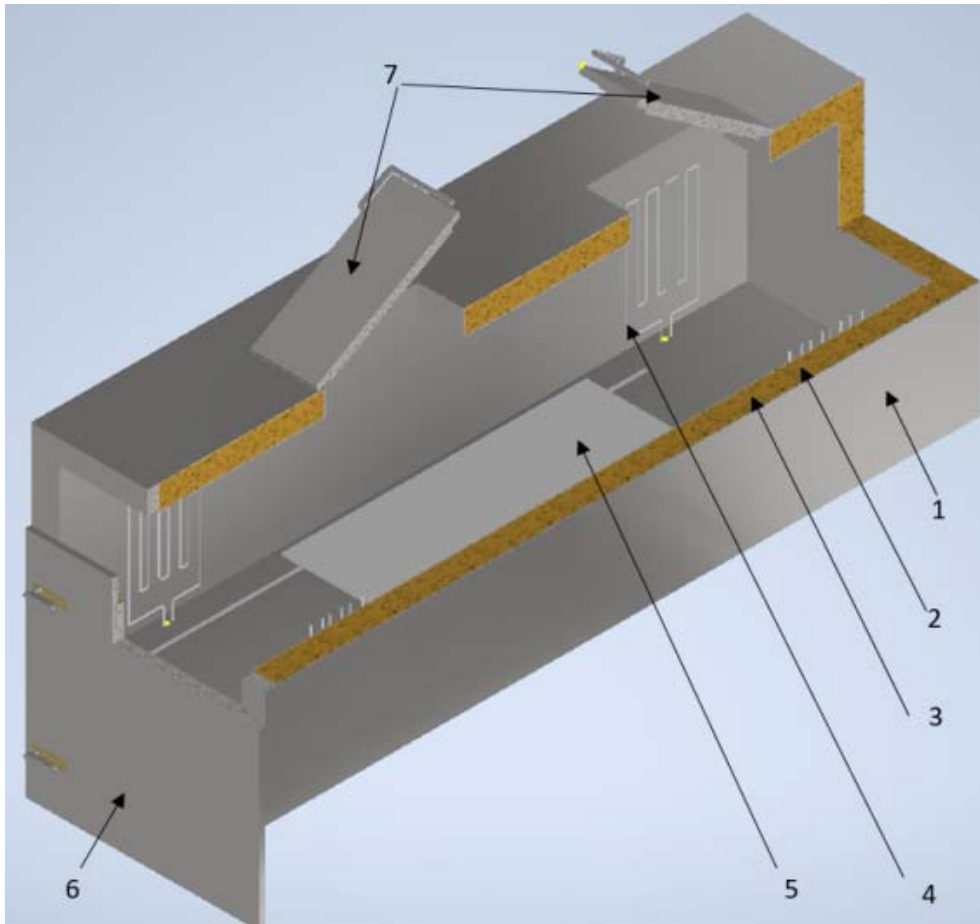


Рис. 2. Установка для проведения испытания: 1 – внешняя оболочка, 2 – внутренняя оболочка, 3 – базальтовая вата, 4 – электронагревательный элемент ТЭН Харвия, 5 – транспортировочная тележка, 6 – подъемная дверь, 7 – откидывающийся люк

В процессе использования данной методики изделие подвергается испытанию, в ходе которого оно должно сохранить свои свойства.

Минимальной потребляемой мощности нагревателя соответствует стационарный режим, то есть температура всех элементов системы поддерживается неизменной, а все выделяемое нагревателем тепло рассеивается в окружающую среду [3]. Температуру окружающей среды принимаем  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  как самое экстремальное условие для проведения испытания.

Для определения мощности нагревателя в этом режиме нужно решить следующую систему уравнений, включающих в себя коэффициент теплопроводности и уравнение Грасгофа для свободной конвекции:

$$\begin{cases} q = \frac{S_1 \cdot \lambda}{\delta_{st}} \cdot (T_0 - T_1) \\ q = \frac{S_2 \cdot \lambda}{\delta_{iz}} \cdot (T_1 - T_2) \\ q = \frac{S_3 \cdot \lambda}{\delta_{st}} \cdot (T_2 - T_3) \\ q = S_4 \cdot \alpha \cdot (T_3 - T_{OS}) \cdot (T_3 - T_{OS}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\alpha_{os}(\Delta T) = \frac{\lambda}{h} \cdot 0,15 \cdot (Gr(\Delta T) \cdot Pr)^{0,33} \quad (2)$$

$$Gr(\Delta T) = \frac{\beta \cdot h^3 \cdot \rho \cdot \Delta T}{\nu^2} \quad (3)$$

Параметры, входящие в состав формул (1)–(3), а также их численные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчета уравнений

Наименование и размерность	Обозначение	Численный результат
Средняя площадь поверхности внутреннего контейнера, м <sup>2</sup>	$S_1$	9,448
Средняя площадь поверхности изоляции, м <sup>2</sup>	$S_2$	11,429
Средняя площадь поверхности наружной оболочки, м <sup>2</sup>	$S_3$	13,421
Площадь внешней поверхности наружной оболочки, м <sup>2</sup>	$S_4$	13,522
Удельная теплопроводность стали, Вт/(м·град)	$\lambda_{st}$	52
Удельная теплопроводность изоляции, Вт/(м·град)	$\lambda_{iz}$	0,047
Толщина стенки внутреннего контейнера и оболочки, м	$\delta_{st}$	0,005
Толщина изоляции, м	$\delta_{iz}$	0,100
Температура внутри контейнера, град	$T_0$	500
Температура на границе между внутренним контейнером и изоляцией, град	$T_1$	499,972
Температура на границе между изоляцией и наружной оболочкой, град	$T_2$	-7,955
Температура внешней поверхности наружной оболочки, град	$T_3$	-7,974
Температура окружающей среды, град	$T_{os}$	-40
Коэффициент теплоотдачи с окружающей средой, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\alpha_{os}$	98,087
Удельная теплопроводность воздуха, Вт/(м·град)	$\lambda_v$	0,0212
Высота наружной оболочки, м	$h$	0,820
Критерий Прандтля для воздуха	$Pr$	0,728
Критерий Грасгофа для условий свободной конвекции	$Gr$	$2,2 \cdot 10^{13}$
Коэффициент теплового расширения воздуха, 1/град	$\beta$	1/233
Ускорение свободного поведения, м/с <sup>2</sup>	$g$	9,81
Кинематическая вязкость воздуха, м/с <sup>2</sup>	$\nu$	$10,04 \cdot 10^{-6}$

Исходя из полученных данных (табл. 1) и раскрытия системы уравнения, мощность электронагревательной печи составляет:

$$q = \frac{S_2 \cdot \lambda_{iz}}{\delta_{iz}} \cdot (T_0 - T_{os}) = \frac{11,429 \cdot 0,047}{0,100} \cdot (500 - (-40)) = 2901$$

Таким образом, с учетом 10 % запаса требуемая мощность нагревателя в режиме поддержания температуры составляет 3,2 кВт.

Минимальной потребляемой мощности нагревателя соответствует режим разогрева: все выделяемое нагревателем тепло расходуется на нагревание элементов системы [4]. В этом случае, формула имеет вид:

$$q = \frac{(c_v \cdot m_v + c_{al} \cdot m_{al} + c_{st} \cdot m_{st} + c_{iz} \cdot 0,5 \cdot m_{iz}) \cdot (T_0 - T_{os})}{\Delta t} \quad (4)$$

где

$$m_v = \rho_v \cdot V_v \quad (5)$$

$$m_k = \rho_{st} \cdot V_k \quad (6)$$

$$m_{iz} = \rho_{iz} \cdot V_{iz} \quad (7)$$

Параметры, входящие в состав формул (4)–(7), а также их численные результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Расчетные величины для определения потребляемой мощности

Наименование и размерность	Обозначение	Численный результат
Удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·град)	$c_v$	1038
Удельная теплоемкость алюминия, Дж/(кг·град)	$c_{al}$	910
Удельная теплоемкость стали, Дж/(кг·град)	$c_{st}$	460
Удельная теплоемкость изоляции, Дж/(кг·град)	$c_{iz}$	920
Масса воздуха, кг	$m_v$	2,2
Плотность воздуха, кг/м <sup>3</sup>	$\rho_v$	1,515
Объем воздуха во внутреннем контейнере, м <sup>3</sup>	$V_v$	1,440
Масса снаряда, кг	$m_{sn}$	11,55
Масса внутреннего контейнера, кг	$m_k$	369,4
Масса подставки, кг	$m_p$	7
Плотность стали, кг/ м <sup>3</sup>	$\rho_v$	7,820
Объем стали внутреннего контейнера, м <sup>3</sup>	$V_k$	0,047
Масса изоляции, кг	$m_{iz}$	227,8
Плотность изоляции, кг/ м <sup>3</sup>	$\rho_{iz}$	200
Объем изоляции, м <sup>3</sup>	$V_{iz}$	1,139
Время разогрева, с	$\Delta t$	3600

Подставляя данные из табл. 2, получаем мощность нагревателя

$$q = \frac{(1038 \cdot 2,2 + 910 \cdot 11,55 + 460 \cdot 7 + 460 \cdot 369,4 + 920 \cdot 227,8 \cdot 0,5) \cdot (500 - (-40))}{3600} = 43610$$

Таким образом, с учетом 10 % запаса требуемая мощность нагревателя в режиме разогрева составляет 48 кВт.

На основе полученных математических данных в программе *Autodesk Inventor*, *Autodesk CFD* была смоделирована установка и произведен процесс нагрева, который показывает распространения тепла, а также ее распределение по испытываемым изделиям [5, 6].

В качестве моделей, на которых проводятся испытания, были приняты бронебойно-кумулятивный наряд БК14М и неуправляемая авиационная ракета С-8КОМ, а также использовалась транспортировочная тележка.

Рассмотрим полученные результаты (рис. 3).

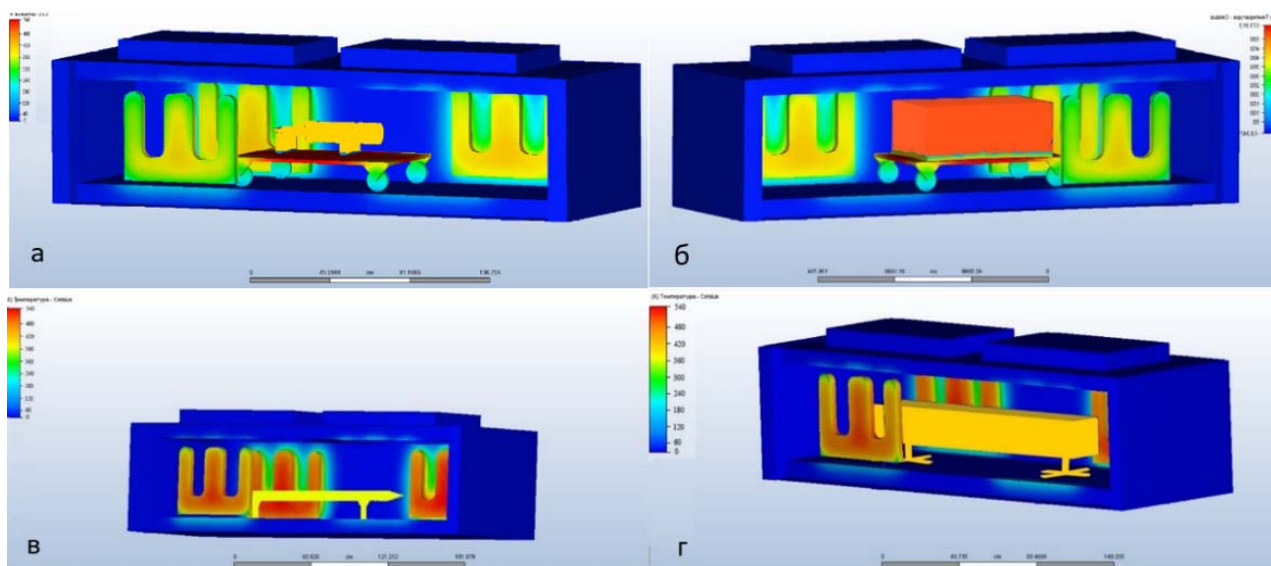


Рис. 3. Результаты визуализации процессов: *а* – нагрева снаряда БК14 М на конструкции, температура изделия при нагреве составляет порядком 400 °С; *б* – нагрева снаряда БК14 М в ящике на конструкции температура изделия, находящегося в ящике при нагреве составляет порядком 500 °С; *в* – нагрева ракеты С8-КОМ на подставках. Температура изделия при нагреве составляет порядком 360 °С; *г* – нагрева ракеты С-8КОМ с укупоркой на подставках. Температура изделия, находящийся в ящике при нагреве составляет порядком 420 °С

По результатам работы, можно отметить, что изделия, которые находятся в транспортировочных ящиках для хранения имеют большую температуру нагревания на 60–100 °С, что увеличивает процесс нагревания изделия.

Данная конструкция позволит обеспечить:

- управляемый нагрев изделия;
- возможность остановки эксперимента в любой момент времени;
- безопасность использования установки;
- низкая стоимость проведения одного эксперимента.

Недостатки предлагаемой конструкции:

- за счет использования электронагревательных элементов ТЭН Харвия идет большой расход электричества;
- в процессе открывания двери происходит перепад температур, в ходе которого требуется дополнительное нагревание.

На основе проделанной работы можно сделать выводы:

1. Изучена существующая методика испытаний высокотемпературного воздействия на боеприпасы и ее элементы. Выявлены ее достоинства и недостатки, что позволило предложить более усовершенствованную конструкцию.
2. Разработана конструкция для проведения испытаний, произведены расчеты.
3. С помощью программ Autodesk Inventor и Autodesk CFD позволило смоделировать данную установку и провести испытания для определения распределения параметров температуры внутри конструкции.
4. Рассмотрены достоинства и недостатки предложенной конструкции.

### Список использованных источников и литературы

1. Справочник по топливу, маслам и техническим жидкостям: (В вопр. и ответах) / Н. И. Итинская, Н. А. Кузнецов. М. : Колос, 1982. 208 с.
2. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин и др. ; под общ. ред. В. Г. Сорокина. М. : Машиностроение, 1989. 640 с.
3. *Исаченко, В. П.* Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. М.: Энергия, 1983. 440 с.
4. *Михеев, М. А.* Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. М. : Энергия, 1977. 344 с.
5. Autodesk Inventor: [сайт]. URL: <https://www.autodesk.ru/products/inventor/features> (дата обращения: 23.12.2020).
6. Autodesk Inventor. URL: <https://www.pointcad.ru/product/autodesk-simulation-cfd/funkczional-autodesk-cfd> (дата обращения: 23.12.2020).

**Прочностной расчет ведущего устройства снаряда  
уменьшенной радиозаметности к системе «Нона-С»,  
выполненного из композитных материалов**

*Д. А. Рязанов<sup>1</sup>, С. С. Ильин<sup>2</sup>, Е. А. Хмельников<sup>1</sup>,  
Т. Е. Заводова<sup>1</sup>, К. В. Смагин<sup>1</sup>, М. Ю. Семашко<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ

<sup>2</sup> Филиал «Нижнетагильский институт испытания металлов»  
ФКП «НИО «ГБИП России»

<sup>3</sup> Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)

*Рассмотрены концепции 120-мм боеприпаса (БП) к системе 2С9 «Нона-С» с заменой материалов корпуса на композитные материалы, проведенной для уменьшения радиозаметности боеприпаса на радарх условного противника. Рассмотрены варианты исполнения ведущего устройства для разных концепций модернизации. Произведены прочностные расчеты ведущих устройств для различных исполнений БП.*

**Ключевые слова:** композитные материалы, ведущее устройство, прочность, уменьшенная радиозаметность.

В настоящий момент в мире существует несколько комплексов активной защиты (КАЗ) [1].

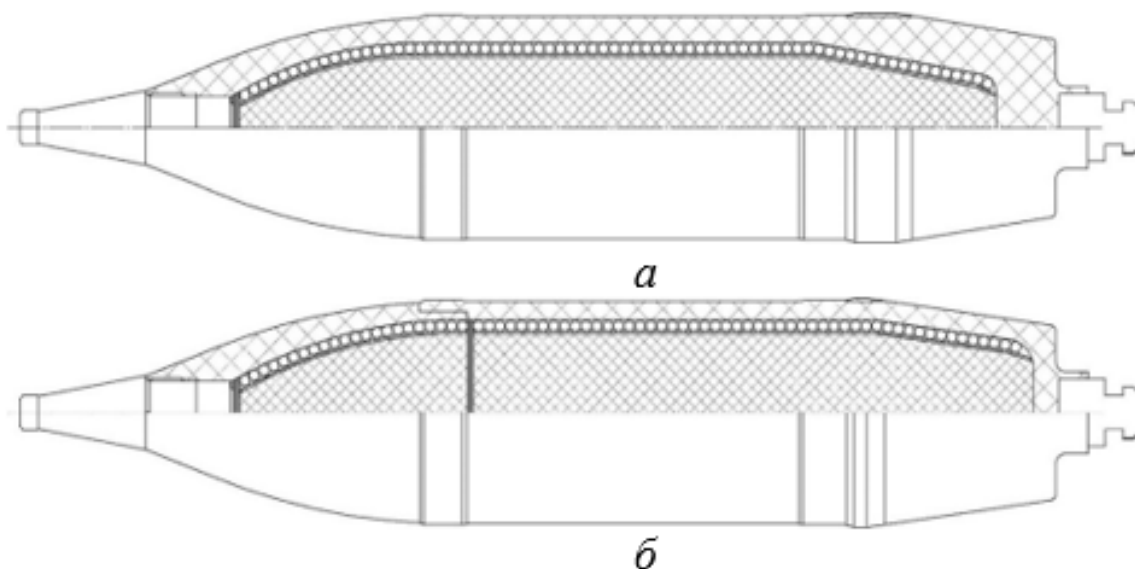
В связи с этим была поставлена задача о проектировании боеприпаса, который имел бы достаточную степень радиопрозрачности для того, чтобы быть защищенным от средств обнаружения, которыми обладают КАЗ, а также имел достаточную эффективность для поражения легкобронированной техники и находящейся рядом пехоты.

Исходя из анализа параметров рассмотренных материалов для дальнейшего использования был выбран стеклопластик, который отличается лучшим сочетанием радиопрозрачности и прочностных свойств.

Актуальным представляется разработать боеприпас уменьшенной радиозаметности для самоходного артиллерийского орудия (САО) 120-мм 2С9 «Нона-С».

Было принято решение за основу для нового боеприпаса уменьшенной радиозаметности выбрать существующий снаряд ЗОФ49 (рисунок).

Изготовление нарезов на корпусе, выполненном из композитных материалов, чрезвычайно сложно, поэтому необходимо перенести ведущее устройство (ВУ) на ширину задней части и провести прочностной расчет.



Варианты конструкций боеприпасов: БП уменьшенной радиозаметности (*a*),  
БП уменьшенной радиозаметности с уменьшенными дном и стенками (*б*)

Для расчета воспользуемся методом Ильюшина [2].

Характеристики композиционных материалов, используемые в дальнейших расчетах, представлены в справочной литературе [3].

В дальнейших расчетах ширина ВУ принята как у штатного БП 0,03696 м.

Результаты расчета прочности зоны ВУ боеприпаса уменьшенной радиозаметности (рисунок, *a*) для различных материалов представлены в табл. 1.

**Таблица 1. Результаты расчета прочности зоны ВУ боеприпаса конструкции (рисунок, *a*)**

Параметр	Материал корпуса		
	Стеклотекстолит с эпокси-фенольным связующим	Стеклопластик СВМ (1:1)	Эпоксидный стекловолокнит
Осевой коэффициент $A$ , кгс/см <sup>2</sup>	1465,756	1391,544248	5493,29
Экваториальный коэффициент $B$ , кгс/см <sup>2</sup>	1363,162	1157,943809	4362,117
Сила врезания $q_{ц}$ , кгс/см <sup>2</sup>	842,7915	875,1013097	3312,232
Прогиб $W_1$ , м	0,00120403	0,001228423	0,00110868
Допустимый прогиб $[W_1]$ , м	0,00096755	0,0013075	0,0013075

Исходные данные и результаты расчета прочности зоны ВУ БП уменьшенной радиозаметности (рисунок, *б*) для различных материалов представлены в табл. 2.

Прогиб корпуса в зоне ВУ не превышает допустимый только для корпуса, изготовленного из эпоксидного стекловолокнита, но при этом такой корпус имеет низкий запас прочности.

Примем ширину уменьшенного ВУ из материала корпуса в 0,022 м и произведем перерасчет прогиба корпуса в зоне ВУ.

Таблица 2. Результаты расчета прочности зоны ВУ боеприпаса (рисунок, б)

Параметр	Материал корпуса		
	Стеклотекстолит с эпокси-фенольным связующим	Стеклопластик СВМ (1:1)	Эпоксидный стекловолокнит
Осевой коэффициент $A$ , кгс/см <sup>2</sup>	863,855	826,8876382	3274,629
Экваториальный коэффициент $B$ , кгс/см <sup>2</sup>	798,6473	678,4145482	2555,671
Сила врезания $q_{\text{п}}$ , кгс/см <sup>2</sup>	611,4825	611,1518119	2341,809
Прогиб $W_1$ , м	0,00146185	0,001457574	0,00135713
Допустимый прогиб $[W_1]$ , м	0,00101169	0,00136715	0,00136715

Результаты расчета прочности зоны ВУ БП (рисунок, б) для различных материалов с уменьшенным ВУ представлены на табл. 3.

Таблица 3. Результаты расчета прочности зоны ВУ боеприпаса (рисунок, б)

Параметр	Материал корпуса		
	Стеклотекстолит с эпокси-фенольным связующим	Стеклопластик СВМ (1:1)	Эпоксидный стекловолокнит
Осевой коэффициент $A$ , кгс/см <sup>2</sup>	1448,92	1386,916084	5492,446
Экваториальный коэффициент $B$ , кгс/см <sup>2</sup>	1339,549	1137,886219	4286,558
Сила врезания $q_{\text{п}}$ , кгс/см <sup>2</sup>	838,086	877,1430578	3293,441
Прогиб $W_1$ , м	0,00116264	0,0011797372 3	0,00104082
Допустимый прогиб $[W_1]$ , м	0,00101169	0,00136715	0,00136715

Принятая ширина ВУ 0,022 м удовлетворяет условиям прочности.

Материалом корпуса выбран стеклопластик СВМ (1:1).

Максимальное давление боевой грани нарезав ствольного орудия на выступ ВУ проектируемого снаряда определим по зависимости (1), изложенной в литературе [2]:

$$\sigma_N = \pi \frac{P_{\text{max}}}{qn\Delta b} A \operatorname{tg} \alpha, \quad (1)$$

где  $p_{\text{max}}$  – расчетное давление продуктов горения (ПГ), кг/см<sup>2</sup>;  $q$  – масса снаряда, кг.;  $n$  – число нарезов, шт.;  $\Delta$  – глубина нарезов, м;  $b$  – ширина ВУ, м;  $A$  – осевой момент инерции снаряда, кг·см·с<sup>2</sup>;  $\alpha$  – угол наклона нарезов ствольного орудия, град.

Условие прочности ВУ при выстреле  $\sigma_N \leq [\sigma]$ , где  $[\sigma]$  – допустимое давление боевых граней нарезов ствольного орудия на выступы ВУ, кг/см<sup>2</sup>. Ширина ВУ может быть найдена по зависимости (2):

$$b_1 = \pi \frac{P}{n\Delta\sigma_{\text{ВУ}}} \frac{Ag}{q} \operatorname{tg} \alpha, \quad (2)$$

где  $\sigma_{\text{ВУ}}$  – допустимое давление боевой грани на выступ ВУ.



$\sigma_{\text{ВУ}}$  зависит от механических свойств материала, конструкции и условий работы ВУ.

Определим работу сил трения по зависимости (3):

$$a = \frac{AV_0^2}{2R^2} \frac{f \operatorname{tg} \alpha}{\Delta \rho n \cos \alpha}, \quad (3)$$

где  $V_0^2$  – начальная скорость БП, м/с;  $f$  – коэффициент трения материала ВУ о металл стенок ствола орудия;  $R$  – полукалибр, м.

Условие прочности ВУ при выстреле –  $a \leq [a]$ , где  $[a]$  – допустимая работа силы трения, при которой боевая грань выступа ВУ не истирается при выстреле.

Рассчитаем ширину ВУ по зависимости (4):

$$b_2 = A \frac{V_0^2}{2R^2} \frac{f \operatorname{tg} \alpha}{100 \Delta \rho n \cos \alpha}. \quad (4)$$

Ведущее устройство должно одновременно удовлетворять двум условиям прочности. Поэтому за ширину ВУ принимается наибольшая величина из двух расчетных величин (2) или (4).

Путем анализа проведенных исследований внутренней баллистики предлагаемых конструкций было выяснено, что для использования в метательном заряде наиболее эффективными являются пороха марок 7/1 фл. БП. и 7/1, характеристики которых необходимы для расчета максимального давления боевой грани нарезов орудия на ВУ и работы силы трения [4].

Результаты расчетов представлены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты расчетов конструкций БП (рисунок, а и б)

Параметр	Конструкция рис. а		Конструкция рис. б	
	7/1 фл БП	7/1	7/1 фл БП	7/1
Допускаемое максимальное давление боевой грани нарезов орудия на ВУ $\sigma_{\text{ВУ}}$ , кг/см <sup>2</sup>	2386,36			
Максимальное давление боевой грани нарезов орудия на ВУ, $\sigma_N$ , кг/см <sup>2</sup>	290,1313	344,372	475,6603	565,9868
Минимальная ширина ВУ с учетом максимального давления боевой грани нарезов орудия, $b_1$ , м	0,0044619639	0,0052961494	0,00447727871	0,00532750103
Работа силы трения, $a$ , кг·м/см <sup>2</sup>	73,12959	88,50209	117,4011	151,354
Минимальная ширина ВУ с учетом допустимой силы трения, $b_2$ , м	0,00244051751	0,00309745567	0,00243307564	0,00313673107

Выводы:

1. Рассмотрены 2 концепции модернизации БП ЗОФ-49 к САО 2С9 «Нона-С».

2. Произведен подбор материалов корпусов предложенных модификаций снаряда, в качестве материала корпуса выбран стеклопластик СВМ(1:1).

3. Прогиб конструкции БП уменьшенной радиозаметности в зоне ВУ не превышает допустимый:  $W_1 < [W_1]$ . Однако для выполнения условия прочности в зоне ВУ БП уменьшенной радиозаметности с уменьшенными стенками и дном ширина ВУ была уменьшена до 0,022 м.

4. Максимальное давление боевой грани нарезов орудия на ведущее устройство БП уменьшенной радиозаметности обоих вариантов конструкции не превышает допустимой величины:  $\sigma_N \leq \sigma_{ВУ}$ .

5. Работа силы трения не превышает допустимой величины у обоих вариантов конструкции:  $a \leq [a]$ , следовательно, образующиеся нарезы не истираются при движении снаряда по каналу ствола, а принятая ширина ведущего устройства в 0,022 м у конструкции БП уменьшенной радиозаметности с уменьшенными стенками и дном и ширина ведущего устройства у конструкции БП уменьшенной радиозаметности в 0,0369 м больше минимальной необходимой  $b_1$  и  $b_2$ . Прочность ведущего устройства сохраняется.

#### Список использованных источников и литературы

1. Гусев, Д. А. Комплексы активной защиты // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. № 12-4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksy-aktivnoy-zaschity> (дата обращения: 17.03.2021).

2. Водопьянов, М. Я. Основы проектирования боеприпасов. Санкт-Петербург : Изд. БГТУ «Военмех», 2007. 387 с.

3. Михаил, Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы: 2-е изд. СПб. : Научные основы и технологии, 2010. 822 с.

4. Хмельников, Е. А. Решение основной задачи внутренней баллистики : учеб. пособие по курсу «Основы баллистики и аэродинамики» / Е. А. Хмельников, А. В. Стыров. Нижний Тагил : ФКП «НТИИМ», 2017. 122 с.

## Управление ракеты-носителя с помощью вдув газа в сверхзвуковую часть сопла

Л. С. Соловьев

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*Одной из разновидностей газодинамических органов управления является, вдув газа в закритическую область камеры. Данный способ используется для создания газодинамических сил, обеспечивающих управление положением ракеты-носителя на активном участке полета. Способ управления отличается небольшим весом и хорошей управляющей силой.*

**Ключевые слова:** вдув высокотемпературного газа, ракета-носитель, форсунки, физическая схема процесса, система управления вектором тяги.

Вдув газа в сверхзвуковую часть сопла представляет из себя несимметричный впрыск газа, благодаря чему, возникает боковая управляющая сила, обусловленная динамическим и химическим взаимодействием потоков, а также импульсом струи вводимого рабочего тела. Могут вводиться инертные и химически активные газы и жидкости (например, четырех-окись азота, хладон, водный раствор перхлората стронция), компоненты топлива, горячий газ из камеры или газогенератора ракетного двигателя (основного или специального).

Самым результативным эффектом обладает вдув высокотемпературного газа, который, как правило, подают через две пары диаметрально расположенных отверстий (форсунки). Первая пара форсунок создает управляющий импульс для управления по тангажу, вторая пара – по рысканию. Для управления по крену понадобятся дополнительные сопла. Система вдува проста, надежна и обладает небольшими массогабаритными характеристиками. В качестве примера могут послужить ракеты-носители (в основном твердотопливные) начиная с конца 60-х гг. (например, в ЮЛ-1205 и на 2-й ступени РН «Диаман-В/Р-4» (Diamant)). Максимальное значение создаваемых управляющих сил соответствует отклонению вектора тяги ракетного двигателя на угол  $\sim 6^\circ$  (при этом расход вторичного рабочего тела достигает 5–6 % от основного расхода). Создание больших управляющих сил связано с большими потерями удельного импульса [1].

В зоне вдува перед отверстием и за ним образуется пространственный скачок уплотнения, за которым возникает зона повышенного давления. Это давление по боковой поверхности сопла распределено в осевом и поперечном направлениях неравномерно. Но в целом, интегральным образом, давление дает управляющую боковую силу, направленную в сторону вдува. Возникновение управляющей силы можно трактовать и как следствие изменения вектора скорости потока в выходном сечении сопла.

Механизм образования боковой управляющей силы состоит в следующем, вторичная струя газа при вдуве в расширяющуюся часть сопла воздействует на основной поток как источник массы, энергии и количества движения. Взаимодействие потоков приводит к возникновению в сопле косоугольного скачка уплотнения (рисунок), за которым находится зона повышенного статического давления. При этом эпюра давлений на внутренней поверхности расширяющейся части сопла не является симметричной, что и вызывает появление боковой неуравновешенной (управляющей) силы. Основная часть боковой управляющей силы образуется ниже по потоку от места вдува. Процесс взаимодействия потоков при вдуве имеет сложный характер.

**Физическая схема процесса.** В сопле при вдуве газа в расширяющуюся часть сопла: течение сопровождается возрастанием боковой управляющей силы. При дальнейшем повышении расхода вторичного газа зона, захваченная скачком уплотнения, достигает диаметрально противоположной стенки сопла, что приводит к уменьшению боковой управляющей силы. Для предотвращения этого явления отверстия вдува рекомендуется располагать на расстояниях от критического сечения сопла, составляющих 20...40 % длины раструба. Возникновение боковой силы при вдуве сопровождается увеличением осевой тяги двигателя. Зависимость приращения тяги при вдуве от вторичного расхода приближается к линейной. Пропускание части продуктов сгорания топлива через отверстия вдува, а не через основное сопло связано, однако, с потерями удельного импульса двигателя. Компенсация этих потерь требует размещения на борту ракеты дополнительного запаса топлива.

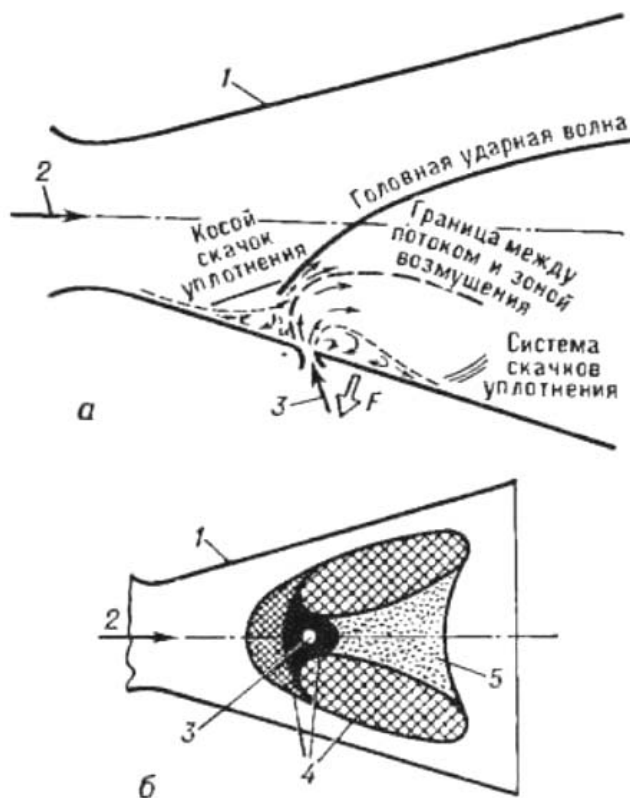
Для независимого управления по каналам тангажа и рысканья достаточно четырех дросселируемых отверстий вдува, расположенных симметрично по периметру сечения сопла, перпендикулярного его продольной оси. В этом случае, осуществляя вдув вторичного газа через два соседних отверстия, можно обеспечить создание управляющих усилий по тангажу и рысканью одновременно. В каждом канале управления используется по два отверстия вдува, расположенных на диаметрально противоположных стенках сопла. Это позволяет, при необходимости, изменить направление управляющей силы в каждом из каналов на противоположное. При отсутствии управляющих усилий клапаны вдува либо закрыты, либо открыты на одинаковую величину при вдуве от автономного газогенератора [2].

В последнем случае эпюра давления продуктов сгорания на стенке сопла также будет оставаться симметричной.

Система управления вектором тяги (СУВТ) с помощью вдува имеет сравнительно малую массу, высокое быстродействие. Практическая реализация системы вдува определяется созданием надежно работающих (в условиях высокотемпературного и эрозионного воздействия) клапанов.

Управляющие моменты по крену обычно целесообразно получать с помощью таких органов управления, как, например, небольшие вращающиеся управляющие сопла, работающие в зависимости от типа СУВТ либо на продуктах сгорания основного топлива двигателя, либо соединенные газогенератором вдува. Это позволяет уменьшить общее количество клапанов вдува и упростить

СУВТ, хотя в принципе управление вектором тяги по всем каналам может осуществляться и посредством системы вдува вторичного газа в расширяющуюся часть сопла. В последнем случае для эффективной работы СУВТ по всем каналам, в том числе и по крену, достаточно восьми дросселируемых отверстий вдува, расположенных равномерно по периметру сечения сопла [3].



Течение в сопле при вдуве газа: *а* – картина течения (вид сбоку); *б* – распределение давления газа по стенке сопла (вид сверху); *F* – боковая управляющая сила; *1* – стенка сопла; *2* – основной поток газа; *3* – струя вдуваемого газа; *4* – область повышенного давления; *5* – область пониженного давления

Вопросы, связанные с организацией системы бокового вдува вторичного газа в расширяющуюся часть сопла, в каждом конкретном случае требуют специальной конструктивной проработки. Отдельным экспериментально-доводочным работам должен предшествовать приближенный расчетный анализ, основанный на имеющихся результатах изучения течений, возникающих при боковом вдуве газа в сверхзвуковой поток.

#### Список использованных источников и литературы

1. *Абрамович, Г. И.* Прикладная газовая динамика. – В 2 ч. – Ч. 1. Учеб. руководство: для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва : Наука, Гл. ред. Физ.-мат., 1991. – 600 с.
2. *Тимнат, И.* Ракетные двигатели на химическом топливе / пер. с англ. – Москва : Мир, 1990. – 294 с.
3. Рабочие процессы в ракетах твердого топлива : Справочник / А. А. Шишков и др. – Москва : Машиностроение, 1988. – 240 с.

## Разработка программы для расчета продольно-поперечных колебаний ствола артиллерийского орудия\*

В. Г. Суфиянов, Д. А. Клюкин

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*В статье представлены результаты проектирования и разработки программно-вычислительного комплекса моделирования продольно-поперечных колебаний артиллерийского орудия в процессе выстрела. Результаты численных расчетов отображаются в виде динамических графиков и на трехмерных моделях исследуемых объектов. Физико-математическая модель выстрела включает процессы внутренней и внешней баллистики, напряженно-деформированного состояния и колебаний ствола с учетом дополнительных сил и моментов. Представлены результаты тестирования производительности программно-вычислительного комплекса и сеточной сходимости методов решения задачи продольно-поперечных колебаний ствола артиллерийского орудия.*

**Ключевые слова:** колебания ствола, артиллерийский выстрел, математическое моделирование, программно-вычислительный комплекс, визуализация.

### Введение

В процессе проектирования, разработки и отработки стрелково-пушечного вооружения [1] с использованием аппарата имитационного и математического моделирования проводятся исследования сопряженных физических процессов: нагревание, воспламенение, горение пороха [2, 3], деформация и колебания ствола [4], подрыв снаряда [5] и т. д. Исследование этих процессов проводится в различных программных средах моделирования и инженерных расчетов. Разработка единой вычислительной платформы позволяет системно подойти к изучению физических процессов, протекающих в артиллерийских орудиях в процессе выстрела. Целью разработки программно-вычислительного комплекса (ПВК) расчета продольно-поперечных колебаний ствола артиллерийского орудия является систематизация, обобщение и автоматизации решения комплекса задач моделирования напряженно-деформированного состояния ствола, с учетом связанных процессов внутренней и внешней баллистики.

При проектировании ПВК были сформулированы следующие допущения и требования:

- 1) решаемые задачи могут быть представлены в одномерной постановке;
- 2) задача внутренней баллистики рассматривается в термодинамической постановке [2], с учетом переменного сечения канала ствола;

---

© Суфиянов В. Г., Клюкин Д. А., 2021

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-01-00072.

3) ствол может иметь цилиндрическую форму с технологическими отклонениями;

4) проводится моделирование 3 физических объектов – ствол, снаряд и пороховой заряд;

5) пользователь способен произвольно задавать и изменять физические характеристики объектов, расчетную сетку и параметры каждой из решаемых задач с помощью графического интерфейса программы;

6) в программе должна быть возможность экспорта и импорта физических объектов и настроек расчета;

7) требуется визуализация расчетов с помощью динамических графиков и трехмерных моделей.

Постановка задачи о продольно-поперечных колебаниях ствола проводится с учетом начального прогиба, трения снаряда о ствол, несоосности поперечных сечений и динамического распределения давления в стволе в процессе выстрела [6]. Численное решение задачи проводится конечно-разностным методом на основе интегро-интерполяционного подхода [7].

### **Разработка программы**

При разработке программно-вычислительного комплекса в качестве основного языка был выбран C#, данный язык достаточно гибкий и позволяет писать быстро исполняемый, легко расширяемый код в среде разработки Visual Studio 2019. Платформа разработки – .Net 5.0, основным преимуществом которой является серьезный прирост в производительности по сравнению с Core и .Net Framework. Экспорт и импорт данных производится в формате JSON. Отображения графиков осуществляется с использованием библиотеки ScottPlot, которая позволяет масштабировать и перемещаться по графику в реальном времени, выгружать данные в CSV и JSON формате и др. Отображение 3D-модели объектов и дальнейшая визуализация колебаний и движения снаряда производится с использованием библиотеки OpenGL через расширение SharpGL.

Структура ПВК представлена на рис. 1, в которой выделены блоки для решения следующих задач:

– блок управления данными предоставляет возможность пользователю работать с исходными данными в формате JSON и отвечает за взаимодействие программы с файлами данных;

– блок вычислений специализируется на решении краевых задач, а также систем дифференциальных уравнений в задачах внутренней и внешней баллистики методом Рунге – Кутты 4-го порядка;

– блок визуализации включает средства представления расчетов на графике и пространственного моделирования с помощью библиотеки OpenGL.

Пользовательский интерфейс ПВК представлен на рис. 2, на которой представлена 3D-конечно-элементная модель артиллерийского орудия и снаряда.

Основные задачи, решаемые ПВК, представлены в главном меню: «Гравитационный прогиб», «Баллистика», «Колебания XYZ», «Радиальные колебания», «Крутильные колебания» и др.

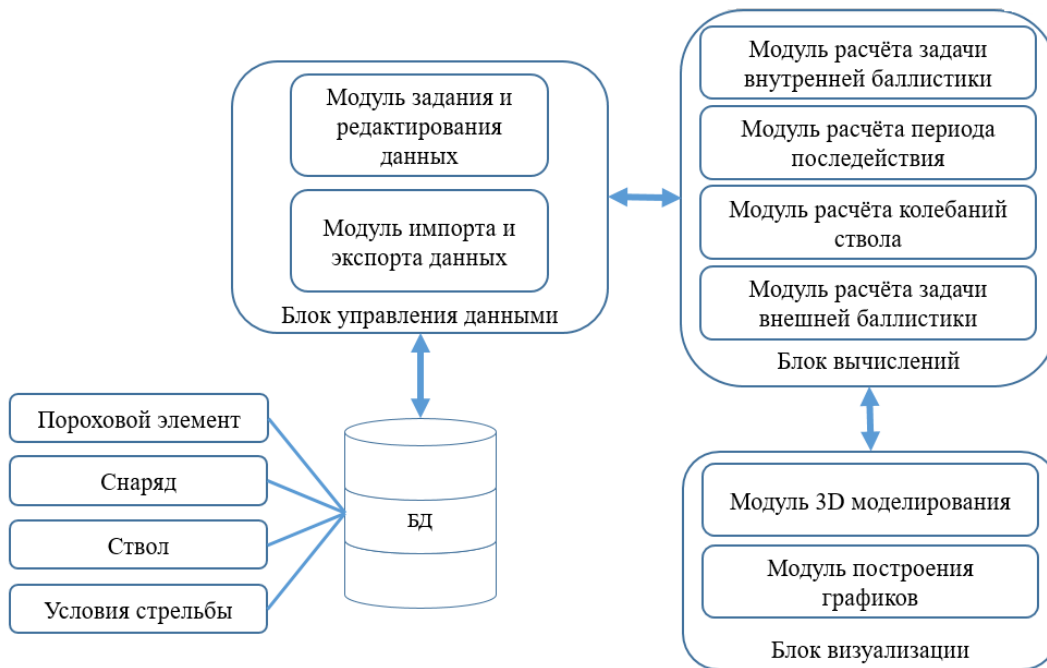


Рис. 1. Структура программы для расчета продольно-поперечных колебаний ствола артиллерийского орудия

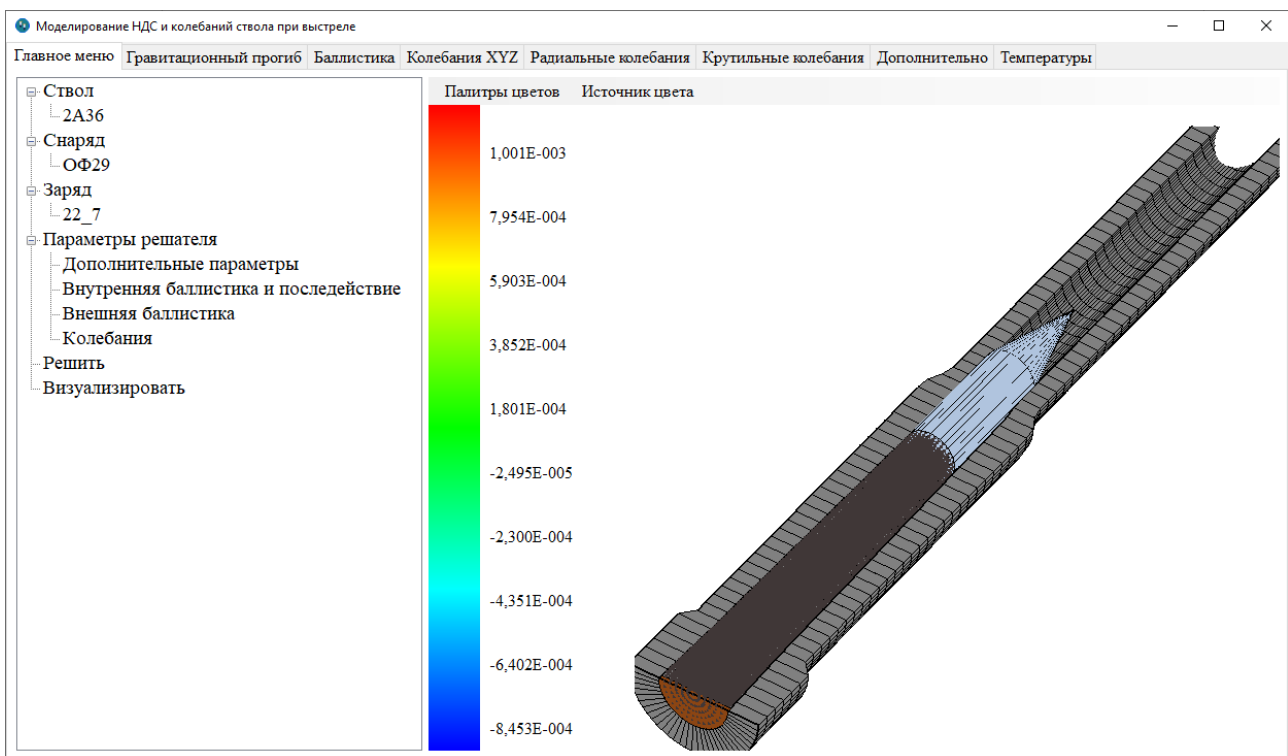


Рис. 2. Трехмерное представление 152-мм гаубицы с ОФ снарядом

Решение основной задачи внутренней баллистики осуществляется во вкладке «Баллистика» (см. рис. 3), где представлены кривые среднего давления, давления на дно канала ствола и на дно снаряда, а также скорость снаряда. На странице «Графики» пользователю предоставляется возможность строить кривые зависимостей расчетных параметров от времени и распределение параметров по каналу ствола. Расчет движения снаряда после вылета из ствола представлена на странице «Внешняя баллистика».



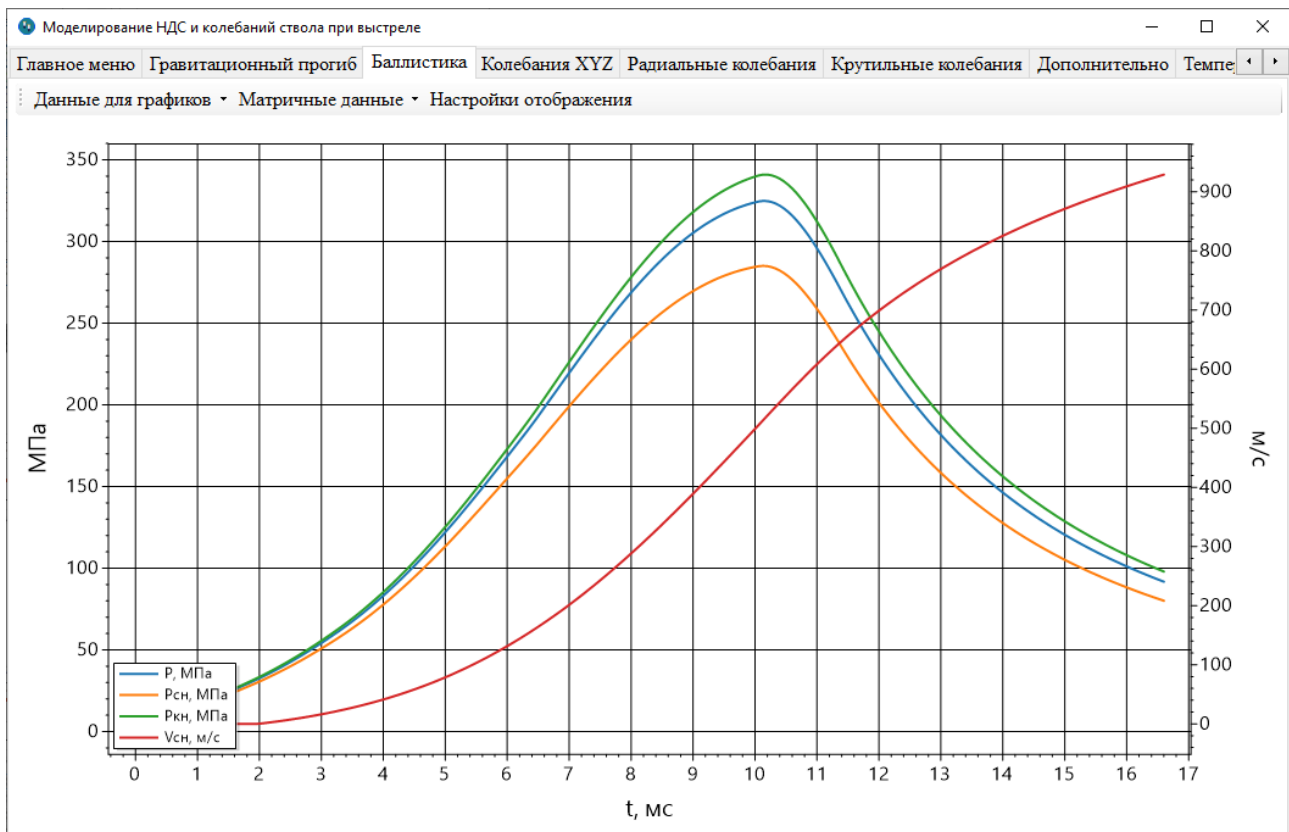


Рис. 3. Распределение давлений и скорость снаряда, полученные из решения задачи внутренней баллистики

Во вкладке «Колебания XYZ» отображается изменение положения ствола в различные моменты времени. На рис. 5 представлены графики колебаний ствола в поперечном направлении по оси  $Oy$  в моменты времени 0, 10, 20, 30 мс, а также положение снаряда, которое отмечается в виде точки. Аналогично отображаются колебания в продольном направлении по оси  $Ox$  и поперечном направлении по оси  $Oz$ . В начальный момент времени (0 мс) отображается начальный прогиб ствола, который соответствует гравитационному прогибу и представлен также во вкладке «Гравитационный прогиб».

Результаты исследования производительности программы и сеточной сходимости в зависимости от числа узлов расчетной сетки и шага по времени представлены в таблице. Постоянным оставалось конечное время расчета  $t_{\max} = 30$  мс. Вычисления проводились на ЭВМ со следующими характеристиками: процессор – AMD Ryzen 5 3600 с частотой 4200 МГц; оперативная память –  $2 \times 8$  Гб с частотой 3733 МГц; хранилище данных – твердотельный накопитель объемом 240 Гб, скорость записи и чтения 450 Мб/с.

Как видно из таблицы, максимальное время расчетов на рассматриваемой сетке составило примерно 10 с, что вполне приемлемо для выполнения массовых расчетов. Анализ сеточной сходимости разработанного численного метода проводился по максимальному давлению и максимальному смещению канала ствола по оси  $Oy$ , который показал стабильность как решения задачи внутренней баллистики, так и колебаний ствола.

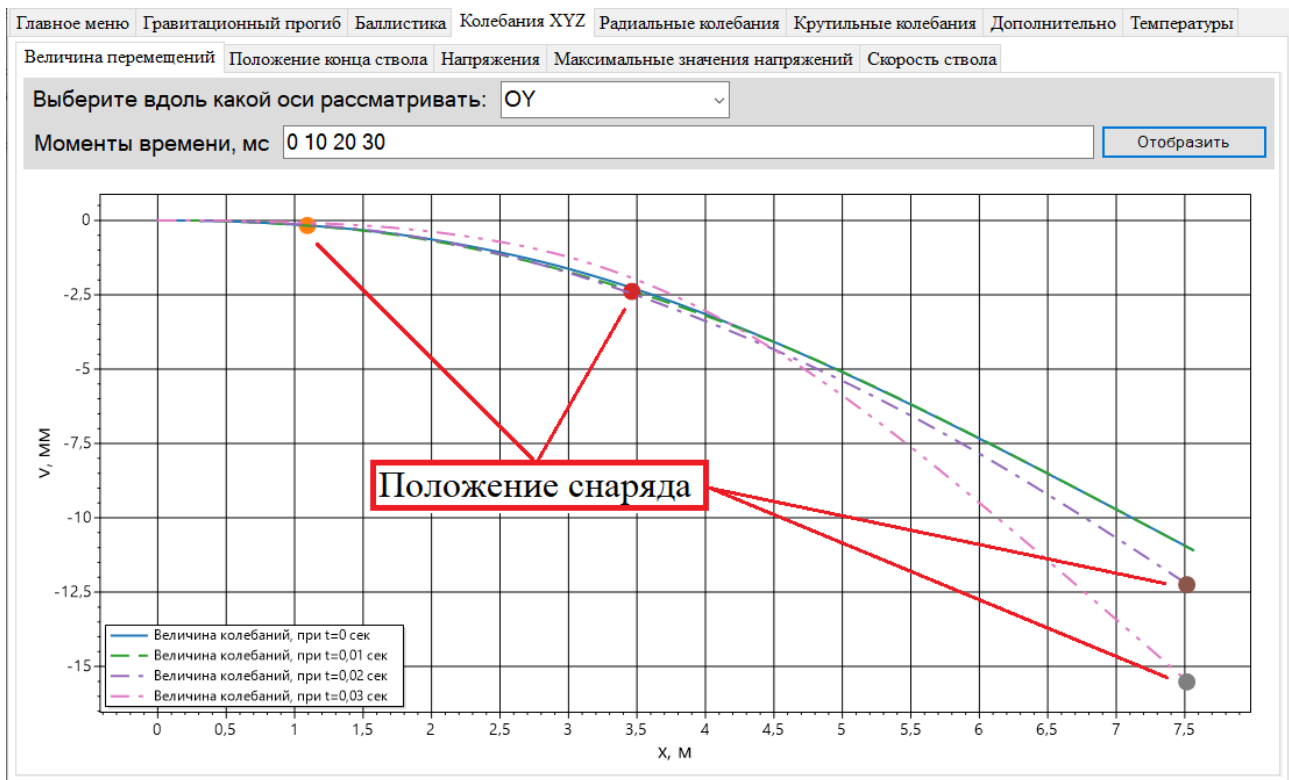


Рис. 4. Отклонения от положения равновесия по  $Oy$  для 152-мм гаубицы

#### Анализ производительности ПК и сеточной сходимости

Узлов сетки I	Шаг по времени $\tau$ , мс	Время решения задачи внутренней баллистики, сек.	Общее время вычислений, сек.	Максимальное давление в стволе $(p_{\text{кн}})_{\text{max}}$ , МПа	Максимальное смещение ствола по $Oy$ , мм
50	0,166	0,334	1,62	342,8	13,622
	0,083	0,609	2,62	340,5	13,622
	0,055	0,905	3,50	340,9	13,622
100	0,166	0,332	2,07	342,8	13,622
	0,083	0,606	4,23	340,5	13,622
	0,055	0,919	6,02	340,9	13,622
200	0,166	0,330	3,63	342,8	13,623
	0,083	0,610	7,37	340,5	13,623
	0,055	0,923	10,29	340,9	13,623

#### Выводы

Разработан программно-вычислительный комплекс математического моделирования и отображения результатов математического моделирования процесса выстрела из артиллерийского орудия, который включает горение пороха, движение снаряда по стволу, напряженно-деформированное состояние и продольно-поперечные колебания ствола, а также движение снаряда на внешне-баллистической траектории.

Исследование ПК показало эффективность расчетов продольно-поперечных колебаний ствола и связанных с ним внутрибаллистических расчетов.

## Список использованных источников и литературы

1. *Русяк, И. Г.* Физические основы и газовая динамика горения порохов в артиллерийских системах : монография / И. Г. Русяк, А. М. Липанов, В. М. Ушаков. – Москва; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2016. – 456 с.
2. *Русяк, И. Г.* Решение задачи Лагранжа с использованием физико-математических моделей различной размерности / И. Г. Русяк, В. А. Тененев, Р. Р. Дряхлов // ИСОС'2020 : сборник трудов Десятой Всероссийской конференции, Ижевск, 17–19 марта 2020 г. – С. 271–283.
3. *Игнатов, А. В.* Метод расчета свободных поперечных колебаний ствола автоматической пушки при заданном условии закрепления / А. В. Игнатов, С. Н. Богомолов, Н. Д. Федянин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – Вып. 11. – Ч. 2. – С. 70–77.
4. Программный комплекс решения задач проектирования и отработки стрелково-пушечного вооружения / А. М. Липанов, И. Г. Русяк, В. Г. Суфиянов, С. А. Королев // ИСОС'2020 : сборник трудов Десятой Всероссийской конференции, Ижевск, 17–19 марта 2020 года. – С. 175–188.
5. *Суфиянов, В. Г.* Результаты математического имитационного моделирования поля поражения при подрыве осколочно-пучкового снаряда / В. Г. Суфиянов, И. Г. Русяк // ИСОС'2020 : сборник трудов Десятой Всероссийской конференции, Ижевск, 17–19 марта 2020 года. – С. 294–299.
6. *Русяк, И. Г.* Исследование влияния упругих деформаций и колебаний ствола на точность стрельбы / И. Г. Русяк, В. Г. Суфиянов, Д. А. Ключкин // Интеллектуальные системы в производстве. – 2020. – Т. 18. – № 4. – С. 98–108.
7. *Самарский, А. А.* Введение в теорию разностных схем. – Москва : Наука, 1971. – 552 с.

## Численное моделирование сопряженного теплообмена при ламинарном режиме течения нефтяного флюида в скважине

А. В. Титова, С. С. Макаров

Институт механики УдмФИЦ УрО РАН

*Тема доклада посвящена исследованию процесса образования асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) в скважине при использовании математической модели сопряженного теплообмена при ламинарном движении нефтегазоводяной среды. Рассматривается режим работы скважины, при котором подъем среды на поверхность осуществляется за счет энергии пласта. Результаты математического моделирования позволяют провести оценку образования АСПО отложений при заданном термобарическом состоянии скважины.*

**Ключевые слова:** сопряженный теплообмен, пограничный слой, образование асфальтосмолопарафиновых отложений в скважине, ламинарное движение жидкости.

Основным компонентом АСПО являются парафины, растворенные в нефтегазоводяной среде, содержание которых может достигать до 70 % в зависимости от расположения месторождения. Данные отложения нередко осложняют эксплуатацию нефтяных скважин, повышая гидравлическое сопротивление, что в свою очередь может стать причиной аварии [1].

На рис. 1 приведена расчетная схема эксплуатационного участка скважины, где  $L$  – длина скважины,  $p_{pl}$ ,  $T_{pl}$  – давление и температура окружающей среды,  $p_l$ ,  $T_l$ ,  $\rho u_l$  – параметры нефтегазоводяной среды, зависящие от компонентного состава.  $T_m$  – температура стенки трубы,  $T_w$  – температура цементного камня,  $q$  – тепловой поток.

Задача решается в двухмерной осесимметричной постановке. Математическая модель движения газожидкостной среды построена на основе уравнений пограничного слоя и состоит из уравнений количества движения (1), неразрывности (2), энергии (3), переноса парафина (4):

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{dp}{dx} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \mu \frac{\partial u}{\partial r} - g\rho, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u r)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v r)}{\partial r} = 0, \quad (2)$$

$$c\rho u \frac{\partial T}{\partial x} + c\rho v \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} + \dot{m} \cdot Q_p, \quad (3)$$

$$\rho u \frac{\partial Y_p}{\partial x} + \rho v \frac{\partial Y_p}{\partial r} = \dot{m}. \quad (4)$$

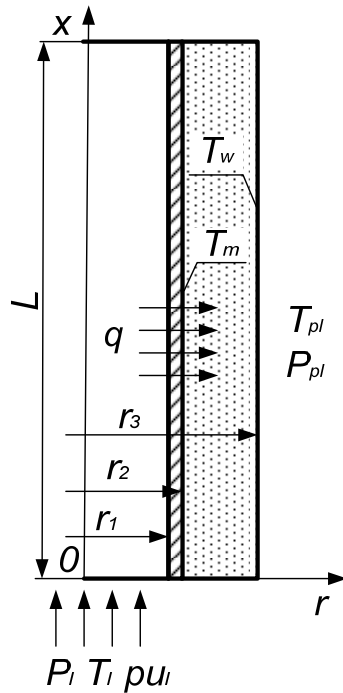


Рис. 1. Расчетная схема эксплуатационного участка скважины

Система уравнений (1)–(4) решается методом конечных разностей [2]. Граничные условия и данные для численного моделирования приведены в [3]. Для определения поля скорости и нахождения градиента давления использован алгоритм Л. М. Симуни.

На рис. 2 приведен профиль скорости течения нефтегазоводяного флюида в скважине. Расчеты приводятся для участков высотой 1 – 10 м, 2 – 20 м, 3 – 25 м.

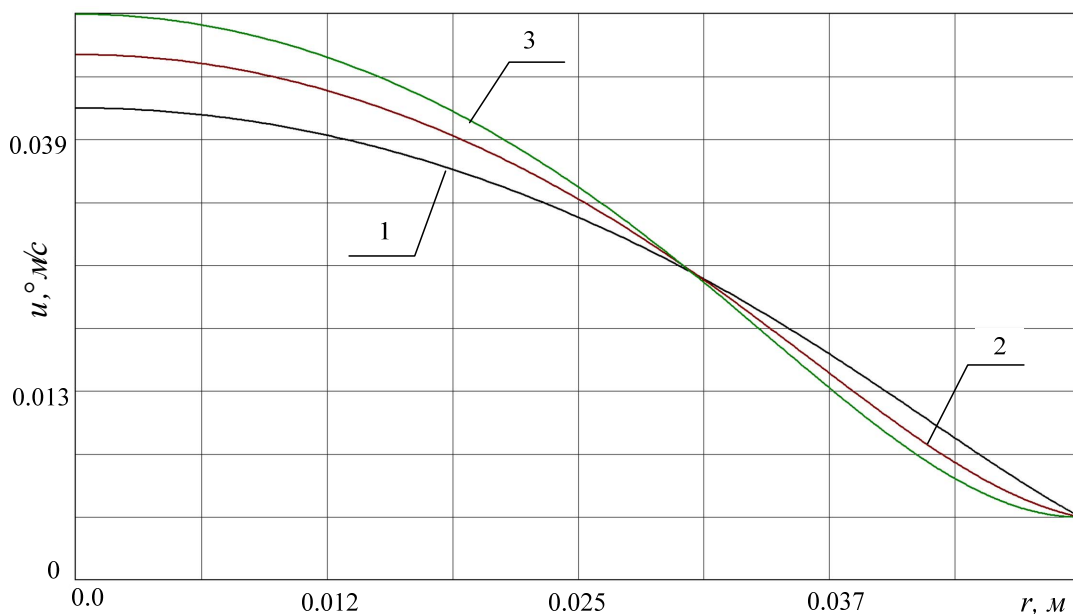


Рис. 2. Профиль скоростей течения нефтегазоводяной среды в скважине

Видно, что на участке протяженностью до 10 м происходит развитие начального – профиль скорости 1. При дальнейшем движении среды до 25 м происходит изменение теплофизических свойств среды от температуры, приводящих к изменению профиля скорости – профиль 2 и профиль 3. При этом скорость у внутренней поверхности трубы снижается, а оси трубы возрастают значительно, чем при изотермическом течении.

На рис. 3 приведено распределение массовой концентрации парафина в потоке нефтегазоводяной среды.

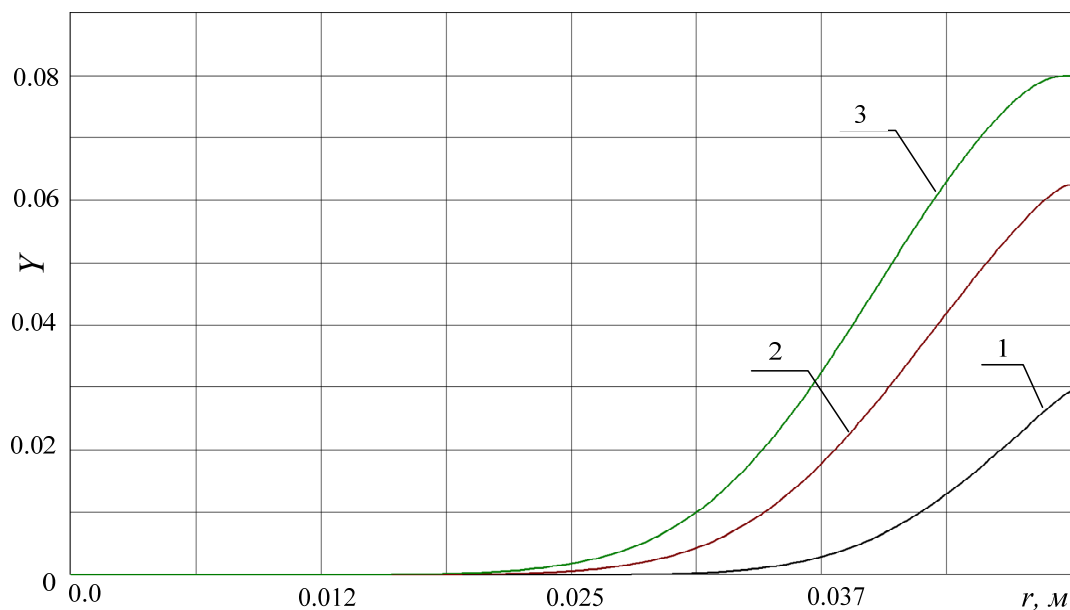


Рис. 3. Распределение массовой концентрации парафина в нефтегазоводяной среде

Видно, что рост доли парафина в потоке флюида наблюдается в направлении от внутренней стенки к оси трубы и согласуется с изменением поля температуры в радиальном направлении.

Таким образом, предложенная математическая модель, позволяет проводить численные исследования термобарических характеристик в нефтедобывающей скважине и оценивать интенсивность образования парафиновых отложений.

### Список использованных источников и литературы

1. Покрепин, Б. В. Разработка нефтяных и газовых месторождений / Б. В. Покрепин. – Ростов на Дону : Феникс, 2015. – 318 с.
2. Самарский, А. А. Вычислительная теплопередача / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич. – Москва : Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
3. Makarov S .S., Alies M. Y. Heat exchange numerical modelling while cooling a higherature metallic cylinder by water and air medium flow // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Volume 450, Issue 3, 30 November 2018.

## Сравнительная характеристика методов предобуславливания

*Р. Т. Хазияхметов*

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова

*Для определения перспективности использования предобуславливателей вычислительные эксперименты ставились при решении систем линейных алгебраических уравнений тремя методами. Применялись метод сопряженных градиентов (CG), метод сопряженных градиентов с диагональным предобуславливателем, метод сопряженных градиентов с алгебраическим многосеточным предобуславливателем (SA-AMG), которые изложены американским специалистом по численной линейной алгебре Джимом Деммелем, с использованием вещественных, положительно определенных матриц  $knn$ ,  $tnn$ ,  $bcsstk38$ ,  $ex15$ ,  $s1rmt3m1$ ,  $s2rmt3m1$ ,  $s3rmt3m1$ ,  $s3rmt3m3$  и с целыми значениями  $trefethen20$ ,  $trefethen20b$ , взятых из коллекции разреженных матриц Университета Флориды.*

**Ключевые слова:** высокопроизводительные вычисления, предобуславливатель, метод сопряженных градиентов, матрицы из коллекции Университета Флориды.

### Введение

Потребности машиностроения в изготовлении высокоточных изделий, описания различных траекторий движения механизмов требуют применения высокопроизводительных вычислительных систем. В данном исследовании для высокопроизводительных вычислений применяется центральный процессор в единой связке с видеокартой персонального компьютера. Обозначенные вычислительные системы ряд авторов [1] называют гибридными.

Одной из трудоемких операций в численных методах является решение систем линейных алгебраических уравнений [2].

В исследовании применялась библиотека CUSP, состоящая из алгоритмов и программ для решения задач линейной алгебры, учитывающих разреженность матриц. CUSP обеспечивает доступ к функциям, написанным на языке высокого уровня C++, что позволяет работать с разреженными матрицами для решения систем линейных алгебраических уравнений с разреженными матрицами коэффициентов [3].

Библиотека CUSP содержит функции таких итерационных методов, как метод сопряженных градиентов CG, метод двусопряженных градиентов BiCG, устойчивый метод двусопряженных градиентов BiCGstab, обобщенный метод минимальных остатков GMRES, метод сопряженных градиентов «с мультимасками» BiCGstab-M [3].

Библиотека CUSP содержит функции – предобуславливатели: алгебраический многосеточный предобусловливатель (AMG), основанный на сглаженном агрегировании, диагональный предобуславливатель (DiagCG)[3].

Использование предобуславливателей позволяет повышать скорость сходимости итерационных решателей. Логично построенный предобуславливатель ускоряет вычисление и в некотором смысле аппроксимирует обратную матрицу.

В ходе исследования отмечается, что параллелизм достигается на уровне warp'ов, что является особенностью архитектуры Graphics Processing Unit (GPU) с вытекающими ограничениями на реализацию параллельных алгоритмов и формирования предобуславливателя. Многие предобуславливатели плохо распараллеливаются как на стадии построения, так на стадии применения в итерационном алгоритме [4].

В последнее время привлекают внимания методы предобуславливания, обладающие естественным параллелизмом, в их числе методы явного предобуславливания, для реализации которых необходимо умножить предобуславливатель на вектор, что является наиболее эффективной операцией при распараллеливании [4].

### **Постановка задачи**

С помощью системы линейных алгебраических уравнений вида  $Ax = b$ , где  $A = A^T > 0$ ,  $x \in R^n$ ,  $b \in R^n$ , проведем сравнительную характеристику методов предобуславливания.

Уравнения вида  $Ax = b$  позволяют провести численные эксперименты над матрицами размера от 19 до 8032 строк, числом ненулевых элементов от 147 до 217 681 и числа обусловленности  $1,5757 \times 10^4$  до  $8,612 \times 10^{12}$ . Применяемые методы:

1. Метод сопряженных градиентов (МСГ, CG).
2. Предобусловленный метод сопряженных градиентов (PCG):
  - а) МСГ с алгебраическим многосеточным предобусловливанием со сглаживанием (SA-AMGCG);
  - б) МСГ с диагональным предобусловливанием (DiagCG).

### **Вычислительный эксперимент**

Вычислительные эксперименты были проведены на персональном компьютере, оснащенный графическим ускорителем NVIDIA GeForce GTX 750 Ti с 2 ГБ графической памятью (GDDR5) и двухядерным процессором INTEL i3-4170 с тактовой частотой 3.7 ГГц, количеством потоков 2, кеш-памятью 3 МБ, набором команд 64 bit и оперативной памятью 8 ГБ.

Применялась операционная система – Ubuntu 16.04 (GNU v. Linux 4.4.0-22-generic x86\_64). Параллельная вычислительная платформа CUDA версия 7.5. Компилятор nvcc (release 7.5, V7.5.17) с опцией компиляции -arch=sm\_50, соответствующий вычислительным возможностям (Compute capability) 5.0, что позволило выполнять все эксперименты с точностью до пяти знаков после запятой. Библиотека линейной алгебры версии CUSP 0.5.1 [5].



Многие тестовые задачи флоридской коллекции содержат только матрицу [6], и поэтому даже в случаях, когда имелся вектор правой части  $b$ , вместо него использовался вектор  $b = A\bar{x}$ , где  $\bar{x}$  – модельное решение.

Алгоритм вычислительного эксперимента:

1. Матрица коэффициентов  $A$  системы  $Ax = b$  берется из коллекции разреженных матриц Университета Флориды [7].
2. Задается модельное решение  $\bar{x}(i) = 1, i = 1, 2, \dots, N$ .
3. Полагается  $b = A\bar{x}$ .
4. Решается система уравнений  $A\bar{x} = b$ .

Пункт 4 алгоритма реализуется тремя методами: методом сопряженных градиентов, методом сопряженных градиентов с диагональным предобуславливанием, методом сопряженных градиентов с алгебраическим многосеточным предобуславливанием.

Оценка скорости сходимости метода сопряженных градиентов определяется неравенством

$$\|x_i - \bar{x}\|_A \leq 2 \left( \frac{\sqrt{\text{cond}(A)} - 1}{\sqrt{\text{cond}(A)} + 1} \right) \|x_0 - \bar{x}\|_A,$$

где  $\text{cond}(A) = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}}$  – число обусловленности матрицы  $A$ ;  $\lambda_{\min}$  – минимальное собственное значение матрицы;  $\lambda_{\max}$  – максимальное собственное значение матрицы;  $\bar{x}$  – точное (модельное) решение системы  $A\bar{x} = b$ , вектор  $\bar{x} = (1, 1, \dots, 1)^T$ .

Мера обусловленности  $\text{cond}^{-1}(A)$  является чувствительностью системы к ошибке округления.

Скорость сходимости метода сопряженных градиентов зависит от числа обусловленности матрицы  $A$  или от распределения ее собственных значений.

Предобуславливание означает, что система  $Ax = b$  заменяется системой  $M^{-1}Ax = M^{-1}b$ , где матрица  $M$  есть приближение к  $A$  со следующими свойствами [8]:

1. Матрица  $M$  симметрична и положительно определена.
2. Матрица  $M^{-1}A$  хорошо обусловлена или же имеет небольшое число собственных значений на периферии своего спектра.
3. Система  $Mx = b$  решается легко [8].

Плохая обусловленность систем (CG) предполагает применение предобуславливания. В этом случае распараллеливанию подлежит как процесс построения предобуславливателя, так и его применение [4]. По способу применения предобуславливание может осуществляться явно  $y = M^{-1}r$  или неявно  $Mu = r$ , где  $r$  – вектор невязки. Для GPU больше приспособлено явное предобуславливание [4].

Итерации метода сопряженных градиентов начинались с нулевого начального приближения  $x_0 = 0$  и критерием их остановки служило условие  $\frac{\|b - Ax_k\|_2}{\|b - Ax_0\|_2} \leq \xi$ ,  $\xi = 10^{-6}$ .

### Результаты вычислительных экспериментов

Число обусловленности  $\text{cond}(A)$ , размеры матрицы  $N \times N$ , количество ненулевых элементов  $N_{nz}$  взяты из коллекции матриц Университета Флориды [7] и отражены в табл. 1.

Численное тестирование описанных выше методов проводилось с использованием 9 вещественных симметричных положительно определенных матриц, взятых из коллекции матриц Университета Флориды [7] и результаты содержатся в табл. 1.

Таблица 1. Решение СЛАУ вида  $Ax = b$ , «float»,  $N_{nz}$  – количество ненулевых элементов,  $\text{cond}(A)$  – число обусловленности,  $N_{it}$  – число итераций

Матрицы	$N \times N$	$N_{nz}$	$\text{Cond}(A)$	Метод	$N_{it}$	$t$ (с)
Kuu	7102×7102	340 200	$1,5757 \times 10^4$	CG	455	0,265
				DiagCG	381	0,227
				SA-AMGCG	46	0,133
Muu	7102×7102	170 134	$7,65362 \times 10^5$	CG	41	0,022
				DiagCG	12	0,007
				SA-AMGCG	6	0,06
bcsstk38	8032×8032	355 460	$1,81746 \times 10^5$	CG	1651	0,895
				DiagCG	436	0,239
				SA-AMGCG	33	0,098
ex15	6867×6867	98 671	$8,612 \times 10^{12}$	CG	1100	0,569
				DiagCG	96	0,051
				SA-AMGCG	55	0,106
s1rmt3m1	5489×5489	217 651	$2,54589 \times 10^6$	CG	3953	2,241
				DiagCG	703	0,401
				SA-AMGCG	2	0,083
s2rmt3m1	5489×5489	217 681	$2,49518 \times 10^8$	CG	14 228	8,425
				DiagCG	2095	1,193
				SA-AMGCG	2	0,083
s3rmt3m3	5357×5357	207 123	$2,4 \times 10^{10}$	CG	9350	5,373
				DiagCG	10 933	6,286
				SA-AMGCG	2113	1,846
trefethen20	20×20	158	$6,30886 \times 10^5$	CG	22	0,004
				DiagCG	8	0,002
				SA-AMGCG	22	0,004
trefethen20b	19 × 19	147	$3,03514 \times 10^5$	CG	20	0,004
				DiagCG	7	0,002
				SA-AMGCG	20	0,007

Плохо обусловленными матрицами признаются матрицы: ex15, s2rmt3m1, s3rmt3m3, trefethen20, trefethen20b, из которых видно, что число итераций метода сопряженных градиентов больше размера матрицы взятой из коллекции матриц Университета Флориды [9].

Алгебраический многосеточный метод со сглаживанием (SA-AMGCG) рассматривается в качестве предобуславливателя для ускорения сходимости итерационных методов решения системы линейных алгебраических уравнений [4]. (SA-AMGCG) работает непосредственно с решаемой системой уравнений, формируя структуру многосеточных уровней, исходя из портрета матрицы. Способы распараллеливания (SA-AMGCG) для графических ускорителей представлены в [10].

Для систем на основе trefethen20b, trefethen20 алгебраический многосеточный метод со сглаживанием оказался не эффективен, чем диагональный предобуславливатель.

Диагональный предобуславливатель (DiagCG)  $M = (a_{ii})^{-1}$  обеспечивает меньше ускорение сходимости, чем алгебраический многосеточный метод со сглаживанием (SA-AMGCG). Диагональный предобуславливатель требует меньших вычислительных затрат на построение, хранение, на применение в каждой итерации метода [4]. По мнению авторов работы [4], диагональный предобуславливатель сокращает время вычислений в сравнении с методом сопряженных градиентов без использования предобуславливателя примерно на 20–25 %, вычислительный эксперимент данного исследования утверждает, что сокращение времени происходит в среднем на 64 % (за исключением матрицы s3rmt3m3).

Сравнение систем с матрицами kuu с tuii при равном числе уравнений, количестве ненулевых элементов, отличном в 2 раза и разной обусловленностью матриц, показало, что число итераций в методе сопряженных градиентов различно.

Из табл. 2 и работы [4] следует, что для матриц малых размерностей (trefethen20, trefethen20b) время решения системы  $Ax = b$ , реализованного на GPU, больше чем на CPU. На матрицах больших размерностей преимущество GPU очевидно и достигает шестикратного ускорения [4]. В методе сопряженных градиентов значительное ускорение вычислений на GPU обеспечивает матрично-векторное произведение, которое обладает большой степенью параллелизма.

**Таблица 2. Время работы предобуславливателя SA-AMG «double»**

Матрицы	$N_{it}$	$t_{prec}$ (%)	$t_{iter}$ (%)	$t_{all}$ (с)	$t_{prec}$ (с)
kuu	2	91,25	8,75	0,064	0,0584
ex15	55	10,4	89,6	0,569	0,0592
s1rmt3m1	2	3,61	96,39	2,03	0,07346
s3rmt3m1	2	31,21	68,79	2,522	0,78701

*Примечание:*  $N_{it}$  – число итераций,  $t_{prec}$  – время построения предобуславливателя (% от полного времени),  $t_{iter}$  – время, затрачиваемое только на итерации (% от полного времени),  $t_{all}$  – полное время решения СЛАУ (с),  $t_{prec}$  – полное время построения предобуславливателя (с).

## Заключение

В табл. 1 приводятся результаты вычислительных экспериментов, иллюстрирующие кратное сокращение количества итераций у матриц *kuu*, *muu*, *bcsstk38*, *ex15*, *s1rmt3m1*, *s2rmt3m1*, *s3rmt3m3* при применении алгебраического многосеточного предобуславливания в методе сопряженных градиентов. Матрицы *treferhen20*, *trefethen20b* имеют кратное сокращение итераций при использовании диагонального предобуславливателя, что объясняется не более  $20 \times 20$  размерностью выбранных матриц.

Сравнивая три метода решения систем линейных алгебраических уравнений (МСГ с алгебраическим многосеточным предобуславливанием, без предобуславливания и диагональным предобуславливанием), установлена высокая эффективность алгебраического предобуславливания при решении матриц большой размерности ( $N \times N \geq 5000$ ), как сравнительно хорошо обусловленных, так и плохо обусловленных систем ( $\lg(\text{cond}(A)) > 6$ ). Это было достигнуто за счет скорости сходимости метода, несмотря на многократное увеличение времени формирования предобуславливателя в случае с матрицей *kuu* (табл. 2) до 91 % от полного времени решения системы.

## Список использованных источников и литературы

1. *Новиков, А. К.* Послойная декомпозиция в конечно-элементном анализе на гибридных архитектурах / А. К. Новиков, С. П. Копысов, Н. С. Недождогин // Суперкомпьютерные дни в России : труды международной конференции (25–26 сентября 2017 г., г. Москва) / ред. Вл. В. Воеводин. – Москва : Изд-во МГУ, 2017. – С. 692–702.
2. *Недождогин, Н. С.* Параллельное решение систем линейных уравнений на гибридной архитектуре CPU+GPU / Н. С. Недождогин, С. П. Копысов, А. К. Новиков // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2020. – Т. 9, № 2. – С. 40–54. – DOI: 10.14529/cmse200203.
3. *Сидоров, А. В.* GPU – технологии в параллельных решателях систем линейных алгебраических уравнений // Вестник МГСУ. – 2012. – № 5. – С. 187–193.
4. *Копысов, С. П.* Решение систем уравнений метода Галёркина с разрывными базисными функциями на графическом ускорителе / С. П. Копысов, А. К. Новиков, Ю. А. Сагдеева // Вестник Удмуртского университета. – 2011. – Вып. 4. – С. 121–131.
5. CUSP: Main page. – URL: <http://cusplibrary.github.io> (дата обращения: 10.03.2020).
6. *Хазияхметов, Р. Т.* Построение предобуславливателя для решения системы линейных уравнений // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании: сб. тр. Всерос. науч.-техн. конф. (г. Ижевск, 29 мая 2020 г.) / отв. ред. К. Ю. Петухов. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2020. – С. 65–71.
7. *Davis T. A., Hu Y. F.* University of Florida sparse matrix collection. To appear in: ACM Trans. on Math. Software. 2011. Vol. 38. – URL: <http://www.cise.ufl.edu/research/sparse/matrices> (дата обращения: 01.03.2020).
8. *Деммель, Дж.* Вычислительная линейная алгебра. Теория и приложения / пер. с англ. – Москва : Мир, 2001. – 430 с.
9. *Haase G., Liebmann M., Douglas C., Plank G.* A Parallel Algebraic Multigrid Solver on Graphics Processing Units // Lecture Notes in Computer Science. 2010. Vol. 5938. P. 38–47.

10. Недожогин, Н. С. Высокопроизводительный алгоритм Шермана-Морриса обращения матриц на GPU / Н. С. Недожогин, А. С. Сармакеева, С. П. Копысов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2014. – Т. 3, № 2. – С. 101–106.

## Исследование влияния формы сопла на структуру струи и зону смешения\*

А. В. Червакова, К. В. Костюшин

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики  
Томского государственного университета

*В данной работе проведено численное исследование структуры и толщины зоны смешения истекающей сверхзвуковой струи с окружающей средой при натекании на плоскую преграду в зависимости от степени нерасчетности и формы сопла. Для моделирования сверхзвуковой струи и оценки зоны смешения используется двухжидкостная модель. Нестационарное пространственное течение идеального многокомпонентного газа описывается системой уравнений Эйлера, в которую включены законы сохранения для дополнительных компонентов смеси газов.*

**Ключевые слова:** зона смешения, степень нерасчетности, двухжидкостная модель, уравнения Эйлера, схема Годунова.

В настоящее время в организациях и институтах, занимающихся проектированием элементов ракетно-космической техники, проводятся экспериментальные и теоретические исследования высокоскоростных многофазных реагирующих потоков, физических процессов при запуске ракет, спуске и посадке космических аппаратов. Большое внимание уделяется взаимодействию сверхзвуковых струй с препятствиями.

Несмотря на разнообразие расчетных и экспериментальных исследований, процессы формирования зоны смешения на границе струи и в зоне периферийного течения для различных режимов работы сопел изучены недостаточно.

Целью данной работы является численное исследование структуры ударных волн и толщины зоны смешения сверхзвуковой струи при взаимодействии с препятствием.

Рассматривается задача сверхзвукового натекания струи на плоскую горизонтальную преграду. Эффектами вязкости, теплопроводности и диффузии пренебрегается.

Для моделирования сверхзвуковой струи и оценки зоны смешения используется двухжидкостная модель. Нестационарное пространственное течение идеального многокомпонентного газа описывается системой уравнений Эйлера, в которую включены законы сохранения для дополнительных компонентов смеси газов [1–3]. Для расчета осесимметричных газодинамических задач система имеет вид:

---

© Червакова А. В., Костюшин К. В., 2021

\* Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0032.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial r} = -\frac{1}{r}\rho v, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(p + \rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial r} = -\frac{1}{r}\rho uv, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(p + \rho v^2)}{\partial r} = -\frac{1}{r}\rho v^2, \quad (3)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial[(e+p)u]}{\partial x} + \frac{\partial[(e+p)v]}{\partial r} = -\frac{1}{r}(e+p)v, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \alpha_n)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \alpha_n u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \alpha_n v)}{\partial r} = -\frac{1}{r}\rho \alpha_n v, \quad (5)$$

где  $t$  – время;  $x, r$  – продольная и радиальная координаты соответственно;  $\rho$  – плотность;  $p$  – давление;  $e = \rho \varepsilon + \rho(u^2 + v^2)/2$  – полная энергия единицы объема,  $\varepsilon = \varepsilon(p, \rho)$  – внутренняя энергия единицы массы,  $u, v$  – осевая и радиальная составляющие вектора скорости соответственно,  $\alpha_n$  – массовая концентрация компонента смеси,  $\sum_{n=1}^N \alpha_n = 1$ .

Система уравнений (1)–(5) замыкается уравнениями состояния для идеальной смеси газов.

В качестве начальных условий в расчетной области задаются скорость, давление, температура и концентрации компонентов газовой смеси.

В качестве граничного условия на входе в сопло задаются условия постоянства энтропии, энтальпии и состава смеси газов. На преграде и стенках сопла задаются условия непротекания. На внешних границах расчетной области задаются комбинированные условия – фиксируются параметры окружающей среды, как только возмущения достигают внешних границ расчетной области, используются мягкие граничные условия:  $\partial/\partial n = 0$ .

Для численного решения уравнений Эйлера (1)–(5) применяется монотонная явная схема сквозного счета первого порядка точности, предложенная С. К. Годуновым [4]:

$$\begin{aligned} \sigma_{i-1/2, j-1/2}^{n+1} = & \sigma_{i-1/2, j-1/2}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[ \mathbf{A}_{i, j-1/2} - \mathbf{A}_{i-1, j-1/2} \right] - \\ & - \frac{\Delta t}{\Delta r} \left[ \mathbf{B}_{i-1/2, j} - \mathbf{B}_{i-1/2, j-1} \right] - \frac{\mathbf{f}_{i-1/2, j-1/2}^n}{r_{i-1/2, j-1/2}} \Delta t, \end{aligned}$$

где  $\sigma, \mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{f}$  – вспомогательные векторы-столбцы:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \\ \rho \alpha_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} RU \\ P + RU^2 \\ RUV \\ (E + P)U \\ RA_n U \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} RV \\ RUV \\ P + RV^2 \\ (E + P)V \\ RA_n V \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 \\ (e + p)v \\ \rho \alpha_n v \end{bmatrix}.$$

Для расчета потоков используется точное решение задачи Римана.

Проведены численные исследования структуры двухкомпонентной сверхзвуковой струи при взаимодействии с плоской преградой, установленной перпендикулярно оси струи при разных степенях нерасчетности. Под степенью нерасчетности понимается отношение статического давления на срезе сопла к давлению окружающей среды.

В работе рассматривались коническое и профилированное сопла с числом Маха на срезе  $M = 2,52$ . В качестве рабочего тела использовался воздух. Расстояние от среза сопла до преграды составляло  $x/R_e = 5$ , где  $R_e$  – радиус выходного сечения сопла. Исследования проведены для режима перерасширения со степенью нерасчетности  $n = 0,46$ , режима недорасширения при  $n = 1,8$ , и расчетного режима истечения ( $n = 1$ ).

На рис. 1 показаны поля чисел Маха и изолинии массовой концентрации  $\alpha_1 = 0,1$  и  $\alpha_1 = 0,9$  для конического и профилированного сопел при расчетном режиме истечения.

На рис. 2 показана толщина зоны смешения вдоль границы струи при разных степенях нерасчетности для конического и профилированного сопел.

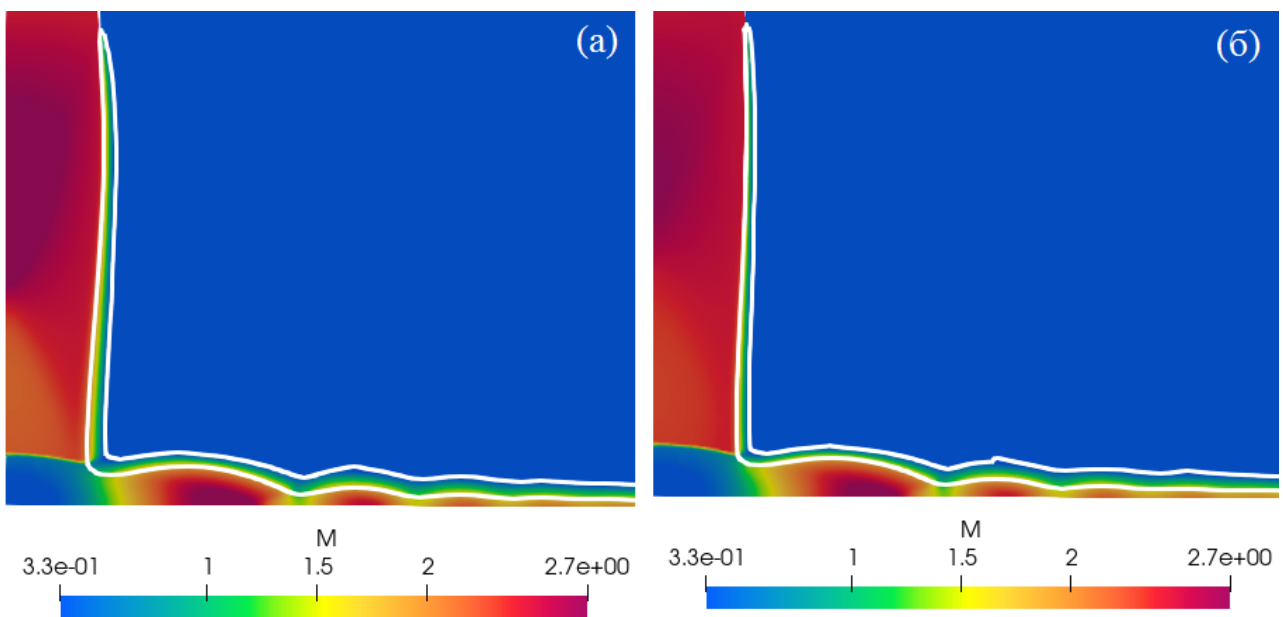


Рис. 1. Распределение чисел Маха и изолинии  $\alpha_1$  при  $n = 1$ :  
*a* – для конического сопла, *б* – для профилированного сопла



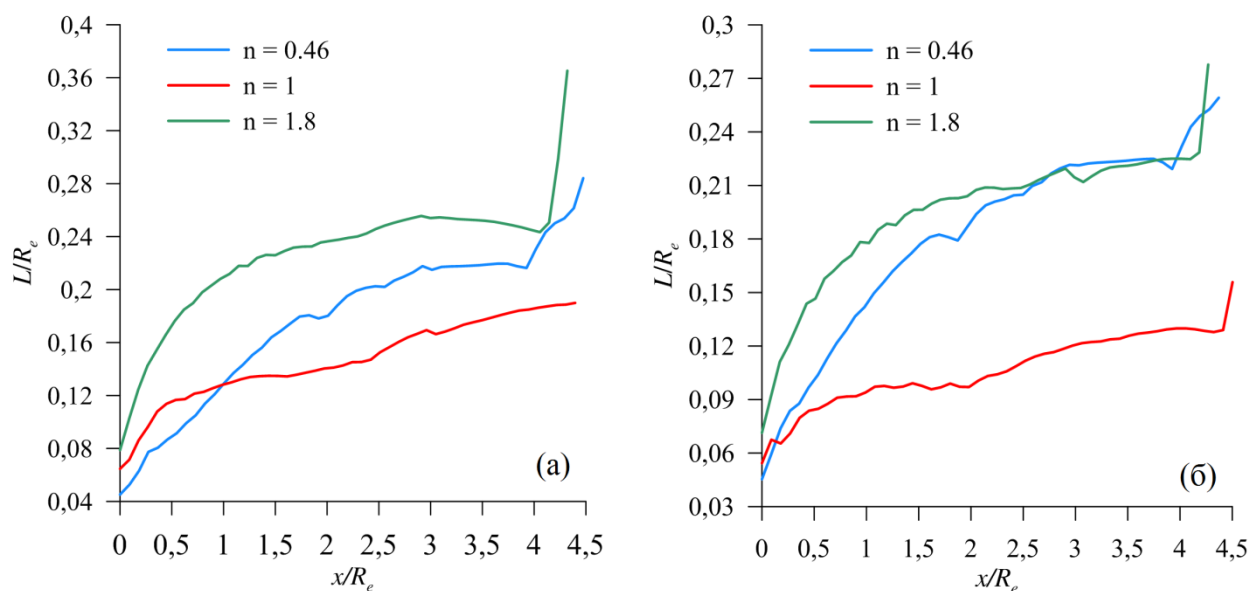


Рис. 2. Толщина зоны смешения вдоль границы струи:  
*a* – для конического сопла, *б* – для профилированного сопла

Для всех вариантов расчетов характерно увеличение толщины зоны смешения вдоль оси струи. Видно, что минимальная толщина зоны смешения наблюдается на расчетном режиме. Для основной струи на начальном участке наблюдается увеличение толщины зоны смешения в зависимости от степени нерасчетности почти в два раза при сравнении результатов для  $n = 0,46$  и  $n = 1,8$  как для конического, так и для профилированного сопла. Для профилированного сопла при расчетном режиме истечения толщина зоны смешения вдоль оси струи меньше, чем для конического. В случае течения с перерасширением и недорасширением результаты для конического и профилированного сопел мало отличаются.

Верификация разработанной методики и алгоритма проведена путем сравнения результатов расчетов распределений давления вдоль преграды с экспериментальными данными [5].

#### Список использованных источников и литературы

1. Гидаспов, В. Ю. Элементарные модели и вычислительные алгоритмы физической газовой динамики. Одномерные нестационарные течения : учебное пособие / В. Ю. Гидаспов, Н. С. Северина. – Москва : Факториал, 2015. – 83 с.
2. Пирумов, У. Г. Газовая динамика сопел / У. Г. Пирумов, Г. С. Росляков. – Москва : Наука, 1990. – 364 с.
3. Пирумов, У. Г. Течения газа в соплах / У. Г. Пирумов, Г. С. Росляков. – Москва : Издательство Московского университета, 1978. – 351 с.
4. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С. К. Годунов, А. В. Забродин, М. Я. Иванов и др. ; под ред. С. К. Годунова. – Москва : Наука, 1976. – 400 с.
5. Мельникова, М. Ф. Воздействие сверхзвуковой нерасчетной струи на плоскую преграду, перпендикулярную оси струи / М. Ф. Мельникова, Ю. Н. Нестеров // Ученые записки ЦАГИ. – 1971. – Т. 2, № 5. – С. 44–58.

## Современные способы моделирования работы гусеничного движителя

И. Д. Шадрин, Д. В. Юдинцев

Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ

*В статье рассматриваются возможные методики процесса построения математической модели гусеничного движителя. Для расчета и моделирования гусеничных машин требуется программное обеспечение с максимально широким и гибким функционалом, которое могло бы объединить в одной модели несколько разделов физики, сочетать одномерное и трехмерное моделирование и позволять одновременно моделировать работу всех агрегатов и систем, необходимых для полноценного движения изделия. Анализ работы гусеничного движителя и его элементов показывает, что в целом весь механизм испытывает воздействие как внутренних, так и внешних сил. Для упрощения работы и наибольшей универсальности предположим, что необходимо создать модели каждого подвижного элемента, который обладает определенными свойствами и воспринимает внешние силы.*

**Ключевые слова:** гусеничная машина, гусеничный движитель, моделирование, математическая модель, программный пакет.

Современные гусеничные машины (ГМ) являются сложной механической системой, которые имеют довольно строгое и однозначное деление по специализациям [1]. Специализация определяется в зависимости от технического задания, выполняемых работ и предъявляемых к машине требований. В целом, это облегчает процесс создания полной математической модели ГМ, так как в зависимости от специализации будут предъявляться обособленные требования. Как следствие, к гусеничным движителям (ГД) данных машин также предъявляются различные требования. К примеру, для промышленных тракторов главным будут тяговые характеристики и несущая способность; для сельскохозяйственных машин – минимальное удельное давление на грунт, а для машин лесного хозяйства – щадящее воздействие на почву.

Как известно, основными параметрами при расчете гусеничного шасси являются внешние показатели, внутренние параметры и разгонные характеристики. К внешним показателям относится тяговое усилие; удельное давление техники на грунт и общее сопротивление движению. Среди основных внутренних параметров обязательно учитываются упруго-деформирующие силы и потери в ГД. Разгонные характеристики гусеничного шасси – это ускорения колес и траков ходовой части (ХЧ); усилия, возникающие при работе движителя и массово-инерционные характеристики ГМ в целом.

Важно учитывать потери мощности на обеспечивающие агрегаты, параметры работы двигателя и трансмиссии, настройки системы управления пере-

ключением передач. Необходимость учета множества различных факторов в единой математической модели является крайне сложной и объемной задачей, которая является непосильной для инженера-конструктора без использования современных средств проектирования.

В настоящее время существует множество программ и программных пакетов, которые используются инженерами по всему миру при разработках и проектировании различных видов техники. Но лишь немногие из них могут позволить отразить в единой математической модели работу ГМ в целом. Таким образом, для расчета и моделирования ГМ требуется программное обеспечение (ПО) с максимально широким и гибким функционалом, которое могло бы объединить в одной модели несколько разделов физики, сочетать одномерное и трехмерное моделирование и позволять одновременно моделировать работу всех агрегатов и систем, необходимых для полноценного движения изделия. Именно таким ПО и представляется *Siemens imagine.Lab LMS*.

В статье [2] была воссоздана укрупненная параметризованная математическая модель военной ГМ в программном пакете *Simcenter Amesim*. Эскиз данной математической модели представлен на рис. 1. Модель состоит из дизельного двигателя; блока управления; трансмиссии с автоматической коробкой передач и ХЧ, представленной для упрощения в виде колесной базы автомобиля.

Для дальнейших разработок, связанных с модернизацией и проведением научно-исследовательских работ, связанных с изделием, было принято решение по дополнительному уточнению существующей математической модели ГМ. С этой целью был выделен ряд основных компонентов, нуждающихся в детализации и уточнении параметров их работы. Одним из них является ГД.

Модель подвески, по сути, является одномерной, то есть представляется в виде свечной (ход опорных катков считается вертикальным). В этом случае элемент подвески воспринимает только вертикальные усилия. Однако упругие и демпфирующие характеристики могут быть рассчитаны через передаточную функцию балансира (приведены к катку), что имитирует балансирную подвеску.

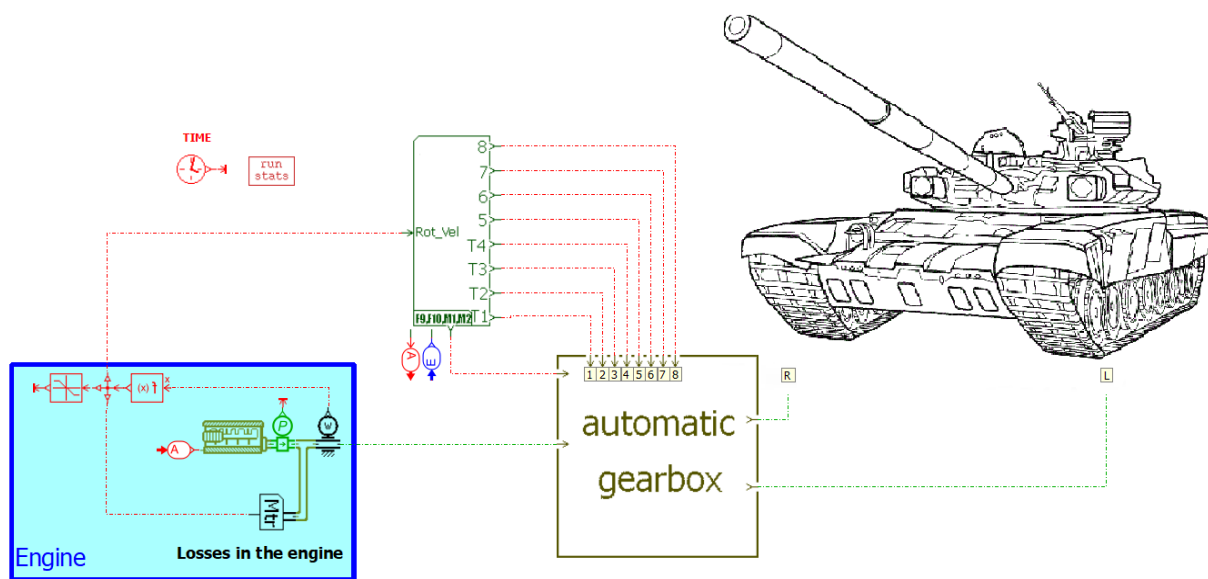


Рис. 1. Эскиз укрупненной математической модели ГМ

Помимо этого, ГД учитывается в виде потерь на нем. Учет начинается после преодоления изделием скорости в 40 км/ч. Данное решение было обусловлено относительно легкими эксплуатационными условиями при симуляции движения изделия (бетонная трасса без выбоин и стыков). При этом расчетная модель имеет низкую точность нахождения КПД гусеницы, так как не зависит от свойств материалов, геометрических размеров и конструктивного исполнения ХЧ ГМ.

Элемент ХЧ был заменен на компонент многоосной модели бронетранспортера, который позволяет более полно имитировать геометрические и массово-инерционные характеристики ГД. Это позволило избавиться от большинства недостатков колесной базы автомобиля, таких как объединение опорного катка с ведущим колесом; невозможность учета характеристик каждого отдельно взятого элемента ХЧ; для расчета использовались усредненные значения массово-инерционных и геометрических параметров. Также за счет использования многоосной модели появляется возможность выделить одну ось на ведущее колесо, одну на опорный каток, а оставшиеся две привести к характеристикам подвески относительно центра тяжести изделия. Введение в модель дополнительных осей с уточнением характеристик подвески показывает, что учет дополнительных параметров подвески в виде отдельных осей увеличивает время разгона до заданной скорости, так как характеристика подвески учитывает дополнительные опорные катки с приведенной жесткостью.

На основании представленных ранее особенностей были найдены и предложены к реализации в программном пакете следующие математические модели построения ГД:

1. В работе [3] была предложена двухэтапная схема реализации модели ГД. В данной модели гусеничный обвод рассматривается как последовательно связанные между собой невесомые, растяжимые ленты. Траки гусеницы представлены в виде последовательно связанных между собой участков, в пределах которых растягивающее усилие постоянно. При этом на близлежащих участках усилия могут отличаться. Границы участков – это места, где возможно возникновение продольных реакций связей, наложенных на гусеничный обвод (места зацепления ведущих колес и площадки контакта опорных катков с гусеничными лентами). Границы контакта считаются точечными.

2. Идея, описанная выше, была использована при создании модели ГД, представленной в статье [4]. В ней гусеничная лента была представлена в виде нескольких сосредоточенных в материальных точках масс с одной степенью свободы, которые соединены упругодемпфирующими связями (имитируют резинометаллические шарниры).

3. В статье [5] описана полностью готовая математическая модель ГД. Модель составлена с использованием метода функциональных элементов. Двигатель представлен как совокупность отдельных элементов, для каждого из которых составлена математическая модель на основе физических зависимостей с учётом их расположения в каждый момент времени.

Основой является динамическая модель ГД, представляющая его в универсальном виде. В качестве допущения принято, что модель плоская, а рама

машины – это недеформируемая конструкция. В состав модели входят траки, опорные и поддерживающие катки с подвесками, ведущее и направляющее колесо. Основными параметрами модели являются количество опорных и поддерживающих катков, расстояние между ними, расстояние от центра масс машины до ведущего и направляющего колес, а также до мест крепления подвесок к раме машины, размеры траков. На движитель в целом воздействуют силы от массы машины, реакции, приложенные к тракам от опорной поверхности, и крутящий момент, подводимый к ведущему колесу.

Составим таблицу с описанием возможностей по реализации математических моделей в программном пакете *Siemens Imagine.Lab LMS*.

### Возможности реализации представленных математических моделей

№ модели	Возможности по реализации модели в <i>Siemens Imagine.Lab LMS</i>
1	Перемещение гусеницы разделяется на два этапа: 1) деформирование гусеничных лент за счет поворота ведущего колеса; 2) расчет перемещения системы. Ведущие колеса при этом считаются неподвижными. Построение такой модели средствами, представленными в программном пакете, будет достаточно трудоемким из-за того, что модель гусеницы требует два шага расчета, приходящихся на один шаг расчета остальной модели
2	Массой следует заменить точки гусеницы, в которых возможно возникновение продольных сил (места зацепления ведущих колес и точки контакта опорных катков с опорным основанием). Следует помнить, что такое разделение на массы достаточно условно и результаты расчетов будут иметь низкую точность
3	Реализация данной модели является наиболее целесообразной в программном пакете. Но стоит учесть, что в данном случае приведена математическая модель для учета свойств подвески свечного типа и не может быть использована при расчете поворота машины, а следовательно, не удовлетворяет требованиям универсальности

Математические модели ГД, представленные в работах других авторов, не обладают универсальностью и не в состоянии дать решения для всех типов возникающих задач. Они позволяют найти только наиболее общие характеристики ГД, такие как несущая способность, тяговое усилие, некоторые внутренние параметры движителя, например, среднее усилие натяжения гусеничной цепи.

При составлении математической модели необходимо учесть требования, предъявляемые к современному ПО, наиболее общими из которых являются экономичность, универсальность, точность получаемых результатов, возможность проведения анализа результатов, возможность проведения оптимизации по заданным параметрам. Учитывая, что мощности современных компьютеров позволяют с достаточно высокой скоростью решать системы уравнений, состоящие из нескольких тысяч выражений (программное обеспечение, использующее метод конечных элементов).

Можно предположить, что моделирование всех подвижных элементов ГМ вполне возможно (с учетом их частных характеристик), и к этому необходимо стремиться. Но для модели № 1 необходимо принять ряд ограничений для снижения её трудоёмкости. Таким образом, при составлении математической модели наиболее пригоден метод функциональных элементов представленный разработанный для модели № 3.

Одним из вариантов стало готовое решение, представленное в библиотеке «Solutions» в *Simcenter Amesim*. Модель «2D longitudinal model of a tank's tracks and hydro-gas suspension» – это продольная двухмерная модель гусеницы и гидropневматической подвески танка, что, по сути, является ХЧ ГМ. Данная модель позволяет исследовать продольное поведение шасси быстроходной ГМ, движущейся по заданному профилю грунта. Эскиз модели представлен на рис. 2.

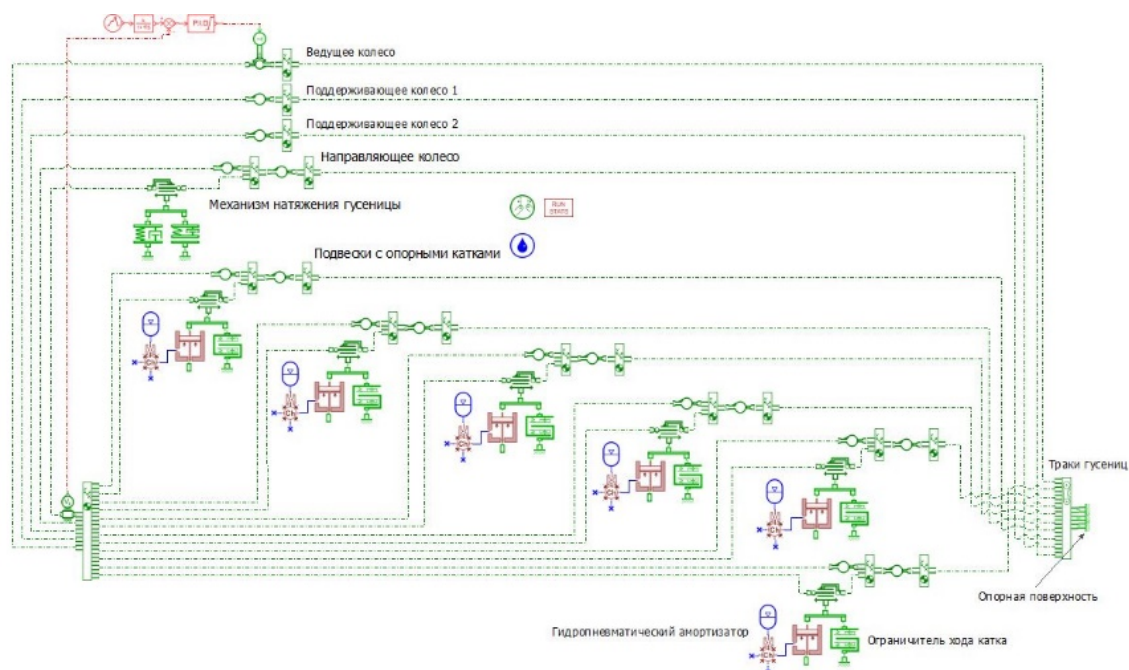


Рис. 2. Эскиз модели ГД

Конфигурация шасси, на один борт: 6 опорных катков с индивидуальными гидропневматическими амортизаторами; 2 поддерживающих колеса; ведущее колесо; направляющее колесо, связанное с механизмом натяжения; гусеница. Все компоненты размещаются относительно ведущего колеса, которое играет роль начала координат. Для наглядности, на рис. 3 изображена модель используемой ХЧ.

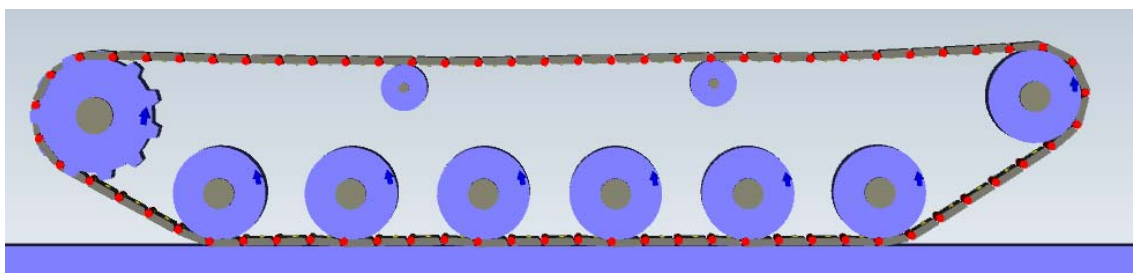


Рис. 3. Конфигурация модели ХЧ ГМ

Гусеничная лента моделируется с помощью компонента *PLMBELT00* с использованием цепного режима. Стоит отметить, что звенья моделируются как твердые двухмерные тела, соединенные вместе упругими шарнирными соединениями (резинометаллическими шарнирами). При этом их взаимодействие разделено на внутреннее (с элементами ХЧ) и внешнее (с поверхностью, по которой осуществляется движение ГМ).

Механизм натяжения гусеницы представляет собой простой пружинный демпфер, действующий на вращающийся рычаг, который в свою очередь соединен параллельно с упором для предотвращения усадки в случае слишком большого натяжения гусениц.

Ведущее колесо представляет собой зубчатую передачу, для которой заданы ее основные геометрические параметры. Профиль колеса был создан с помощью встроенной подпрограммы *Python PLMGearContourGenerator*.

Гидропневматические амортизаторы действуют как пружины (сила поршня увеличивается с давлением) и соединены параллельно с механическими упорами, предотвращающими выход поршня за пределы системы.

Двигатель и трансмиссия были упрощены и представлены в виде источника крутящего момента, прикладываемого непосредственно к ведущему колесу изделия. Параметры балансиров и поршней описываются в глобальных параметрах модели.

В данной работе была представлена методика построения функциональной математической модели гусеничного движителя ГМ. Моделирование ХЧ ГМ в программном пакете *Simcenter Amesim* – возможно. Данная модель обеспечивает необходимую степень детализации, практически полное отсутствие допущений в работе систем и агрегатов, приемлемый уровень математического описания взаимодействия гусеничной ленты с ХЧ и опорной поверхностью.

### Список используемых источников и литературы

1. *Платонов, В. Ф.* Динамика и надежность гусеничного движителя. – Москва : Машиностроение, 1973. – 293 с.
2. *Шадрин, И. Д.* Моделирование ходовой части транспортных средств специального назначения в Siemens Imagine.Lab LMS / И. Д. Шадрин, Д. В. Юдинцев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – Вып. 11. – 561 с.
3. *Аврамов, В. П.* Динамика гусеничной машины при установившемся движении по неровностям / В. П. Аврамов, Н. Б. Калейчев. – Харьков : Вища шк., 1989. – 112 с.
4. *Дядченко, М. Г.* Основы расчета систем поддрессоривания гусеничных машин на ЭВМ : учеб. пособие / М. Г. Дядченко, Г. О. Котиев, В. Н. Наумов. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 52 с.
5. *Лесковец, И. В.* Математическая модель гусеничного движителя. – Могилёв: Изд-во Белорусско-Российского университета. Электрон. журн., 2006.



**Двухстадийная модель газофазного горения  
для численного исследования распространения пламени  
по поверхности полимерных материалов\***

А. А. Шаклеин, А. И. Карпов, Г. Морар

Институт механики УдмФИЦ УрО РАН

*Предложен двухстадийный механизм для реакции горения продуктов пиролиза полимерного материала (полиметилметакрилата). Проведено численное исследование распространения пламени по поверхности полиметилметакрилата. Показано, что двухстадийный механизм позволяет существенно уточнить предсказания модели при сравнении с экспериментальными данными по сравнению с широко применяемым одностадийным механизмом.*

**Ключевые слова:** распространение пламени, горение полимеров, двухстадийная реакция горения, численное исследование, тепло- и массоперенос.

Работа посвящена изучению процесса распространения пламени по поверхности горючего материала. При численном решении математическая модель общепринято формулируется в предположении макрореакции газофазного горения вида  $F + O \rightarrow P$ , где  $F$  представляет газообразные продукты пиролиза материала. Данный подход эффективен с точки зрения снижения вычислительных затрат на решение задачи по сравнению с применением детальных механизмов, а также позволяет адекватно оценивать макроскопические параметры распространения пламени (скорость распространения, массовую скорость горения, длину области пиролиза). С другой стороны, при детальном сравнении результатов расчетов с использованием макрореакции газофазного горения с измерениями [1] по тепловой структуре газовой фазы в области кромки пламени показано, что максимумы расчетных значений температуры (при рассмотрении распределений вдоль нормали к поверхности горения) смещены ближе к поверхности. Данное наблюдение свидетельствует о том, что зона реакции газофазного горения в экспериментах находится дальше от твердого материала по сравнению с результатами проведенных расчетов.

На основании анализа результатов предложена двухстадийная реакция газофазного горения продуктов пиролиза полимерного материала [2]. Первая стадия заключается в термическом разложении газообразных продуктов пиролиза ( $F_1$ ) на низкомолекулярные компоненты ( $F_2$ ) в виде  $F_1 \rightarrow F_2$ , в рамках второй стадии рассматривается окисление низкомолекулярных компонентов (собственно горение) в виде  $F_2 + O \rightarrow P$ . Кинетические параметры предложенной

---

© Шаклеин А. А., Карпов А. И., Морар Г., 2021

\* Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-08-00481\_а).



первой реакции определялись следующим образом. В программном пакете Cantera проведены расчеты по термическому разложению в инертной среде газообразных продуктов пиролиза рассматриваемого полимерного материала с использованием детального кинетического механизма. По зависимости скорости изменения концентрации исходного вещества от температуры определены предэкспонент и энергия активации рассматриваемой реакции. Также в рамках рассматриваемой постановки задачи получен тепловой эффект реакции.

Проведенные расчеты распространения пламени по поверхности горючего материала (полиметилметакрилата) с использованием двухстадийного механизма реакции газофазного горения показали хорошее согласование с экспериментальными данными как по макроскопическим параметрам, так и по структуре пламени, при этом максимум температуры в распределениях по нормали к поверхности горения оказывается ближе к результатам измерений по сравнению с результатами расчетов в предположении одностадийного механизма горения.

#### **Список использованных источников и литературы**

1. Korobeinichev O. P., Karpov A. I., Bolkisev A. A., Shaklein A. A., Gonchikzha-pov M. B., Paletsky A. A., Tereshchenko A. G., Shmakov A. G., Gerasimov I. E., Kumar A. An experimental and numerical study of thermal and chemical structure of downward flame spread over PMMA surface in still air // Proceedings of the Combustion Institute. 2019. T.37. №3. С. 4017-4024. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.06.005>.
2. Shaklein A. A., Bolkisev A. A., Karpov A. I., Korobeinichev O. P., Trubachev S. A. Two-step gas-phase reaction model for the combustion of polymeric fuel // Fuel. 2019. T.255. №115878. <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115878>.

УДК 543.428

**Изменение длины химической связи структуры  $Ti_2AlC$  (МАХ-фаза) в результате термического воздействия\****И. К. Аверкиев, О. Р. Бакиева*Удмуртский федеральный исследовательский центр  
Уральского отделения Российской академии наук

*В работе определены изменения в локальной атомной структуре  $Ti_2AlC$ , вызванные термическим воздействием. Сделано предположение о том, что после отжига формируется структура  $Ti_2AlC$ , проведены расчеты модели данной структуры и проведен сравнительный анализ с экспериментальными данными. Показано, что в результате термического воздействия формируется нестехиометричная структура на основе карбоксидов титана.*

**Ключевые слова:** МАХ-фаза, локальная атомная структура, длина химической связи, EхEELFS-спектроскопия.

В последнее десятилетие большой интерес исследователей вызывают слоистые структуры – 2D-материалы, которые демонстрируют исключительные характеристики в таких приложениях, как накопление энергии, экранирование электромагнитных помех, катализ и беспроводная электроника [1, 2]. Примером такой структуры являются MXenes – это большое семейство с общей формулой  $M_{n+1}X_nT_x$ , где М – переходный металл, Х – С и/или N,  $T_x$  – функциональная группа краевых и поверхностных атомов, которые обычно состоят из –ОН, =О, –F. Однако измеряемые свойства MXenes варьируются от исследования к исследованию [1, 2]. Основной причиной такого разнообразия свойств являются различные прекурсоры и методы синтеза предшественников, МАХ-фаз, где А – элемент А-группы (в основном IIIA и IVA группы). Как известно, мак-

---

© Аверкиев И. К., Бакиева О. Р., 2021

\* Работа выполнена по плану НИР №121030100002-0. Работа была выполнена с использованием оборудования ЦКП «Поверхность и новые материалы» УдмФИЦ УрО РАН.

роскопические свойства определяются микроскопическими параметрами объекта, в том числе параметрами локальной атомной структуры.

Таким образом, подробное исследование эволюции локальной атомной структуры МАХ-фаз позволит отследить процессы формирования 2D-материала, а также предоставит возможность прогнозировать и получать MXenes с заданными параметрами и свойствами [3, 4].

В связи с этим целью данной работы было исследование эволюции локальной атомной структуры прекурсоров в результате термического воздействия, которое приводит к слоистой системе  $Ti_2AlC$ .

Исследование локальной атомной структуры было проведено XAFS-подобным методом: с помощью анализа протяженной тонкой структуры спектров энергетических потерь электронов (ExEELFS – Extended Electron Energy Loss Fine Structure) [5]. Природа формирования ExEELFS спектров аналогична XAFS-спектрам – когерентное рассеяние вторичного электрона на локальном окружении возбуждаемого атома. В результате анализа этих протяженных осцилляций можно получить информацию о параметрах локальной атомной структуры исследуемого объекта – длины химической связи, координационные числа и параметры дисперсии межатомных расстояний.

В ходе проведенных работ получены экспериментальные  $M_{2,3}$  ExEELFS-спектры титана и К ExEELFS-спектры углерода до и после термического воздействия. Спектры энергетических потерь электронов были получены в геометрии обратного рассеяния вторичных электронов от поверхности образца на Оже-микроанализаторе JAMP-10S (JEOL), вакуум не хуже  $10^{-7}$  Па. Энергия падающего пучка составляла 1300 эВ, что соответствует глубине анализа  $\sim 10$  нм.

В работе были получены экспериментальные спектры энергетических потерь электронов, проведена их обработка и получены параметры локальной атомной структуры: длины химической связи C-C, Ti-C, Ti-Ti, соответствующие координационные числа и параметры тепловой дисперсии атомов. В процессе обработки и анализа экспериментальных данных получено, что в пределах первых двух координационных сфер атомов титана происходит наложение сфер, образованных связью Ti-C и Ti-Al. В результате, определить соответствующие координационные числа затруднительно. Данная проблема не возникает при анализе экспериментальных данных углерода – координационные сферы C-C и C-Ti хорошо выделяются, соответствующие параметры локального окружения приведены в таблице. Такой феномен объясняется тем, что параметры рассеяния углерода более чувствительны к электронному возбуждению, чем параметры рассеяния металлов.

#### **Модельные ( $Ti_2AlC$ Р 63/mmc) и экспериментальные значения локальной атомной структуры относительно атома углерода**

	R, Å до /после отжига (модель)	N до/после отжига (модель)	Sigma <sup>2</sup> , Å <sup>2</sup> до/после отжига (модель)
C-Ti	2.00 / 1.8 (2.09)	4.83 / 3.34 (3)	0.004 / 0.004 (0.004)
C-C	3 / 2.7 (3.04)	7.29 / 3.61 (6)	0.006 / 0.004 (0.004)

Проведены расчеты параметров локальной атомной структуры для объемной модели  $Ti_2AlC$  ( $R 63/mmc$ ,  $a = 3,069$ ,  $c = 13,736$ ). В таблице приведено сравнение модельного расчета (в скобках) и полученных экспериментальных данных.

Полученные результаты показывают, что после термической обработки происходит уменьшение длин связи и координационных чисел для пар атомов С-С и С-Ti. Вероятно, это связано с тем, что образуется слоистая система, состоящая из МАХ-фазы, которая отлична от структуры объемного соединения  $Ti_2AlC$ . Для более корректного описания полученной структуры необходимо проведение молекулярно-динамических расчетов.

#### **Список использованных источников и литературы**

1. Sarycheva A., Polemi A., Liu Y., et. al. 2D titanium carbide (MXene) for wireless communication // *Sci. Adv.* 2018. V.4. eaau0920.
2. Hantanasirisakul K., Gogotsi Y. Electronic and optical properties of 2D transition metal carbides and nitrides (MXenes) // *Adv. Mater.* 2018 V.30. 1804779.
3. Christopher E. Shuck, Meikang Han, Kathleen Maleski, et. al. Effect of  $Ti_3AlC_2$  MAX Phase on Structure and Properties of Resultant  $Ti_3C_2Tx$  MXene // *ACS Applied Nano Materials.* 2019. V.2. No. 6. P.3368
4. Kong, F., He, X., Liu, et. al. Effect of  $Ti_3AlC_2$  precursor on the electrochemical properties of the resulting MXene  $Ti_3C_2$  for Li-ion batteries // *Ceramics International.* 2018. V. 44. No. 10. P. 11591
5. Ruts Yu.V., Guy D.E., Surnin D.V., Grebennikov Secondary electron fine structure - A method of local atomic structure characterization // *Experimental Methods in the Physical Sciences.* 2001. V. 38. Ch. 3. P. 191.

## Программная реализация нейросетевых алгоритмов для переноса художественных стилей в изображениях

С. А. Бендер, Г. В. Горбов

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*В данной работе поставлена задача переноса художественного стиля с одного изображения на другое, с первичной сегментацией исходного изображения. Предложена математическая интерпретация понимания стиля изображения и схожести стилей в двух изображениях.*

**Ключевые слова:** нейросети, сверточные нейронные сети, перенос стиля, сегментация, машинное обучение.

### Введение

Задачи и предложенные к ним алгоритмы CV (computer vision) области машинного обучения имеют в нынешнее время огромную популярность. Такие алгоритмы очень часто применяются в различных междисциплинарных областях, в которых предполагается, что алгоритмы должны обладать человеческой интеллектуальностью и творчеством. В ходе работы были предложены математические определения таких интуитивных понятий, как стиль изображения, вычисление расстояний между стилями изображений. В ходе данной работы поставлена задача сегментации, переноса художественного стиля. Произведено обучение разработанных моделей при помощи средств Google Colab.

### Математическая постановка задачи

Математическая постановка работы состоит из двух частей. Первая часть – это математическая постановка задачи сегментации. Вторая часть – это математическая постановка задачи переноса стиля.

#### *Математическая постановка для задачи сегментации*

Пусть имеется множество  $X$  изображений, каждый элемент которой  $X \ni x \in R^{m*n*3}$  является (RGB-изображением), а также множество ответов  $Y$ , где  $Y \ni y \in R^{m*n*21}$ , каждый ответ является тензором, каждый канал которого отвечает за свой класс. Пусть также имеется функция

$$f: X \rightarrow Y.$$

Требуется по заранее заданной выборке  $X^l, Y^l$  определить функцию

$$a: X \rightarrow Y,$$

которая бы наилучшим образом аппроксимировала функцию  $f$ . При помощи рассмотрения семейства функций  $g = g(x, y, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) \in R^{m*n*3}$ , где  $x \in R^{m*n*3}$ ,  $y \in R^{m*n*3}$  ( $m, n$  – размер входных изображений RGB) и нахождения  $g = g(x, y, \theta_1^*, \theta_2^*, \dots, \theta_k^*)$ , которая бы разделяла пиксели входного изображения  $x$  в соответствии с заранее заданными классами. Где поиск точки  $\theta_1^*, \theta_2^*, \dots, \theta_t^* \in R^{m*n}$  осуществляется при помощи определения функции ошибок  $L = L(x, y, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$ , от параметров  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$  и матриц  $x \in R^{m*n*3}$  и решения задачи  $Q(g, L, X^l, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_t) \rightarrow \min$ , где  $Q$  – эмпирический риск.

Математическая постановка для задачи переноса стиля:

$$S: X \rightarrow Y.$$

Требуется по заданному изображению  $x \in R^{m*n*3}$  составить алгоритм определения из множества параметрических моделей:

$$f = f(x_{style}, x_{input}, x_{content}, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_t) \in R^{m*n*3},$$

где  $x_{style}, x_{input}, x_{content} \in R^{m*n*3}$  ( $m, n$  – размер входных изображений RGB).

Функция

$$f = f(x_{style}, x_{input}, x_{content}, \theta_1^*, \theta_2^*, \dots, \theta_t^*),$$

которая бы наилучшим образом аппроксимировала функцию  $S$ , где поиск точки  $\theta_1^*, \theta_2^*, \dots, \theta_t^* \in R^{m*n}$  осуществляется при помощи определения функции ошибок  $L$  и решения задачи минимизации

$$L = L(x_{style}, x_{input}, x_{content}, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_t) \rightarrow \min.$$

### Выбор модели для решения задачи сегментации

В качестве модели для решения задачи сегментации были рассмотрены уже известные алгоритмы, которые приведены в следующей таблице.

#### Модели семантической сегментации

Network	mean IoU	global pixelwise acc
FCN ResNet50	60.5	91.4
FCN ResNet101	63.7	91.9
DeepLabV3 ResNet50	66.4	92.4
DeepLabV3 ResNet101	67.4	92.4
DeepLabV3 MobileNetV3-Large	60.3	91.2
LR-ASPP MobileNetV3-Large	57.9	91.2

Предлагается использование модели ResNet101, так как она удовлетворяет временным потребностям решения задачи и выдает приемлемый результат (рис. 1).

### Функция потерь

Функция ошибки  $L$  будет состоять из двух отдельных компонент, а более конкретно представляться следующей формулой:

$$L = L_{style} + L_{content}.$$

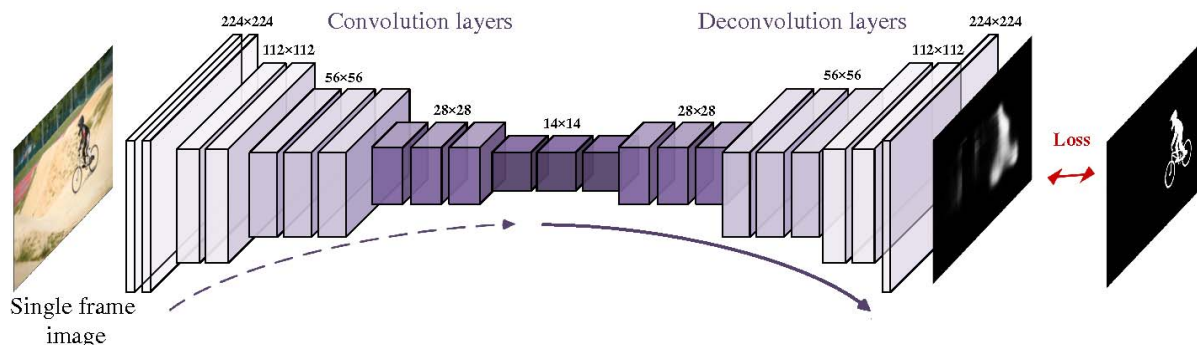


Рис. 1. Архитектура ResNet101

Так, мы должны будем следить за тем, чтобы наше изображение не отставало от исходного стилизованного изображения  $x_{style}$  по стилю и от исходного контента изображения  $x_{content}$  по контенту.

Теперь дадим математическое определение понятия стиля изображения. Согласно описанному выше принципу распознавания структур в изображениях, которые производят Convolutional neural layers, мы имеем, что при рассмотрении произвольного слоя сети, предположим, это будет слой, переводящий 64 карты активации в 128 карт. Тогда каждая из 128 карт – это будет матрица, которая реагирует на проявление какого-либо конкретного признака в изображении. Поэтому для удобства преобразуем тензор с количеством каналов 128 в матрицу путем развертывания каждой матрицы в вектор, а затем составлением из них двумерной матрицы. Затем при помощи стандартного скалярного произведения между векторами в Евклидовом пространстве будем находить корреляцию между каждой парой признаков для обнаружения того, насколько эти признаки одновременно часто встречаются на нашем изображении. По итогу этой операции будет получена так называемая Грамм-матрица (скалярных произведений) (рис. 2).

Собственно, именно Грамм-матрица и будем отвечать за стиль произвольного изображения – совокупность корреляции признаков, которые встречаются в этом изображении. Теперь остается лишь указать то, как будет определяться схожесть между стилями изображений. Получаем итоговую формулу

$$L_{style} = \sum_{j=1}^{nc} \sum_{j=1}^{nc} \left( G^{(S)} - G^{(G)} \right)^2.$$

Расстояние между контентом двух изображений  $X_1$  и  $X_2$  будем определять следующим образом:

$$L_{content} = \sum \left( a^{(c)} - a^{(G)} \right)^2,$$

где  $a(C)$ ,  $a(G)$  – результаты преобразования в двумерные матрицы выхода сверточного слоя для *input* и *style* изображений.

Получаем, добавляя параметры  $\alpha$ ,  $\beta$  которые выступают в качестве гиперпараметров модели и которые можно изменять, чтобы определять вклад каждой из компонент в общее значение функции потерь:

$$L = \alpha * L_{style} + \beta * L_{content}.$$

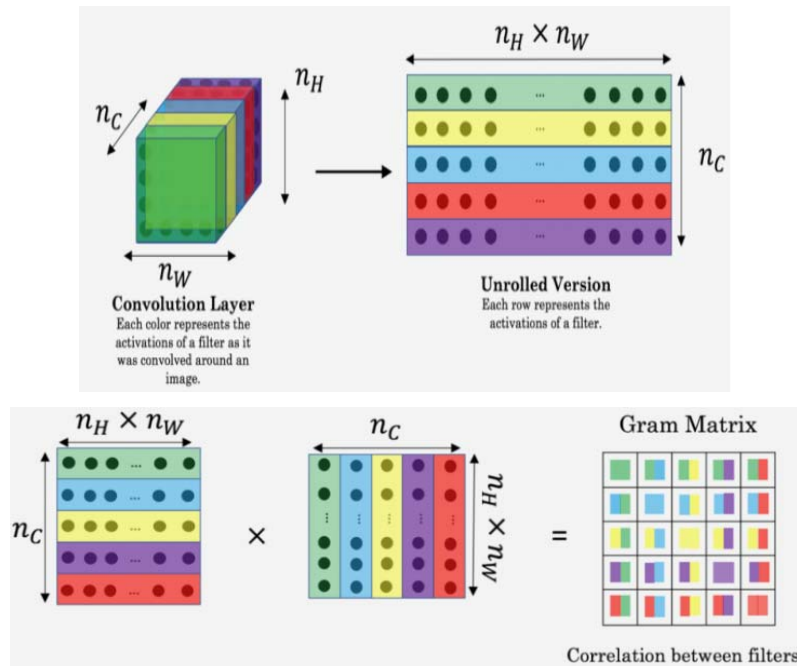


Рис. 2. Преобразование карт активаций с произвольного слоя и получение Грамм-матрицы

### Интеграция сегментации в алгоритм переноса стиля

При помощи алгоритма сегментации получаем тензор  $PREDICT[k][i][j]$  глубины 21 с матрицами размера  $N * M$ , который затем преобразуем в 2D-изображение путем изменения каждого элемента заранее взятой матрицы  $N * M$  на соответствующий наибольший элемент по каждому из каналов.  $\forall i, j \text{ MASK}[i][j] = \max_k \{PREDICT[k][i][j]\}$ . Затем, заменяя каждый ненулевой элемент матрицы MASK на 1, получаем решение задачи бинарной классификации, то есть матрицу, которая будет отвечать за разделение объекта изображения от фона.

Так как в общем случае функция потерь имеет вид

$$L = \alpha * L_{style} + \beta * L_{content}.$$

Соответствующее вычисление  $L_{style}$  следует изменить так, чтобы стиль на исходное изображение  $input$ , инициализируемое изображением  $content$ , накладывался только на его часть, а именно, та матрица  $MASK$ , которая получается по итогу сегментации, будет участвовать в роли шаблона. Таким образом, получаем формулы

$$\begin{aligned} a^{(S)} &:= MASK * a^{(S)}, \\ a^{(G)} &:= MASK * a^{(G)}. \end{aligned}$$

Приведем визуализацию процесса (рис. 3).

Далее, как и в исходном алгоритме, происходит вычисление функции потерь, но уже на новой матрице Грамма, и решается задача оптимизации

$$L = \alpha * L_{style} + \beta * L_{content} \rightarrow \min,$$

где параметрами функции  $L$  служат пиксели изображения  $input$ .



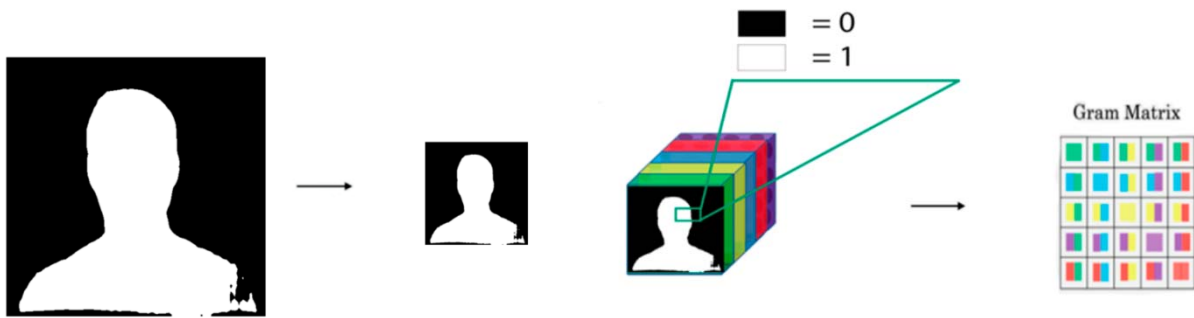


Рис. 3. Преобразование карт активаций с произвольного слоя

По полученной точке минимума строится изображение, которое и будет соответствовать переносу стиля на фон либо на объект изображения таким образом, что стиль полученной картинке наилучшим образом схож со стилевым изображением в смысле матрицы Грамма.

### Определение гиперпараметров модели

В этой части работы опишем то, как именно мы будем изменять выбранный нами алгоритм классификатора, который нам необходимо адаптировать под нашу задачу. Начнем с указания гиперпараметров модели, которые были получены как результат многократных обучений модели с различными вариациями этих параметров. Первый предложенный гиперпараметр – это произведение над архитектурой классификатора VGG19 следующих изменений: вначале избавимся от той части нейронной сети, которая содержит перцептроны, аналогичные простой полносвязной сети. Визуально теперь модель можно представить следующим образом (рис. 6).

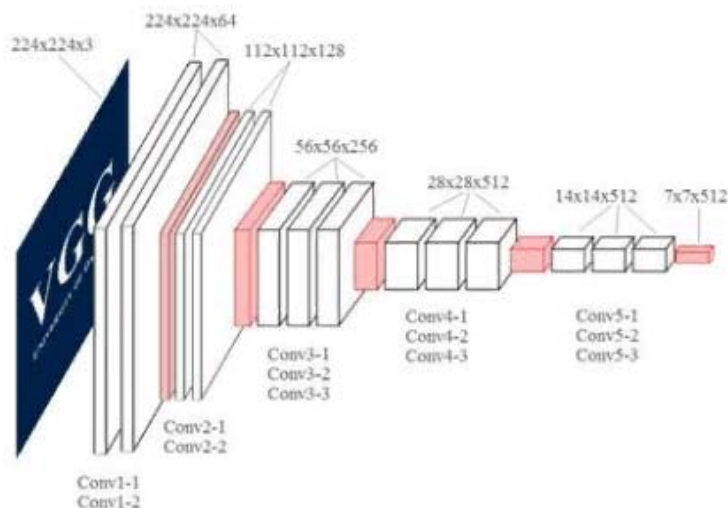


Рис. 6. Измененная модель на основе архитектуры VGG19

Далее будем выбирать те слои нейронной сети, с которых будет высчитываться ошибка по стилю и по контенту ( $L_{style}, L_{content}$ ) conv1, conv2, conv3, conv4, conv5. Слой для потери по контенту – conv4.

Следующая группа гиперпараметров – это те, которые будут задействованы непосредственно во время обучения.

Параметры  $\alpha$ ,  $\beta$ , которые отвечают за вклад ошибки по стилю и по контенту, будут равны 1000000 и 100. Так как исходный холст инициализируется контент изображением, то параметр, отвечающий за потерю по контенту, будет принимать довольно малое значение, так как его вклад в итоговую ошибку не существен. Количество итераций обучения `num_steps` полагаем равным 250. В качестве метода оптимизации целевой функции предлагается использовать алгоритм LBFGS (Алгоритм – Бройдена – Флетчера – Гольдфарба – Шанно).

### Результаты работы алгоритма

Реализуем алгоритм с описанным набором гиперпараметров, который представляет наилучший его результат. Рассмотрим работу алгоритма с входными данными в виде следующих двух изображений (рис. 7, 8).



Рис. 7. Выходные контент-изображение и изображение – стиль



Рис. 8. Сегментация мужчины, перенос стиля на фон

Время работы алгоритма – 52,6 с.

### Заключение

В ходе данной работы определена постановка задачи нейросетевого переноса художественного стиля в изображениях. Описана методика решения задачи, а также дана математическая интерпретация существенных для этой задачи

понятий, таких как стиль изображения, схожесть по стилю. Был предложен алгоритм, решающий как задачу семантической сегментации изображения, так и задачу переноса стиля. В качестве конечной конфигурации алгоритма были выбраны модели ResNet101, Vgg19, метод оптимизации – Алгоритма – Бройдена – Флетчера – Гольдфарба – Шанно, число итераций обучения – 300.

Время работы алгоритма по двум входным изображениям в среднем составляет 52 с.

### **Список использованных источников и литературы**

1. Курс Deep Learning. Ч.1. Продвинутый поток. URL: <https://www.dlschool.org/pro-track>.
2. A introduction to Neural Style Transfer with TensorFlow. URL: <https://towardsdatascience.com/introduction-to-neural-style-transfer-with-tensorflow-99915a5d624>.
3. Neural Network in Market Segmentation: A Descriptive study of Market Segmentation using Artificial Neural Networks Paperback. June 2, 2017.
4. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс. – Москва : Вильямс, 2006. – 1104 с.
5. Gatys L. A., Ecker A. S., Bethge M. A Neural Algorithm of Artistic Style. – URL: <https://arxiv.org/abs/1508.06576>

## **Анализ и прогноз динамики показателей социально-экономического развития региона на основе нейросетевого моделирования**

*Д. Д. Вавилова*

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*В работе представлено решение задач моделирования и прогнозирования социально-экономических процессов на базе актуальных статистических данных с использованием математических методов и алгоритмов. Анализ и прогноз динамики показателей, отражающих динамику развития социально-экономических процессов, выполнен на примере региональной системы Удмуртской Республики. На основе нейросетевого моделирования построен прогноз основных показателей социально-экономического развития Удмуртской Республики до 2025 года.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, методы прогнозирования, нейросетевой алгоритм, социально-экономические показатели.

### **Введение**

В современном мире ни одна сфера деятельности человека не может обойтись без прогнозов. Особое значение имеют прогнозы социально-экономического характера, поскольку они являются основой при построении стратегии и концепции долгосрочного социально-экономического развития как отдельных регионов, так и страны в целом.

Фундаментальная теория методов математического моделирования и прогнозирования социально-экономических процессов продолжает развиваться и по сей день. Точностью обладают только формализованные (математические) методы прогнозирования [1, 2], поскольку они предполагают построение математической модели взаимосвязи изменения состояния объекта исследования от других факторов, тем самым предоставляя качественный прогноз с некоторым уровнем надежности.

Математические методы прогнозирования имеют специфику применения для данных различного типа. Модели регрессионного анализа эффективны в случае выявленных и влияющих на результирующую переменную факторов. Трендовые модели используются при моделировании временных рядов, когда невозможно выделить закономерности в динамике развития процесса от внутренних факторов, предлагая нахождение аналитической функции зависимости уровней временного ряда от времени [3]. Однако регрессионные модели обладают недостатком: при анализе временных рядов не учитывается ценность уровней ряда, т. е. может быть занижена значимость данных последних лет [4].

Указанные недостатки отсутствуют при построении прогноза с использованием нейронных сетей в случае достаточного наличия исходных данных для прогноза. Важное преимущество при моделировании различных процессов с помощью нейронных сетей состоит в устойчивости получаемых результатов к частым изменениям среды и в результативности при работе с неполной информацией [5, 6]. Для практического использования при решении задач моделирования и прогнозирования, в том числе явлений и процессов социально-экономического характера, чаще всего применяются многослойные нейронные сети прямого распространения [7]. Эффективный алгоритм обучения многослойных нейронных сетей предоставляет возможность его адаптации для решения задач построения прогнозов как на краткосрочную, так и на долгосрочную перспективу.

### Разработка нейросетевого алгоритма для прогнозирования показателей социально-экономического развития региона

Нейросетевой алгоритм предполагает построение самокорректирующейся (адаптивной) математической модели, способной путем учета результатов прогноза, сделанного на предыдущем шаге, и информационной ценности уровней ряда оперативно реагировать на изменение условий.

Для прогноза показателей социально-экономического развития региона сконструируем сложную  $k$ -слойную нейронную сеть с  $m$  входами и  $l$  выходами (см. рис. 1). Сеть является полностью связной многослойной; ее структура определяется количеством скрытых слоев и числом нейронов на них. Нейросетевая модель представляет собой многослойный персептрон с сигмоидальной логистической функцией активации.

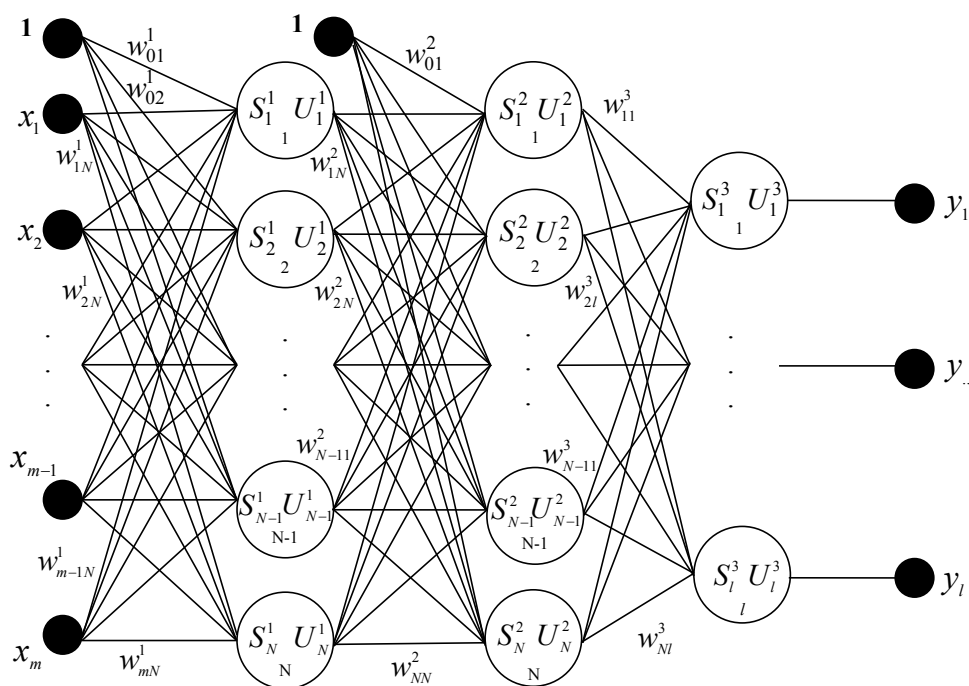


Рис. 1. Нейросетевая модель, используемая для прогнозирования показателей социально-экономического развития региона

Входными данными в нейросетевой модели являются показатели социально-экономического развития региона: валовой региональный продукт ( $x_1$ ), основные производственные фонды (ОПФ) ( $x_2$ ), среднедушевые денежные доходы ( $x_3$ ), численность населения ( $x_4$ ), естественный прирост населения ( $x_5$ ), человеческий капитал ( $x_6$ ), инвестиции в ОПФ ( $x_7$ ), инвестиции в здравоохранение ( $x_8$ ), в культуру ( $x_9$ ) и в образование ( $x_{10}$ ). Выходные данные – это прогнозные значения основных показателей социально-экономического развития региона: валовой региональный продукт ( $y_1$ ), основные производственные фонды ( $y_2$ ), человеческий капитал ( $y_3$ ), объемы инвестирования в социальную сферу ( $y_4, y_5, y_6$ ).

В каждом слое содержится  $N_p$  нейронов,  $p = 1, \dots, k$ . Будем использовать следующие обозначения:  $w_{ij}^p$  – весовой коэффициент связи, соединяющий сигнал, выходящий из  $(p - 1)$ -го слоя  $i$ -го нейрона и входящий в  $j$ -й  $p$ -го слоя. Для каждого слоя коэффициенты представим в виде матрицы  $(N_{p-1} + 1) \times N_p$ :

$$\vec{W} = (w_{ij}^p), \quad p = 1, \dots, k; \quad i = 0, \dots, N_{p-1}; \quad j = 1, \dots, N_p. \quad (1)$$

Выходные значения нейронов вычисляются:

$$u_0^p = 1, \quad u_j^p = f(s_j^p), \quad p = 1, \dots, k, \quad j = 1, \dots, N_p, \quad (2)$$

где  $f(s_j^p)$  – нелинейная активационная функция вида  $f(t) = (1 + e^{-\alpha t})^{-1}$ .

Обозначим через  $s_j^p$  входящий сигнал в  $j$ -й нейрон  $p$ -го слоя, который определяется взвешенной суммой входящих в него сигналов:

$$s_j^p = \sum_{i=0}^{N_{p-1}} w_{ij}^p u_i^{p-1}, \quad j = 1, \dots, N_p. \quad (3)$$

Выходные значения последнего  $k$ -го слоя должны соответствовать  $y_j$ :

$$y_j = u_j^k, \quad j = 1, \dots, l. \quad (4)$$

Процесс обучения состоит в подстройке весовых коэффициентов  $w_{ij}^p$ . В целях прогнозирования исходная статистическая база данных разделяется на обучающее и тестовое – участок ретропрогноза.

На обучающем множестве данных реализуется алгоритм обучения многослойной нейронной сети методом обратного распространения ошибок, который относится к градиентным методам оптимизации [8]. Для определения весовых коэффициентов  $\vec{W} = (w_{ij}^p)$  сети используется погрешность обучения:

$$E_q(\vec{W}) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^l (y_{qj} - r_{qj})^2, \quad q = 1, \dots, n, \quad (5)$$

где  $y_{qj}$  – соответствует  $j$ -му выходу при подаче на вход  $q$ -го образа.

При подаче  $q$ -го наблюдения коэффициенты будут изменяться так:

$$\vec{W}(q) = \vec{W}(q-1) + (-\lambda \cdot \nabla E_q), \quad (6)$$

где  $\vec{W}(q)$  – состояние вектора  $\vec{W}$  после обучения сети по  $q$ -му наблюдению;  $\lambda \in (0; 1]$  – скорость обучения сети;  $\nabla E_q$  – градиент функции  $E_q(\vec{W})$ :

$$\nabla E_q = \left( \frac{\partial E_q}{\partial w_{ij}^p} \right), \quad p = 1, \dots, k; \quad i = 0, \dots, N_{p-1}; \quad j = 1, \dots, N_p. \quad (7)$$

В компонентной форме выражение (7) представим в виде:

$$w_{ij}^p(q) = w_{ij}^p(q-1) + \Delta w_{ij}^p, \quad \Delta w_{ij}^p = -\lambda \frac{\partial E_q}{\partial w_{ij}^p}. \quad (8)$$

Компоненты вектора (8) распишем следующим образом:

$$\frac{\partial E_q}{\partial w_{ij}^p} = \frac{\partial E_q}{\partial u_j^p} \frac{\partial u_j^p}{\partial d_j^p} \frac{\partial d_j^p}{\partial w_{ij}^p}, \quad (9)$$

где частную производную  $\frac{\partial u_j^p}{\partial d_j^p}$  в соответствии с производной логистической функции  $\frac{\partial f(t)}{\partial d} = \xi f(t)(1-f(t))$  представим в виде:

$$\frac{\partial u_j^p}{\partial d_j^p} = \xi \cdot u_j^p \cdot (1 - u_j^p). \quad (10)$$

Введем новую переменную  $\delta_j^p$  следующим образом:

$$\delta_j^p = \frac{\partial E_q}{\partial u_j^p} \frac{\partial u_j^p}{\partial d_j^p}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial E_q}{\partial u_j^p} = \sum_{i=1}^{N_{p+1}} \frac{\partial E_q}{\partial u_i^{p+1}} \frac{\partial u_i^{p+1}}{\partial d_i^{p+1}} \frac{\partial d_i^{p+1}}{\partial u_j^p} = \sum_{i=1}^{N_{p+1}} \frac{\partial E_q}{\partial u_i^{p+1}} \frac{\partial u_i^{p+1}}{\partial d_i^{p+1}} w_{ji}^{p+1}. \quad (12)$$

Тогда  $\delta_j^p$  можно рекурсивно вычислять через данные  $(p+1)$ -го слоя  $\delta_j^{p+1}$ :

$$\delta_j^p = \left[ \sum_{i=1}^{N_{p+1}} \delta_j^{p+1} w_{ji}^{p+1} \right] \cdot \alpha \cdot u_j^p \cdot (1 - u_j^p). \quad (13)$$

При  $p = k$  из (10) и (11), приравнявая  $u_j^k = y_{qj}$ , находим:

$$\delta_j^k = [u_j^k - r_{qj}] \cdot \alpha \cdot u_j^k \cdot (1 - u_j^k). \quad (14)$$

Последний множитель в формуле (9) равен:  $\frac{\partial d_j^p}{\partial w_{ij}^p} = u_i^{p-1}$ .

В результате на основании формул (8), (9), (11) получаем разностную схему:

$$w_{ij}^p(q) = w_{ij}^p(q-1) - \lambda \delta_j^p u_j^{p-1}. \quad (15)$$

Для того чтобы обучить сеть, необходимо нормировать входные и выходные данные в области их определения. Если известно, что  $x_j \in [a_j - h_j; b_j + h_j]$ , то нормированные входные данные имеют вид:

$$\bar{x}_{qj} = \frac{x_{qj} - (b_j + a_j)/2}{(b_j - a_j)/2 + h_j}, \quad q = 1, \dots, n. \quad (16)$$

Качество обучения сети определяется погрешностью обучения:

$$\tilde{E}(\vec{W}) = 100 \sqrt{\frac{2}{l \cdot n} \sum_{q=1}^n E_q(\vec{W})}. \quad (17)$$

### **Результаты моделирования и прогнозирования показателей социально-экономического развития Удмуртской Республики**

Задача прогноза основных показателей социально-экономического развития региона решена на примере статистических данных по Удмуртской Республике. Источниками данных для исследования послужили статистические данные по демографическим и экономическим разделам официальных сайтов Федеральной службы государственной статистики РФ и Территориального органа статистики по Удмуртской Республике, министерств РФ и региона.

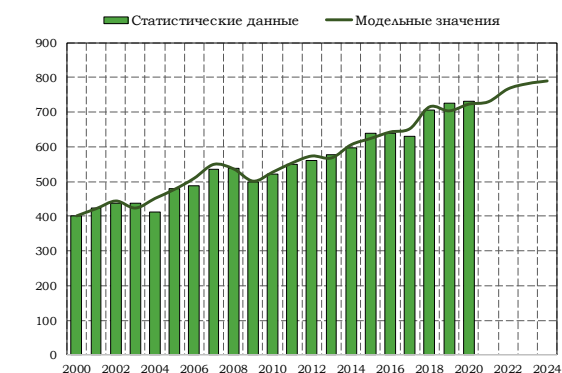
На рис. 2 представлены результаты моделирования и прогнозирования основных показателей социально-экономического развития Удмуртской Республики до 2025 года.

### **Заключение**

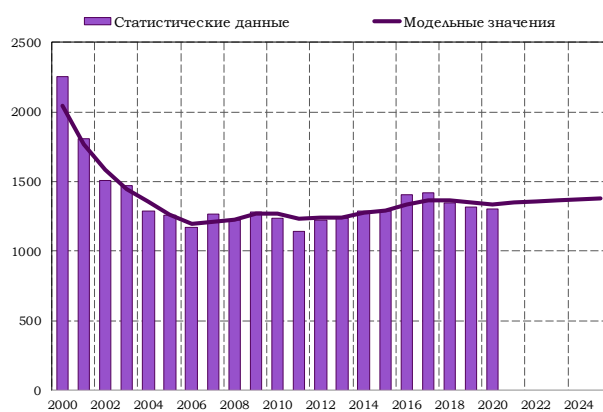
На основе разработанного нейросетевого алгоритма было выполнено прогнозирование основных показателей социально-экономического развития Удмуртской Республики на ближайшую перспективу.

Так, согласно прогнозным оценкам валовой региональный продукт республики в 2025 году составит 788,0 млрд руб., т. е. прогнозируется ежегодный прирост ВРП на 1,5 % относительно уровня 2020 года. Такое изменение ВРП отчасти объясняется прогнозной динамикой человеческого капитала с ежегодным темп прироста на 1,9 % к уровню 2020 года; в 2025 году накопленная величина человеческого капитала населения региона составит 802,2 млрд руб.

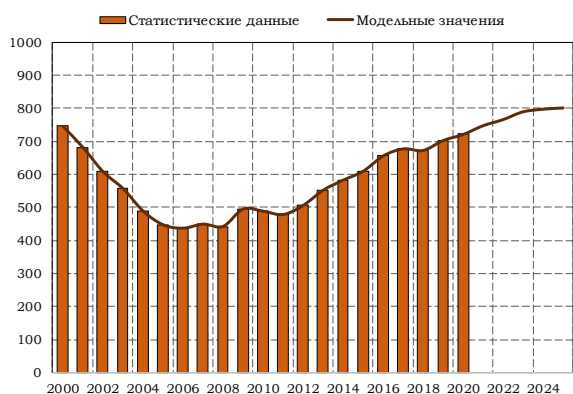




*a*



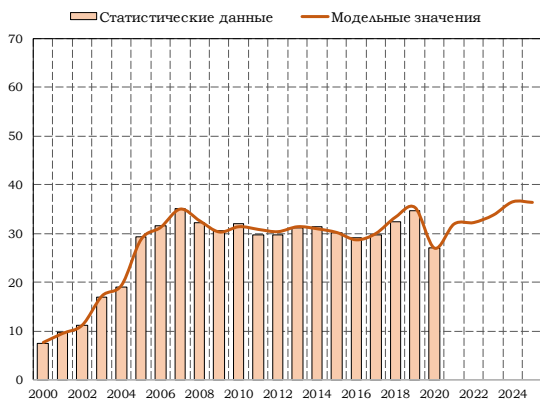
*б*



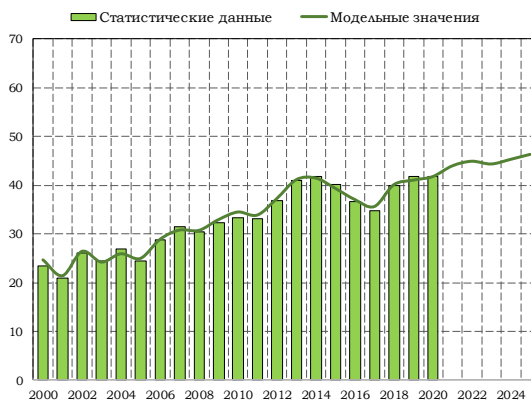
*в*



*г*



*д*



*е*

*Рис. 2.* Прогноз показателей социально-экономического развития Удмуртской Республики до 2025 года, млрд руб. в ценах 2020 года: ВРП (*a*), основных производственных фондов (*б*), человеческого капитала (*в*), бюджетных и частных инвестиций в здравоохранение (*г*), культуру (*д*) и образование (*е*)

Также получены прогнозы объемов инвестирования в социальную сферу Удмуртской Республики. Суммарные бюджетные и частные инвестиции в здравоохранение региона прогнозируются к 2025 году на уровне 55,3 млрд руб., в культуру – 36,4 млрд руб., в образование – 46,2 млрд руб.

### Список использованных источников и литературы

1. Крук, Д. М. Основы экономического и социального прогнозирования / Д. М. Крук, В. Н. Мосин. – Мсква : Высш. шк., 2005. – 200 с.
2. Кетова, К. В. Макромодель развития региона с учетом повышения качества трудовых ресурсов (на примере Удмуртской Республики) / К. В. Кетова, О. Р. Сабирова // Анализ и моделирование экономических процессов : сборник статей. Центральный экономико-математический институт РАН. – Москва, 2006. – С. 83–98.
3. Кетова, К. В. Оптимальное распределение капиталовложений с учетом демографического прогноза : дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Ижевск, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, 2004.
4. Лукашин, Ю. П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временны рядов. – Москва : Финансы и статистика, 2010. – 416 с.
5. Ketova K. V., Rusyak I. G., Saburova E. A., Vavilova D. D. Regional socio-economic parameters modeling and system analysis by means of programming and computing suite // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. No. 862.
6. Гусев, К. Ю. Нейросетевая модель прогнозирования интегральных экономических показателей / К. Ю. Гусев, В. Л. Бурковский // Системы управления и информационные технологии. – 2012. – № 2 (48). – С. 132–135.
7. Кетова, К. В. Математическое моделирование и нейросетевое прогнозирование структуры и динамики человеческого капитала Российской Федерации / К. В. Кетова, И. Г. Русяк, Д. Д. Вавилова // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2020. – № 53 (4).– С. 13–24.
8. Якимович, Б. А. Методы анализа и моделирования систем / Б. А. Якимович, В. А. Тененев. – Ижевск, 2001. – 152 с.

## О представлении квадратур одного квазидифференциального уравнения в виде сумм рядов

М. Ю. Ватолкин

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*Рассматривается однородное квазидифференциальное уравнение произвольного порядка достаточно общего вида и такое, что его фундаментальная система решений выражается в квадратурах. Эти интегралы представлены в настоящей работе в виде сумм рядов. Одним из применений полученных представлений может быть приближенное построение решений исходного уравнения (например, когда квадратуры не выражаются в элементарных функциях).*

**Ключевые слова:** квазипроизводные, квазидифференциальное уравнение, фундаментальная система решений, квадратуры.

Пусть  $I \subset \mathbb{R}$  – открытый интервал,  $P = (p_{ik})_0^n$  – нижняя треугольная матрица,  $p_{ik} : I \rightarrow \mathbb{R}$ , такая, что  $p_{00}(\cdot)$  и  $p_{nn}(\cdot)$  измеримы, почти всюду конечны и почти всюду отличны от нуля, а  $\frac{1}{p_{ii}} (i \in 1:n-1)$ ,  $\frac{p_{ik}}{p_{ii}} (i \in 1:n-1, k \in 0:i-1)$  локально суммируемы в  $I$ . Квазипроизводные  ${}_p^k x$  ( $k \in 0:n$ ) функции  $x : I \rightarrow \mathbb{R}$  определяются равенствами

$${}_p^0 x \doteq p_{00}x, \quad {}_p^k x \doteq p_{kk} \frac{d}{dt} ({}_p^{k-1} x) + \sum_{v=0}^{k-1} p_{kv} ({}_p^v x) \quad (k \in 1:n). \quad (1)$$

Линейным однородным квазидифференциальным называется уравнение

$$\left( {}_p^n x \right) (t) = 0, \quad t \in I. \quad (2)$$

Его решением называется всякая функция  $x : I \rightarrow \mathbb{R}$ , имеющая локально абсолютно непрерывные квазипроизводные  ${}_p^k x$  ( $k \in 0:n-1$ ) и почти всюду в  $I$  удовлетворяющая уравнению (2) (см. [1]).

Получено (см. [2]) представление фундаментальной системы решений уравнения (2) в виде сумм рядов.

Пусть матрица

$$Q \doteq \text{diag}(p_{00}, p_{11}, \dots, p_{n-1, n-1}, 1).$$

Фундаментальная система решений уравнения

$$\left( {}_Q^n x \right) (t) = 0, \quad t \in I,$$

с начальными условиями  $\binom{i-1}{p}x_{k-1}(a) = \delta_{ik}$  ( $i, k \in 1:n$ ,  $a \in I$ ), где  $\delta_{ik}$  — символ Кронекера, имеет вид (см. [1, 2])

$${}^0_Q w_0(t) = 1, \quad {}^0_Q w_1(t) = \int_a^t ds/p_{11}(s),$$

$${}^0_Q w_i(t) = \int_a^t \frac{ds_0}{p_{11}(s_0)} \int_a^{s_0} \frac{ds_1}{p_{22}(s_1)} \cdots \int_a^{s_{i-2}} \frac{ds_{i-1}}{p_{ii}(s_{i-1})} \quad (i \in 2:n-1).$$

Пусть

$$A_{n-v-1,i}^0(t) \doteq {}^v_Q w_i(t) \quad (v \in 0:n-1), \quad (3)$$

$$a_{ki}^j(t) \doteq \sum_{v=0}^{n-k-1} \frac{p_{n-k,v}(t)}{p_{n-k,n-k}(t)} A_{n-v-1,i}^j(t) \quad (k \in 0:n-1), \quad (4)$$

$$A_{0i}^{j+1}(t) \doteq \int_a^t a_{0i}^j(s) ds, \quad (5)$$

$$A_{ki}^{j+1}(t) \doteq \int_a^t \left( a_{ki}^j(s) + \frac{A_{k-1,i}^{j+1}(s)}{p_{n-k,n-k}(s)} \right) ds. \quad (6)$$

$$(k \in 1:n-1, i \in 0:n-1, j = 0, 1, 2, \dots).$$

Пусть функции  $p_{ii}(t) > 0$  почти всюду в  $I$  ( $i \in 1:n-1$ ),  $1/p_{ii}(t)$  ( $i \in 1:n-2$ ),  $p_{ik}(t)/p_{ii}(t)$  ( $i \in 1:n$ ,  $k \in 0:i-1$ ) локально ограничены в существенном на  $I$ . Тогда (см. [2]) фундаментальная система решений уравнения (2) с начальными условиями  $\binom{i-1}{p}x_{k-1}(a) = \delta_{ik}$  ( $i, k \in 1:n$ ,  $a \in I$ ) представима в виде

$${}^0_p u_i(t) = \sum_{j=0}^{\infty} (-1)^j A_{n-1,i}^j(t) \quad (t \in I, i \in 0:n-1).$$

Пусть сейчас и всюду далее  $p_{ik}(t) = 0$  ( $k \in 0:i-2, i \in 2:n$ ). Тогда уравнение (2) интегрируется в квадратурах.

Действительно, в этом случае определения (1) принимают вид

$${}^0_p x \doteq p_{00}x, \quad {}^{k+1}_p x \doteq p_{k+1,k+1} \frac{d}{dt} \binom{k}{p} x + p_{k+1,k} \binom{k}{p} x \quad (k \in 0:n-1)$$

и фундаментальная система решений уравнения (2) с начальными условиями

$$\binom{i-1}{p}x_{k-1}(a) = \delta_{ik} \quad (i, k \in 1:n, a \in I)$$

находится по формулам (см. [1])

$${}^0_p u_0(t) = \exp\left(-\int_a^t \frac{p_{10}(\tau)}{p_{11}(\tau)} d\tau\right), \quad (7)$$

$${}^0_p u_i(t) = \int_a^t \frac{dt_1}{p_{11}(t_1)} \int_a^{t_1} \frac{dt_2}{p_{22}(t_2)} \cdots \int_a^{t_{i-1}} \frac{dt_i}{p_{ii}(t_i)} \exp\left(-\sum_{v=1}^{i+1} \int_{t_{v-1}}^{t_v} \frac{p_{v,v-1}(\tau)}{p_{vv}(\tau)} d\tau\right) \\ (t_0 = t, t_n = a, i \in 1:n-1). \quad (8)$$

Определения (3)–(6) в этом случае перейдут в следующие обозначения:

$$A_{n-v-1,i}^0(t) \doteq {}^v_Q w_i(t) \quad (v \in 0:n-1), \\ a_{ki}^j(t) \doteq \frac{p_{n-k,n-k-1}(t)}{p_{n-k,n-k}(t)} A_{ki}^j(t) \quad (k \in 0:n-1), \\ A_{0i}^{j+1}(t) \doteq \int_a^t a_{0i}^j(s) ds,$$

$$A_{ki}^{j+1}(t) \doteq \int_a^t \left( a_{ki}^j(s) + \frac{A_{k-1,i}^{j+1}(s)}{p_{n-k,n-k}(s)} \right) ds$$

$$(k \in 1:n-1, i \in 0:n-1, j = 0, 1, 2, \dots).$$

Пусть функции  $p_{ii}(t) > 0$  почти всюду в  $I$  ( $i \in 1:n-1$ ),  $1/p_{ii}(t)$  ( $i \in 1:n-2$ ),  $p_{ik}(t)/p_{ii}(t)$  ( $i \in 1:n, k \in 0:i-1$ ) локально ограничены в существенном на  $I$ . Тогда имеют место следующие равенства

$$\exp\left(-\int_a^t \frac{p_{10}(\tau)}{p_{11}(\tau)} d\tau\right) = \sum_{j=0}^{\infty} (-1)^j A_{n-1,0}^j(t) \quad (t \in I), \quad (9)$$

$$\int_a^t \frac{dt_1}{p_{11}(t_1)} \int_a^{t_1} \frac{dt_2}{p_{22}(t_2)} \cdots \int_a^{t_{i-1}} \frac{dt_i}{p_{ii}(t_i)} \exp\left(-\sum_{v=1}^{i+1} \int_{t_{v-1}}^{t_v} \frac{p_{v,v-1}(\tau)}{p_{vv}(\tau)} d\tau\right) = \\ = \sum_{j=0}^{\infty} (-1)^j A_{n-1,i}^j(t) \quad (t \in I, t_0 = t, t_n = a, i \in 1:n-1). \quad (10)$$

Полученные равенства (9) и (10), с помощью которых представлены квадратуры элементов фундаментальной системы решений уравнения (2), могут найти применение, помимо самой теории квазидифференциальных уравнений, например, в некоторых задачах теории оптимального управления и математического моделирования, использующих при своем решении квазидифференциальные уравнения.

Отметим также, что в случае, когда не все интегралы, находящиеся в правых частях равенств (7) и (8), выражаются в элементарных функциях, представления (9), (10) можно использовать для приближенного построения решений уравнения (2).

#### **Список использованных источников и литературы**

1. *Дерр, В. Я.* Неосцилляция решений линейного квазидифференциального уравнения // Известия института математики и информатики УдГУ. – 1999. – Вып. № 1 (16). – С. 3–105.
2. *Ватолкин, М. Ю.* О представлении решений квази-дифференциального уравнения / М. Ю. Ватолкин, В. Я. Дерр // Известия вузов. – 1995. – № 10 (401). – С. 27–34.

## Анализ критических ситуаций в процессе пуска тяжелых ракет

*Е. К. Виссарионова*

Воткинский филиал ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

*Зачастую аварии бывают вызваны воздействиями на ракету нерасчетных нагрузок и некорректной работой телеметрии. Для предотвращения подобных аварий в будущем необходимо проводить полный анализ причин возникновения аварий и учитывать эти факторы при последующем проектировании. Для этого необходимо разработать такую систему сбора информации о каждом пуске ракет, которая помогла бы систематизировать полученные данные, и, если не исключить, то уменьшить влияние человеческого фактора.*

**Ключевые слова:** ракетоноситель, критические ситуации, аварии ракетоносителей, анализ аварий, космические ракеты.

В ракетостроении качество конструкторских, технологических или эксплуатационных разработок оцениваются по отсутствию аварий во время пуска ракет и в период полета и достижениям поставленной цели.

Возникновение аварий обычно напрямую связано с ошибками и просчетами, имеющимися в разработке. Эти ошибки обычно взаимосвязаны с возникающими критичностями. В большинстве случаев развитие критичностей приводит к отклонению ракеты от заданной траектории, что вызвано действиями на нее нерасчетных нагрузок или некорректной работой телеметрии. Как правило, после этого изделие самоликвидируется.

За последние 60 лет, начиная с первого полета человека в космос (с 1961 года), произошло более 100 аварий отечественных космических и боевых стратегических ракет.

Статистика по причинам возникновения аварий долгое время не собиралась, и это привело к невозможности проведения полного анализа причин возникновения аварий. Тем самым при создании новых ракет не было возможности утверждать, что подобная критичность, приводящая к аварии, больше не возникнет. Тем не менее отрицательный результат – это тоже результат, который можно и нужно использовать в ракетостроении с целью повысить надежность эксплуатации этой техники.

На сегодняшний день достоверно известны причины возникновения около 70 аварий космических и боевых ракет, в числе которых ракеты Р-30 «Булава-30», РТ-2ПМ2 «Тополь-М», а также ракетоноситель «Союз» и другие [1].

Считаем, что для сокращения количества отказов при запуске ракет необходимо выполнить анализ всех имеющихся негативных ситуаций, в ходе которого выявить «узкие места» – причины их возникновения.

Анализ данных всех известных нештатных ситуаций позволил объединить выявленные критические ситуации в группы.

*В первую группу* по количеству аварий входят критические ситуации, возникающие во время **работы двигателя второй ступени**. Здесь произошло 13 случаев, что составляет 18,6 % от общего числа аварий.

Основные случаи аварий с 1967 по 1999 год приходятся на ракетоноситель «Протон-К». Он относится к ракетоносителям тяжелого класса и предназначен для выведения автоматических космических аппаратов на орбиту Земли с последующим перемещением в космическое пространство.

Наибольшее количество аварий пришлось на время отработки ракетносителя в условиях «лунной гонки» СССР – США в 1967–1970 годы. В это время проводились летные испытания разгонного блока «Д» ракетносителя, возвращаемого аппарата типа «Зонд», а также аппаратов семейства «Луна» и «Марс». 9 аварий произошло во время работы первой трех ступеней ракетносителя «Протон», из них пять – во время работы 2-й и 3-й ступеней, две – 1-й ступени, и по одной – по срабатыванию ложной команды системы безопасности и из-за разрушения головного обтекателя космического аппарата (КА). Еще четыре аварии произошли вследствие отказов двигательной установки разгонного блока Д. В общем, поставленные задачи были выполнены только в 10 пусках из 25 [2].

На двухступенчатую ракету-носитель среднего класса «Зенит-2» приходится четыре из тринадцати аварий.

Причинами аварий послужили:

- отказ турбонасосного агрегата, который часто приводил к неисправности в работе жидкостного ракетного двигателя (ЖРД);
- прогар газогенератора наддува бака окислителя и возгорание турбонасосного агрегата двигателя в стыке крышки и соплового аппарата из-за возможного производственного дефекта сварного шва.

*Вторая группа* критических ситуаций связана с **отказом в разгонном блоке**: на эту группу приходится 17,1 % от общего количества аварий.

Наиболее часто эти аварии возникали у ракетносителя «Молния» – четырехступенчатого ракетносителя среднего класса. Восемь из десяти аварий произошли в период с 1962 по 1964 год, причиной которых был отказ при запуске двигателя блока «Л».

Анализ аварий позволил установить причину неудач [3]: была допущена проектно-конструкторская ошибка, в результате которой двигатель IV ступени (блок «Л») не запускался.

Блок «Л» в своем составе имел отдельный блок обеспечения запуска, на ферменной конструкции которого располагалась система ориентации и стабилизации, а также автоматика двигателя с аккумуляторными батареями электропитания. Предполагалось, что система управления должна была за 70 с до включения двигателя блока «Л» переключить электропитание системы ориентации и стабилизации батарей блока обеспечения запуска на батареи блока «Л».

Однако переключения электропитания не происходило, в результате чего блок «Л» в течение 70 секунд находился в неуправляемом режиме. Работа блока могла бы быть успешной, если бы угловые возмущения блока не изменяли



его положения более допустимого, электропитание в этот момент включалось от системы управления блока «Л». Но возникали возмущения больше допустимых значений, и тогда гироскопы становились прямо на упоры, а двигатель блока «Л» не включался. Впоследствии эта причина была устранена.

Из-за проблем с разгонным блоком на заданную орбиту не вышли космические аппараты, находившиеся на борту ракетоносителей «Энергия» и «Протон-К» в 1987 и 1997 годах соответственно.

На третью группу приходится 17,1 % аварий. Они связаны с отказами, вызванными **сбоем в системе управления ракетой**.

Эта причина свойственна в основном ракетоносителям семейства «Зенит» и «Союз». Отказы в системе управления возникли из-за несовершенства и ошибок в алгоритмах программного обеспечения и потери управления.

Например, из-за конструктивно-технологических недочетов в системе управления произошло три аварии твердотопливной баллистической ракеты подводного базирования «Булава». Две из них произошли из-за отказа механизма управления тягой твердотопливного двигателя. Сопловой насадок третьей ступени не полностью раскрылся, что привело к снижению номинальной тяги ракеты, сходу ракеты с заданной траектории и ее самоликвидации. Отказ же в сопловом блоке произошел из-за поломки механизма, выдвигающего сопло, – штока, который был изготовлен не из титана. Также причиной возникновения аварий стал и производственный дефект в рулевом агрегате первой ступени.

*В четвертую группу* собраны аварии, связанные со **сбоями в работе первой ступени**. Здесь имело место десять аварий (т. е. 14,3 %). Наиболее часто такие аварии возникали у ракетоносителей тяжелого и сверхтяжелого класса, таких как «Н-1» – (4 аварии) и «Протон – К» – (2 аварии).

Первая ступень ракетоносителя «Н-1» имела 30 маршевых двигателей. Большое количество одновременно работающих двигателей отрицательно сказалось на надежности ракетоносителя в целом.

Всего с ракетоносителем «Н-1» было проведено 4 испытательных пуска [4]. Все они закончились неудачей на этапе работы первой ступени, хотя на стендовых испытаниях отдельные двигатели показали себя достаточно надежными. Большинство возникавших проблем с носителем было вызвано автоколебаниями ракеты, гидродинамическим ударом, разворачивающим моментом, электрическими помехами и другими неучтенными эффектами, вызванными одновременной работой такого большого количества двигателей, сложностью коммуникаций и большим размером ракеты. Эти проблемы были выявлены уже на этапе летных испытаний. Тогда из-за нехватки средств наземные стенды для динамических и огневых испытаний всего носителя или первой ступени в сборе тогда не строились. Применявшийся подход, ранее приносивший успех к намного меньшим по размерам и несравнимо более простым по устройству баллистическим ракетам здесь привел к череде аварий.

Две аварии произошли в результате отказа двигателей бокового блока у ракетоносителей семейства «Союз» в 1966 и 2002 годах.

*В пятую группу* входят аварии, связанные с **отказами в работе третьей ступени** ракеты – 11 % аварий.

В 1963 году ракетоноситель «Восток» отклонился от расчетной траектории полета, что привело к запуску системы аварийного подрыва. Похожая авария произошла в 2006 году с ракетой «Булава» [5].

По причине отказа в работе третьей ступени произошло 3 аварии ракетоносителя «Союз». В 2011 году в результате засорения тракта подачи горючего произошло аварийное отключение двигателя третьей ступени ракеты.

Причиной аварии весной 2015 года стало нештатное разделение третьей ступени «Союза» с «Прогрессом». Было установлено, что авария произошла из-за разгерметизации баков ракетоносителя с окислителем и горючим. К такому результату привели недостатки в конструкции, связанные с совместным использованием ракеты и корабля.

Зимой 2015 года на 383-й секунде полета, во время работы третьей ступени ракеты перестала поступать телеметрическая информация. Потеря корабля произошла на высоте около 190 км над Землей. В результате расследования выяснилось: «произошло нештатное механическое разделение» третьей ступени ракеты и корабля. Причиной аварии послужило разрушение бака окислителя третьей ступени «Союза-У» из-за возгорания насоса окислителя двигателя РД-0110. Хотя вполне возможно, что к возгоранию могло привести попадание посторонних частиц в полость насоса либо возможное нарушение технологии сборки двигателя.

*Шестую группу* составляют аварии, связанные с **отказами в системе разделения** – 4,3 %. Причиной аварий ракет «Р-36орб» и «Булава» 1966 и 2008 годах явилось несрабатывание одного из пиропатронов. Это привело к неполному отделению отсеков и ступеней [6], в результате чего произошла самоликвидация ракеты. В ракете «К65М-РБ5» отказ произошел в результате электрического дефекта системы.

Пиросредства обладают достаточно низкой надежностью из-за того, что являются одноразовыми средствами и, соответственно, нет возможности заранее проверить их работоспособность и выявить брак, возникший на этапе сборки или приемо-сдаточных испытаний.

Две идентичные аварии произошли с ракетоносителем «Союз-У» в 1996 году с разницей в запусках один месяц (первая авария произошла 14 мая, а вторая – 20 июня).

Из-за разрушения головного обтекателя на 49-й секунде полета произошла авария ракетоносителя. Обычно отделение обтекателя происходит не ранее 150-й секунды полета, уже после того как на 120-й секунде на высоте около 50 км происходит отделение первой ступени ракеты. Здесь же преждевременное отделение головного обтекателя от ракеты программа бортового компьютера «восприняла» как аварийную ситуацию на борту.

Ситуация в полете 14 мая 1996 года развивалась так: на 49,45 с полета телеметрия зафиксировала возмущения ударного характера. В то же время (49,4–49,6 с) произошел преждевременный сброс головного обтекателя (ГО), причем последовательность сброса была штатной, нарушалась только временная диаграмма. Кроме того, было зафиксировано вспучивание ГО на 27-й с, что позволяет утверждать, что разрушение началось именно на 27-й с. В результате

этого ракета стала отклоняться от расчетной траектории ввиду того, что этот участок полета ракетоносителя соответствует наибольшим значениям скоростного напора.

На 124-й секунде полета, через 6 секунд после отделения блоков первой ступени, система управления выдала команду на отключение двигательной установки из-за превышения допустимой величины отклонения по тангажу.

После отключения двигателей ракета продолжила неуправляемое движение. Подрыв ракеты не производился, она взорвалась при падении.

Во время пуска ракетоносителя «Союз-У» 20 июня 1996 года в Плесецке на 48,75 с телеметрия зафиксировала несанкционированный сброс обтекателя, что сразу же привело к аварийному выключению двигателей и разделению ступеней и КА. Затем сработала система подрыва объекта, в результате чего КА был разрушен еще в воздухе.

В результате расследования установили, что причин аварий две:

- разрушение ГО;
- разрушение замков продольного стыка створок ГО.

Некачественные стеклосотопластиковые обтекатели были изготовлены с нарушением технологии проклейки слоев. Также при изготовлении замков крепления створок обтекателя требования к прочности были заложены без учета скоротечного волнового процесса перестройки давления по всей длине ГО (бегущей волны).

Подводя итог анализа аварий, отметим следующее: подавляющее большинство причин аварий связано с недоработками в конструкторской документации, большим числом процессов и переменных нагрузок, возникающих в момент запуска и полета ракет.

Известно, что при проектировании всегда предполагалось, что коэффициент запаса должен компенсировать возможные просчеты конструкции и процесса изготовления. Однако тот факт, что аварии чаще всего случаются из-за сбоя в работе двигателей второй ступени и отказа в разгонном блоке, позволяет утверждать, что, возможно, существуют факторы, влияющие на систему, которые на этапе проектирования недостаточно изучены и, как следствие, неточно рассчитаны или просто не учтены. Считаем, что необходимо более детально изучить причины отказа каждой ракеты, выяснить причины того, что расчеты, проведенные на этапе проектирования, не дали ожидаемого результата.

На первом этапе анализа необходимо понять, что послужило начальной отправной точкой запроектной работы соответствующего узла.

Недостаточную жесткость и прочность конструкции, приведшую к разрушению узла могут вызвать внешние и внутренние силы при расчетах и проектировании. Установить их величины и направленность действия является основной задачей для исключения ошибок.

К прогару, износу, негерметичности газо- или гидросистемы может привести недостаточная толщина вышедшей из строя детали, в результате избыточного давления, повышенной, в сравнении с проектной, температуры горения или более точечного (локального) их приложения.

Из каждого поэтапно разобранный случай появления нештатной работы узла ракеты нужно делать выводы, по результатам которых в дальнейшем необходимо проводить специальные мероприятия и вводить в методики и правила проведения расчетов.

**Выводы.**

1. Основным способом предотвращения однотипных аварий является заблаговременный учет всех факторов, ранее действовавших на тот или иной узел или агрегат. Для этого необходимо создать общую систему для накопления информации об авариях. Необходимо четко определять, какой узел и какая деталь или сборочная единица вышла из состояния работоспособности и послужила первопричиной аварии, причины выхода их из строя и силовые факторы, вызвавшие данный отказ.

2. На основании полученных результатов необходимо проводить полную диагностику аналогичных узлов и ракетных комплексов. А при новом проектировании ракет и ракетных комплексов необходимо дополнительно моделировать работу каждого узла при возмущающих факторах, которые вызывали отказ и приводили ракету к аварийной ситуации.

3. При разработке, проектировании и диагностике ракеты необходимо исключить или минимизировать человеческий фактор, т. к. зачастую многие аварии связаны именно с ним. Для этого надо разработать автоматизированные комплексы проектирования и диагностики отдельных узлов и ракетных комплексов в целом, в которые автоматически будут загружаться данные о силовых и возмущающих факторах, ранее действовавших на конкретный узел.

#### **Список использованных источников и литературы**

1. Железняков, А. Б. Тайны ракетных катастроф. Плата за прорыв в космос / А. Б. Железняков. – Москва : Яуза, 2011. – 640 с.
2. Черток, Б. Е. Ракеты и люди. Лунная гонка / Б. Е. Черток. – 2-е изд. – Москва : Машиностроение, 1999. – 538 с.
3. Ракета-носитель «Молния». – URL: [https://www.energia.ru/ru/history/systems/vehicle\\_molniya.html](https://www.energia.ru/ru/history/systems/vehicle_molniya.html) (дата обращения: 29.01.2021)/
4. Черток, Б. Е. Ракеты и люди. Горячие дни холодной войны / Б. Е. Черток. – Москва : Машиностроение, 1999. – 528 с.
5. Хроника испытаний «Булавы». – URL: <https://rg.ru/2019/09/27/hronika-ispytanij-rakety-bulava.html> (дата обращения: 15.15.2020).
6. Ракетный комплекс «Булава» / А. В. Карпенко. – URL: <http://bastion-karpenko.ru/bulava/> (дата обращения: 15.05.2020).

## Статистические построения для реализации модели человеческого капитала по совокупности состояния здоровья, образования, культуры

С. Р. Дорофеева

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*В работе исследован статистический материал, необходимый для численной реализации экономико-математической модели человеческого капитала. Изучены статистические данные Российской Федерации за период 2000–2020 гг. по составляющим здоровья, образования и культуры. Получено, что отдельные составляющие имеют тенденцию к росту, и это дает возможность утверждать о росте уровня человеческого капитала в стране.*

**Ключевые слова:** человеческий капитал, математическое моделирование, здоровье, образование, культура.

### Введение

В современном мире наиболее успешными в мировой экономике являются страны, которые научились увеличивать и использовать знания, умения, способности и компетенции своих людей. Более здоровое, образованное и культурно развитое население способно приносить большую пользу экономике государства.

Формирование человеческого капитала осуществляется за счет объединения нескольких факторов разных направлений, которые могут реализовываться в различных формах и проходить через все жизненные этапы человека [1]. Вопросы формирования и развития человеческого капитала исследовались многими учеными, но основателями теории человеческого капитала считаются Г. Беккер и Т. Шульц [2, 3]. История развития теории человеческого капитала подробно изложена в работе А. Корицкого [4]. В ней выделены такие российские ученые, как Р. Капелюшников [5], С. Дятлов [6], В. Марцинкевич [7].

Количественные оценки человеческого капитала можно найти, например, в работах К. Кетовой [8–10], Мазелиса [11, 12] и др.

### Человеческий капитал: его сущность и модель

Человеческий капитал – это совокупность знаний, навыков, умений и компетенций людей, которые создают основу для повышения конкурентоспособности как отдельных предприятий, так и отраслей региональных социально-экономических систем. Увеличение человеческого капитала за счет инвестиций в развитие и совершенствование профессиональных знаний, навыков и умений

считается наиболее эффективным по сравнению с другими направлениями. Этот вывод присутствует в работах [1, 13, 14]. Именно люди с их здоровьем, образованием, квалификацией, профессиональным опытом и культурой являются главным драйвером экономики. Качественные и количественные характеристики человеческого капитала представлены на рис. 1.

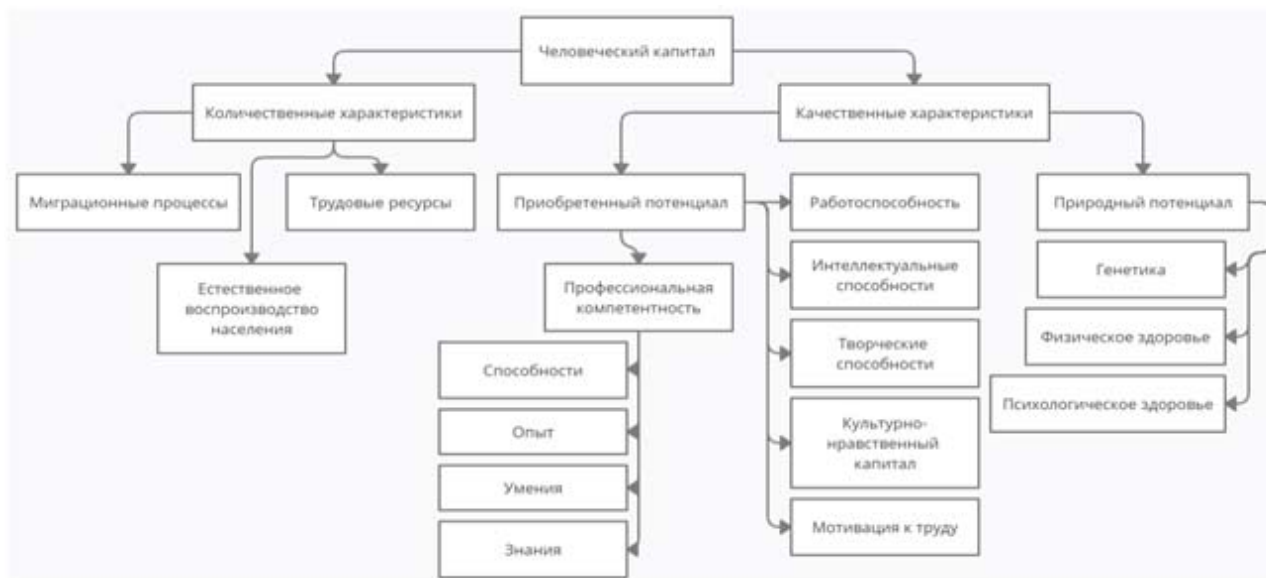


Рис. 1. Элементы воспроизводства человеческого капитала

В соответствии с работами [8–10] примем, что человеческий капитал состоит из трех составляющих, полагая при этом, что удельное (на одну демографическую единицу) среднестатистическое значение человеческого капитала определяется их линейной комбинацией:

$$h(t, \tau) = \alpha_1 h_1(t, \tau) + \alpha_2 h_2(t, \tau) + \alpha_3 h_3(t, \tau), \quad (1)$$

$$\alpha_i \in (0,1), \quad \sum_{i=1}^3 \alpha_i = 1, \quad (2)$$

где  $\alpha_i$  – весовые коэффициенты слагаемых человеческого капитала; значения  $h_i = h_i(t, \tau)$  измеряются в денежных единицах; индекс  $i=1$  соответствует составляющей здоровья,  $i=2$  – образовательной составляющей,  $i=3$  – культурной составляющей. Оценим слагаемые, входящие в формулу (1).

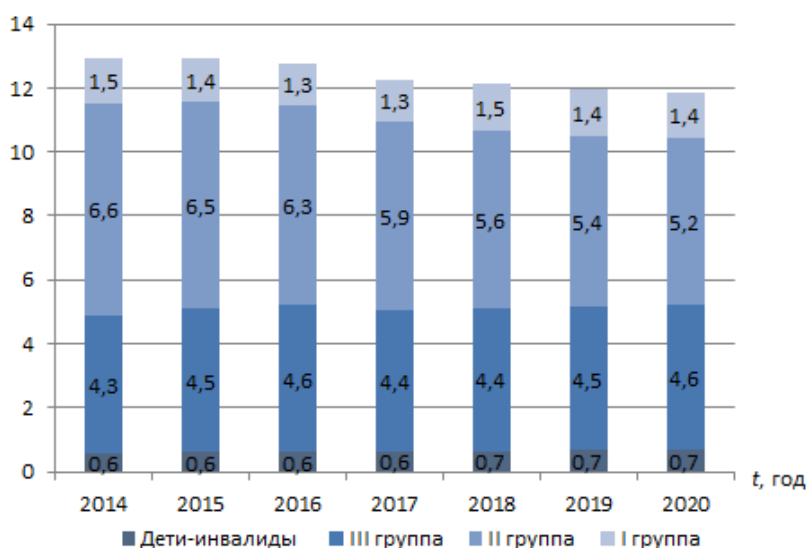
### Статистические построения составляющих человеческого капитала

Первой составляющей, включенной в данную модель человеческого капитала, является здоровье. Здоровье населения и экономика государства имеют тесную взаимосвязь и взаимозависимость: не только экономика влияет на здоровье населения, но и здоровье населения оказывает влияние на экономику государства [15].

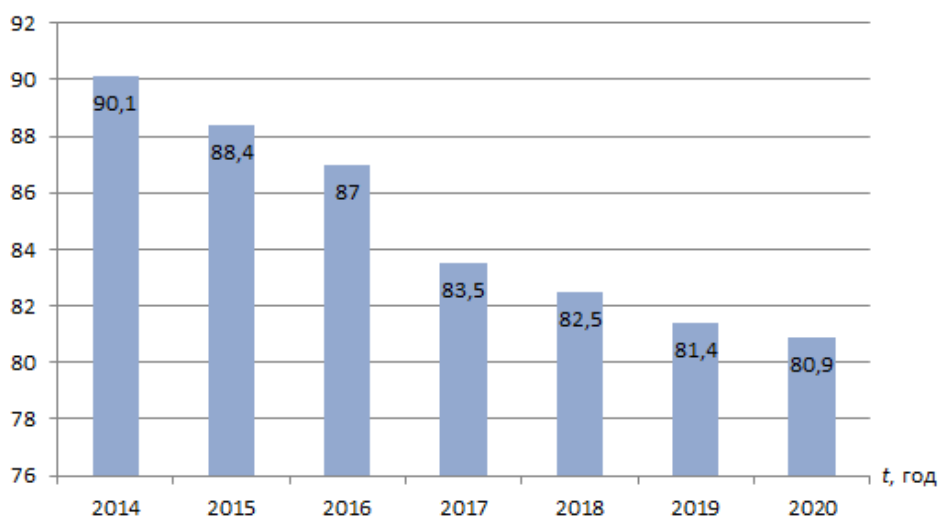
Здоровое население способно приносить большую пользу государству по нескольким причинам: первое – неограниченность выбора профессий и сфер деятельности, второе – более продолжительный трудовой стаж.

Население страны можно распределить на пять групп населения: здоровые, имеющие хронические заболевания, и инвалиды трех групп. Инвалидами считаются люди с нарушениями здоровья, они есть в каждой стране. Обязанность государства – забота о них. Структурно-динамический анализ составляющей здоровья человеческого капитала социально-экономической системы представлен в работе [16].

К началу 2020 года, по данным [17], доля инвалидов составила 8,1 % от общего населения России, или 11,876 млн человек, в том числе 5,8 % – дети-инвалиды. Ежегодно детская инвалидность растет на 18 тыс. человек. Увеличение детской инвалидности может существенно снизить уровень человеческого капитала в будущем. Общая численность инвалидов по группам инвалидности и численность инвалидов на 1000 человек населения России представлены на рис. 2, а и б соответственно.



а



б

Рис. 2. Общая численность инвалидов: а – по группам инвалидности, млн чел.; б –приходящаяся на 1000 человек населения, чел.

Определение категории влияет на трудоспособность граждан. Люди с первой группой лишены возможности самообслуживания, их трудоспособность полностью утрачена. Лица второй группы утратили возможность самообслуживания и трудоспособности лишь частично. Для третьей группы характерно самостоятельное обслуживание своих потребностей с помощью вспомогательных средств, такие люди способны заниматься трудовой деятельностью, но их диапазон профессий ограничен.

Согласно статистике по инвалидности в России [17], по состоянию на 2020 год работающих 1571 тыс. человек. Из них: первая группа – 40 тыс. человек, вторая – 525 тыс. человек, третья – 1005 тыс. человек. Общая доля работающих инвалидов составляет 13,2 %.

Вторым важным фактором, влияющим на формирование человеческого капитала, является развитие образования в стране, которое позволяет сформировать определенный запас знаний, оптимально и рационально используемый в трудовой деятельности человека. Такой, как правило, постоянно пополняемый запас знаний и умений является источником постоянного и даже увеличивающегося дохода. Анализ структуры населения по уровню образования представлен в работе [18]. На сегодняшний день достаточно востребованы специалисты как с высшим, так и со средним профессиональным образованием.

Уровень образования характеризует уровень развития общества и общественных отношений. Он является базой для развития науки и высокотехнологических отраслей, характеризует потенциал экономически активного населения как фактора производства.

На рис. 3 приведен график, построенный по данным переписи населения 2002 и 2010 гг. и микропереписи населения 2015 г. [19–21]. На данном графике показана динамика и структура грамотности населения Российской Федерации.

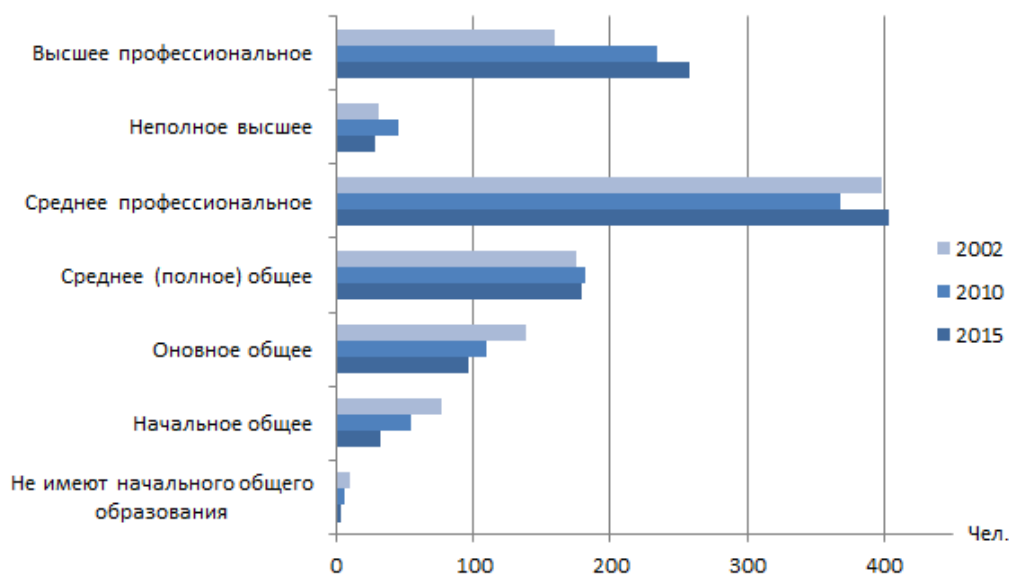


Рис. 3. Уровень образования населения РФ (в расчете на 1000 чел.)



По результатам микропереписи населения 2015 года видно, что лишь 0,003 % опрошенных граждан считаются безграмотными. Также в период с 2002 по 2015 год возросло количество людей с высшим образованием (на 61 % на 1000 человек населения) и средним профессиональным образованием (на 1,2 % на 1000 человек населения), а количество безграмотных людей сократилось втрое на 1000 человек.

Третьей составляющей, включенной в модель человеческого капитала (1) – (2), является культура. Понятие «культура» не является однозначным и под ним могут подразумеваться не только «ценностно-психологические установки человека», но также произведения искусства и совокупность учреждений культуры. Данные Федеральной службы государственной статистики представлены в таблице [22].

### Число библиотек, театров, музеев, зоопарков и цирков в России

Параметр	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018
Общедоступные библиотеки, тыс.	51,2	49,5	46,1	39	38,2	37,4	37,1
Театры	547	588	604	665	651	649	657
Музеи	2047	2285	2578	2758	2742	2742	2809
Зоопарки	20	23	29	31	31	31	32
Цирки	62	67	68	67	65	66	60

Увеличение количества музеев в последние годы положительно влияет на культурное сознание граждан. Популярность российских музеев выросла с 90 миллионов посещений в 2012 году до 155 миллионов в 2019-м [23].

Хоть и количество общедоступных библиотек в России в последние годы падает, но по данным Минкультуры РФ [24] посещаемость библиотек в 2020 году в России увеличилась на 18 %. Этот рост объясняется увеличением количества посещений электронных библиотек. Также в рамках проекта «Культура» к концу 2021 года планируется открытие более 100 библиотек в России [25].

Также уровень культурной составляющей человеческого капитала населения косвенно может описать уровень преступности в стране. Построение математических оценок культурной составляющей человеческого капитала с этой точки зрения представлено в работе [26].

Криминогенная ситуация в стране по итогам 2020 года осталась стабильной. Относительно предыдущего года число зарегистрированных преступлений увеличилось на 1 % и перешагнуло отметку в 2 млн.

За более продолжительный период в РФ отмечается снижение общего количества выявленных преступлений. Например, за последние 5 лет их массив сократился на 13,1 %, за 10 лет – на 22,2 %. В течение 5 лет последовательно снижается подростковая преступность. С 2015 года она сократилась на 39 % (61,8 тыс. до 37,8 тыс.) [27].

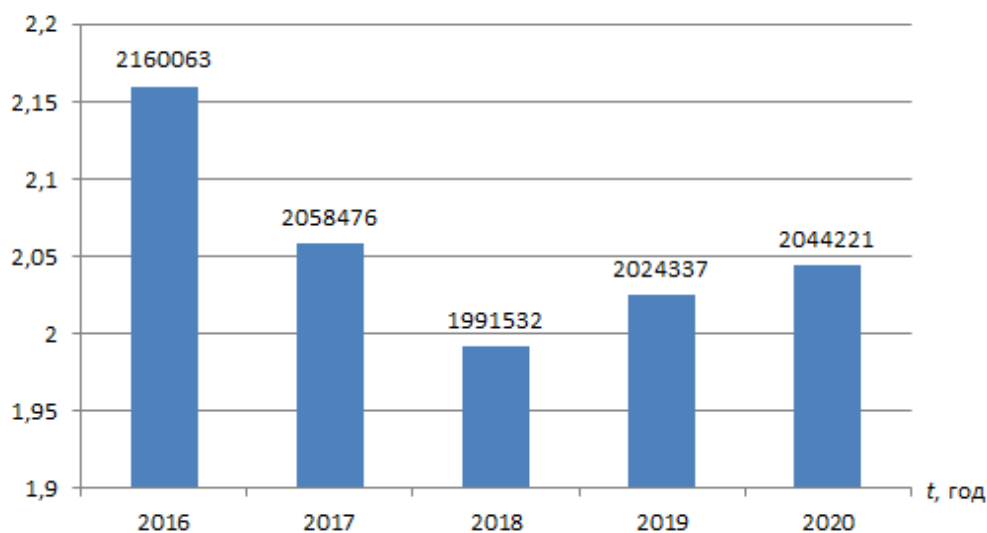


Рис. 4. Графическое представление данных о состоянии преступности в РФ

### Заключение

По предварительным статистическим построениям уровень человеческого капитала в стране растет. Образованность и культурное сознание населения с каждым годом увеличивается. Это показывают увеличивающиеся уровень образования и уровень заинтересованности граждан в культурно-просветительской деятельности, а также снижение уровня преступности в стране. К сожалению, мы не можем однозначно сказать, что и уровень составляющей здоровья растет. Сокращение общей численности инвалидов дает возможность предположить, что в дальнейшем и уровень здоровья населения будет расти, но увеличение числа детей-инвалидов существенно сокращает эти показатели в будущем. Тем не менее по двум составляющим человеческого капитала можно утверждать, что и совокупный уровень человеческого капитала в стране возрастает.

### Список использованных источников и литературы

1. Пришляк, Е. А. Исследование факторов, влияющих на формирование человеческого капитала в Российской Федерации / Е. А. Пришляк, С. Г. Радько // *Управленческие науки*. 2018. – Т. 8, № 2. – С. 94–105. – DOI: 10.26794/2404-022X-2018-8-2-94-105.
2. Becker G. S. Human Capital. N.Y.: Columbia University Press, 1964.
3. Shultz T. Human Capital // in the International Encyclopedia of the Social Sciences. Vol. 6. New York; 1968.
4. Корицкий, А. В. Кладовые капитала. Истоки и основные положения теории человеческого капитала // *Креативная экономика*. – 2007. – № 5. – С. 3–10.
5. Капелюшников, Р. И. Современные западные концепции формирования рабочей силы. – Москва : Наука, 1981.
6. Дятлов, С. А. Основы теории человеческого капитала. – Санкт-Петербург, 1994. – 83. с.
7. Марцинкевич, В. И. Экономика человека / В. И. Марцинкевич, И. В. Соболева. – Москва, 1995. – С. 14.

8. *Кетова, К. В.* Математические модели экономической динамики : монография. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2013. – 284 с.
9. *Русяк, И. Г.* Экономико-математическая модель анализа и прогноза фактора человеческого капитала / И. Г. Русяк, К. В. Кетова // Статистика и математические методы в экономике. – 2007. – № 2. – С. 56–60.
10. *Кетова, К. В.* Математическое моделирование и нейросетевое прогнозирование структуры и динамики человеческого капитала Российской Федерации / К. В. Кетова, И. Г. Русяк, Д. Д. Вавилова // Вестник Томского государственного университета. 2020. № 53. С. 13-24. DOI: 10.17223/19988605/53/2.
11. *Мазелис, Л. С.* Количественная модель оценки регионального человеческого капитала / Л. С. Мазелис, К. И. Лавренюк // Азимут научных исследований: экономика и управление. – 2017. – Т. 6, № 4 (21). – С. 167–170.
12. *Мазелис, Л. С.* Экономико-математическая модель развития человеческого капитала организации / Л. С. Мазелис, К. И. Лавренюк, Е. А. Терещенко // Азимут научных исследований: экономика и управление. – 2016. – Т. 5, № 4 (17). – С. 262–265.
13. *Кетова, К. В.* Об одной задаче макроэкономической динамики региона с учетом факторов экономического развития // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2007. – № 3. – С. 33–40.
14. *Дерендяева, Е. А.* Изучение динамики человеческого капитала для регионов РФ в соответствии с рейтингом их социально-экономического положения / Е. А. Дерендяева, К. В. Кетова // Современные проблемы науки и образования. – 2011. – № 6. – С. 224.
15. *Самутин, К. А.* Здоровье населения как составной элемент экономической политики государства // Российское предпринимательство. – 2012. – Т. 13, № 11. – С. 131–136.
16. *Кетова, К. В.* Структурно-динамический анализ составляющей здоровья человеческого капитала социально-экономической системы / К. В. Кетова, Д. Д. Вавилова // Статистика и Экономика. – 2021. – Т. 18, № 1. – С. 54–66. – DOI: 10.21686/2500-3925-2021-1-54-66.
17. Статистика России и мира – информация и показатели. Количество инвалидов в России и размер ЕДВ. – URL: <https://rosinfostat.ru/invalidity>.
18. *Кетова, К. В.* Анализ структуры населения по уровню образования / К. В. Кетова, Д. Д. Вавилова, М. С. Кузьмин // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2020. – № 6-2 (45). – С. 27–34. – DOI: 10.24411/2500-1000-2020-10692.
19. Всероссийская перепись населения 2002 года. – URL: <http://www.perepis2002.ru/index.html?id=11>.
20. Всероссийская перепись населения 2010 года. – URL: [https://www.gks.ru/free\\_doc/new\\_site/perepis2010/croc/perepis\\_itogi1612.htm](https://www.gks.ru/free_doc/new_site/perepis2010/croc/perepis_itogi1612.htm).
21. Микрперепись населения 2015 года. – URL: [https://gks.ru/free\\_doc/new\\_site/population/demo/micro-perepis/finish/micro-perepis.html](https://gks.ru/free_doc/new_site/population/demo/micro-perepis/finish/micro-perepis.html).
22. Россия в цифрах. 2020 : Крат. стат. сб. / Росстат-М., Р76. – 2020. – 550 с.
23. Культура в России 2012–2019 / Министерство культуры Российской Федерации. – 2020. – 40 с.
24. Министерство культуры Российской Федерации. – URL: <https://culture.gov.ru>.
25. Минкультуры РФ: Посещаемость библиотек в 2020 году увеличилась на 18 %. – URL: <https://news.myseldon.com/ru/news/index/251532705>.

26. *Кетова, К. В.* Построение математических оценок культурной составляющей человеческого капитала / К. В. Кетова, Д. Д. Вавилова // Интеллектуальные системы в производстве. – 2021. – Т. 19, № 1. – С. 100–111. – DOI: 10.22213/2410-9304-2021-1-100-111.

27. Состояние преступности в России // Главное управление правовой статистики и информационных технологий. – Москва, 2020. – 61 с.

## Применение машинного обучения для кластеризации регионов России по здоровью населения и экологии

*Е. И. Игонина*

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*Статья посвящена решению задач кластеризации регионов России по состоянию здоровья населения и экологии. В работе кластеризация регионов выполняется методами машинного обучения без учителя. Анализ выполняется на основе реальных статистических данных, полученных из официального издания Росстата. В ходе кластеризации были получены пять региональных кластеров по экологическому положению и два кластера по уровню здоровья населения. С помощью коэффициентов ранговой корреляции Кенделла и Спирмана установлена значимая зависимость между результатами кластеризации по здоровью населения и экологии.*

**Ключевые слова:** здоровье населения, экология, машинное обучение, кластерный анализ, ранговая корреляция.

### Введение

Для России остаются актуальными глобальные проблемы современности, поскольку она является одной из самых загрязненных стран в мире. Это не может не сказываться на жизни и здоровье населения страны (факторе человеческого капитала региона [1, 2]). Экологическая проблема связана с усиленным агрессивным воздействием человека на природу. Именно поэтому столь важно создать эффективную модель оценки экологического положения и здоровья населения в регионах, основанную на независимых статистических данных [3]. Для разработки данной модели необходимо выполнить кластеризацию регионов по данным показателям.

Задача кластеризация относится к задачам машинного обучения без учителя. Выборка объектов разбивается на непересекающиеся подмножества, называемые кластерами, так, чтобы каждый кластер состоял из схожих объектов, а объекты разных кластеров существенно отличались [4, 5].

### Набор данных для машинного обучения

Кластеризация выполнялась на наборе данных (dataset), сформированном на официальных исходных данных за 2018 год, полученных из официального издания Росстата [6].

В таблице приведены показатели, используемые в кластерном анализе. Переменные масштаба ( $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6, Y_7$ ) были приведены к удельным значениям за счет соотношения либо с численностью населения, либо с площадью территорий по регионам.

Все переменные были нормированы. Если исходный показатель оказывает положительное влияние на положение региона, то нормировка выполнялась по формуле

$$x_i^{norm} = \frac{x_i - x_i^{\min}}{x_i^{\max} - x_i^{\min}} \quad (1)$$

а если отрицательно влияние на положение региона, то по формуле:

$$x_i^{norm} = \frac{x_i^{\max} - x_i}{x_i^{\max} - x_i^{\min}} \quad (2)$$

### Показатели уровня здоровья населения и уровня экологии регионов

Группа показателей	Название показателя	Обозначение	Формула нормирования
Здоровье населения	Заболеваемость на 1000 человек населения	$X_1$	(2)
	Численность населения на одну больничную койку	$X_2$	(1)
	Некоторые инфекционные и паразитарные болезни на 1000 человек населения	$X_3$	(2)
	Новообразования на 1000 человек населения	$X_4$	(2)
	Болезни крови, кроветворных органов и отдельные нарушения, вовлекающие иммунный механизм на 1000 человек населения	$X_5$	(2)
	Болезни эндокринной системы, расстройства питания и нарушения обмена веществ на 1000 человек населения	$X_6$	(2)
	Болезни нервной системы на 1000 человек населения	$X_7$	(2)
	Болезни глаза и его придаточного аппарата на 1000 человек населения	$X_8$	(2)
	Болезни уха и сосцевидного отростка на 1000 человек населения	$X_9$	(2)
	Болезни системы кровообращения на 1000 человек населения	$X_{10}$	(2)
	Болезни органов дыхания на 1000 человек населения	$X_{11}$	(2)
	Болезни органов пищеварения на 1000 человек населения	$X_{12}$	(2)
	Болезни кожи и подкожной клетчатки на 1000 человек населения	$X_{13}$	(2)
	Болезни костно-мышечной системы и соединительной ткани на 1000 человек населения	$X_{14}$	(2)

Группа показателей	Название показателя	Обозначение	Формула нормирования
	Болезни мочеполовой системы на 1000 человек населения	$X_{15}$	(2)
	Врожденные аномалии (пороки развития), деформации и хромосомные нарушения на 1000 человек населения	$X_{16}$	(2)
	Травмы, отравления и некоторые другие последствия внешних причин на 1000 человек населения	$X_{17}$	(2)
Экологическая чистота	Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух, отходящих от стационарных источников (тысяч тонн)	$Y_1$	(2)
	Улавливание загрязняющих атмосферу веществ, отходящих от стационарных источников (тысяч тонн)	$Y_2$	(2)
	Сброс загрязненных сточных вод в поверхностные водные объекты (миллионов кубических метров)	$Y_3$	(2)
	Число лесных пожаров	$Y_4$	(2)
	Площадь лесных земель, пройденная пожарами, га	$Y_5$	(2)
	Использование свежей воды, миллионов $m^3$	$Y_6$	(1)
	Объем оборотной и последовательной используемой воды, миллионов $m^3$	$Y_7$	(1)
	Плотность автомобильных дорог общего пользования с твердым покрытием, км путей на 1000 $km^2$ территории	$Y_8$	(2)
	Доля уловленных и обезвреженных загрязняющих атмосферу веществ в общем количестве отходящих загрязняющих веществ от стационарных, %	$Y_9$	(1)

### Реализация алгоритмов машинного обучения для решения задачи кластеризации

Кластеризация регионов выполнялась дважды по двум отдельным группам показателей согласно таблице. Для кластеризации использовались методы KMeans и Hierarchical clustering [7–10]. На рис. 1 и 2 приведены дендрограммы, построенные в результате кластеризации регионов по различным наборам показателей.

Из рис. 1 видно, что ярко выражены два кластера регионов по здоровью населения.

Из рис. 2 видно, что целесообразно выделить 5 региональных кластеров по экологической чистоте.

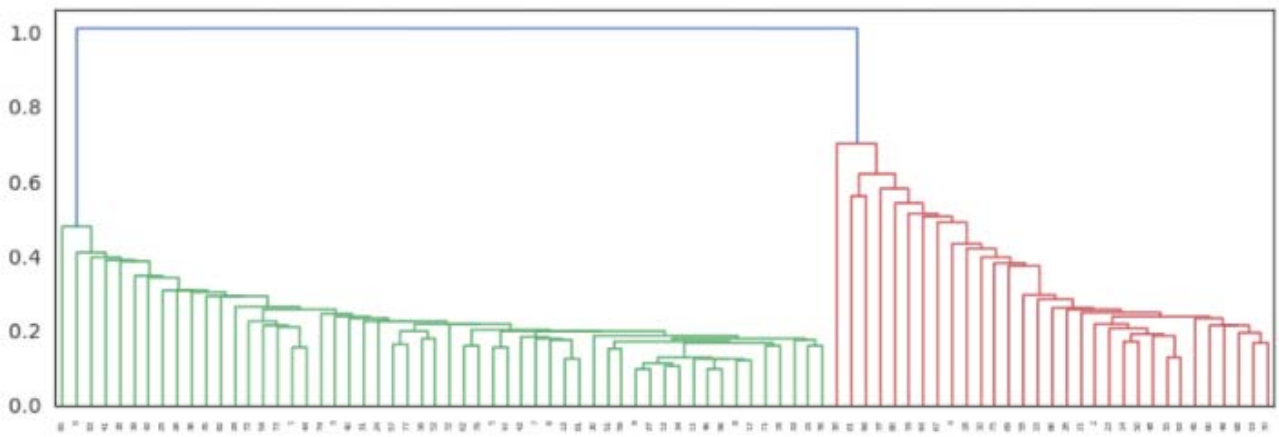


Рис. 1. Дендрограмма иерархической кластеризации регионов по здоровью населения

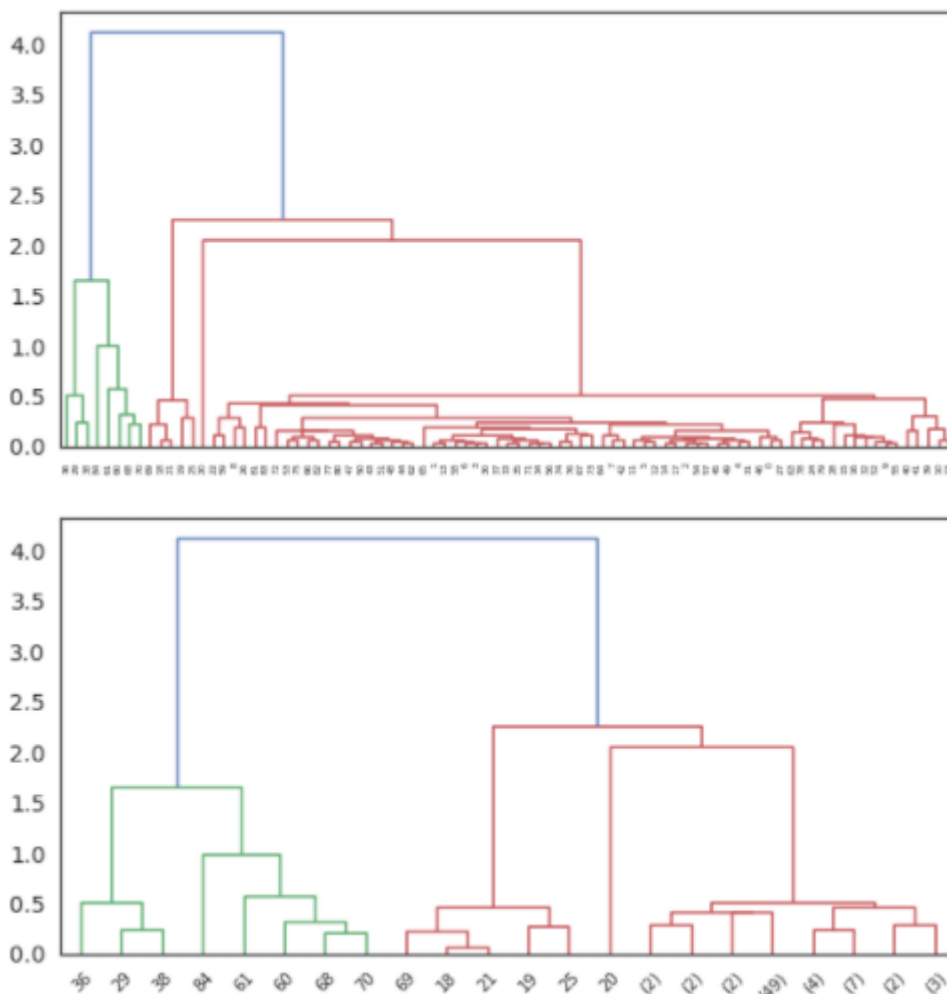


Рис. 2. Дендрограмма иерархической кластеризации регионов по экологической чистоте

На рис. 3 приведены для примера совместные распределения трех переменных, характеризующих здоровье населения в соответствии с полученными кластерами.

Из рис. 3 видно, что распределения переменных отличаются в зависимости от кластера, что подтверждает эффективность полученной кластеризации.



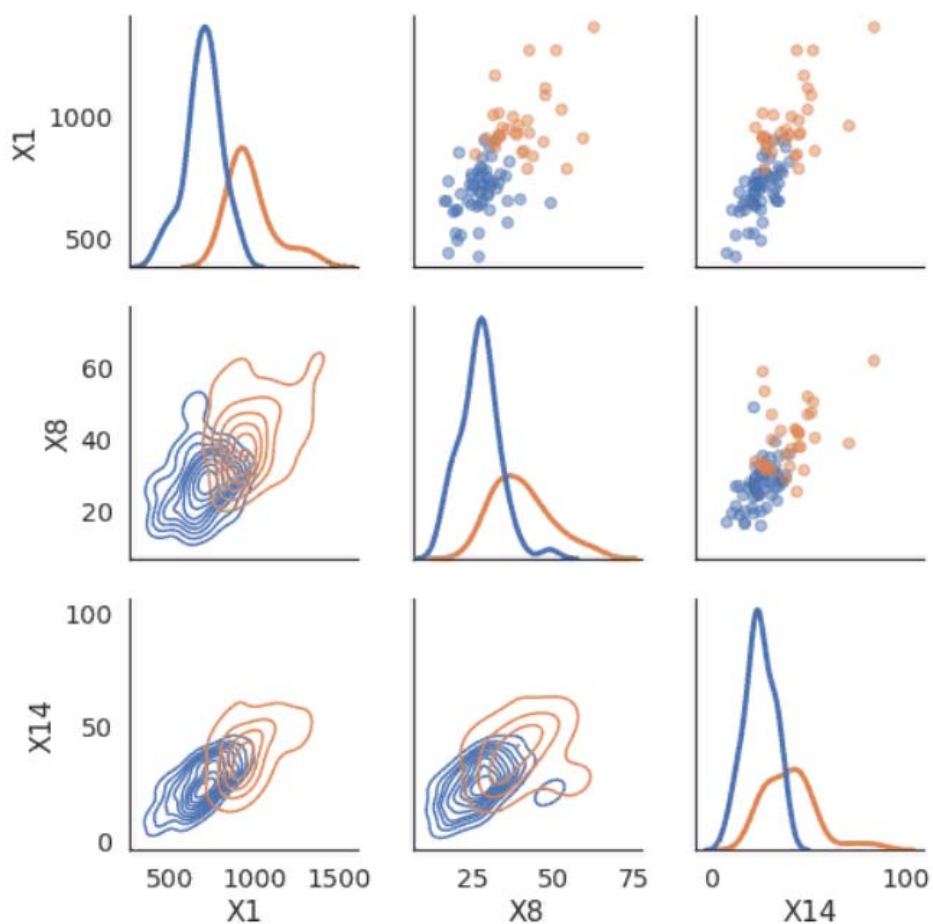


Рис. 3. Совместное распределение показателей здоровья населения в каждом из кластеров

На рис. 4, 5 представлены цветограммы Российской Федерации, закрашенные согласно полученным региональным кластерам по здоровью и экологии.



Рис. 4. Цветограмма Российской Федерации по здоровью населения



Рис. 5. Цветограмма Российской Федерации по экологии

### **Ранговая корреляция между региональными кластерами по экологии и здоровью**

Для выявления зависимости между результатами кластеризации по экологии и здоровью оценена ранговая корреляция.

Коэффициент Спирмена (с помощью функции `scipy.stats.spearmanr` [11]):

$$\rho = 1 - \frac{6}{n(n-1)(n+1)} \sum_{i=1}^n (H_i - E_i) = 0.324 \text{ (pvalue} = 0,00248),$$

где  $H_i$  – номер кластера согласно кластеризации по здоровью,  $E_i$  – номер кластера согласно кластеризации по экологии.

Коэффициент Кенделла (с помощью функции `scipy.stats.kendalltau` [12]):

$$\tau = \frac{P - Q}{\sqrt{(P + Q + T)(P + Q + U)}} = 0.315 \text{ (pvalue} = 0,00298),$$

где  $P$  – количество согласованных пар;  $Q$  – количество несогласованных пар;  $T$  – количество связей только в  $H$ ;  $U$  – количество связей только в  $E$ .

Следовательно, между кластерами по здоровью и экологии есть значимая ранговая корреляция.

### **Заключение**

С помощью методов машинного обучения выполнена кластеризация регионов по экологии и здоровью, в результате которой выявлено 5 и 2 кластеров, соответственно. Из данных ранговой корреляции видно, что уровень здоровья зависит от экологической ситуации в регионе.

## Список использованных источников и литературы

1. *Vavilova D. D., Ketova K. V., Kasatkina E. V.* Application of genetic algorithm for adjusting the structure of multilayered neural network for prediction of investment processes. Технические университеты: интеграция с европейскими и мировыми системами образования. Материалы VIII Международной конференции. 2019. С. 223-233.
2. *Насридинова, Д. Д.* Построение и анализ производственной функции экономической системы Удмуртской Республики / Д. Д. Насридинова, Е. В. Касаткина // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке. – 2013. – С. 706–710.
3. *Лавриненко, П. А.* Сравнительный анализ региональных различий в сферах здоровья населения, экологии и здравоохранения / П. А. Лавриненко, Д. А. Рыбакова // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2015. – №5 (41).
4. *Кетова, К. В.* Применение кластерного анализа для решения задачи оптимального распределения топливно-энергетических ресурсов / К. В. Кетова, Р. Ю. Кривенков, Е. В. Трушкова // Интеллектуальные системы в производстве. – 2010. – № 2 (16). – С. 207–213.
5. *Кетова, К. В.* Решение логистической задачи топливоснабжения распределенной региональной системы теплоснабжения / К. В. Кетова, Е. В. Трушкова // Компьютерные исследования и моделирование. – 2012. – Т. 4, № 2. – С. 451–470.
6. Федеральная служба государственной статистики. Регионы России. Социально-экономические показатели. – URL: [https://gks.ru/bgd/regl/b20\\_14p/Main.htm](https://gks.ru/bgd/regl/b20_14p/Main.htm) (дата обращения: 22.05.2021).
7. Машинное обучение на Python / Clustering. – URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/clustering.html#clustering> (дата обращения: 22.05.2021).
8. *Касаткина, Е. В.* Статистическое исследование дорожно-транспортной обстановки в Удмуртской Республике // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2017. Т. 20. № 1. С. 53–59.
9. *Мичкова, А. С.* Дифференциация регионов Приволжского федерального округа методами кластерного анализа / А. С. Мичкова, Е. В. Касаткина // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке : сборник материалов III Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием: электронное научное издание. – 2015. – С. 485–489.
10. *Касаткина, Е. В.* Классификация субъектов по показателям экономической преступности / Е. В. Касаткина, А. П. Соболев // Социально-экономическое управление: теория и практика. – 2016. – № 2 (29). – С. 50–54.
11. Библиотека SciPy для Python / `scipy.stats.spearmanr`. – URL: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.spearmanr> (дата обращения: 22.05.2021).
12. Библиотека SciPy для Python / `scipy.stats.kendalltau`. – URL: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.kendalltau.html> (Дата обращения: 22.05.2021).

## **Продуктовая аналитика работы многофункционального центра предоставления государственных и муниципальных услуг**

*Е. В. Касаткина*

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*В работе представлены результаты Data анализа работы одного из многофункциональных центров предоставления государственных и муниципальных услуг Удмуртской Республики. Выполнена продуктовая аналитика работы в виде FMR-XYZ анализа показателей работы МФЦ и выявлены 9 категорий услуг исходя из их спроса и его устойчивости. На основе результатов продуктовой аналитики выполнен прогноз услуг каждой категории с применением различных моделей временных рядов: трендовые модели, тренд-сезонные модели и модели стационарных временных рядов.*

**Ключевые слова:** многофункциональный центр, анализ данных, машинное обучение, прогнозирование, продуктовый анализ, FMR-XYZ-анализ, временные ряды.

### **Введение**

В условиях развития информационного общества на новый уровень поднимается государственное управление, которое использует знания, опыт и информацию как основные средства решения общественных проблем [1, 2]. Цифровая трансформация является источником успеха работы государственного учреждения.

Под многофункциональным центром (МФЦ) понимается единое место приема, регистрации и выдачи необходимых документов гражданам и юридическим лицам при предоставлении государственных и муниципальных услуг.

Целью исследования является Data-анализ и прогнозирование работы многофункциональных центров предоставления государственных и муниципальных услуг Удмуртской Республики (УР) с применением методов продуктовой аналитики и машинного обучения на примере МФЦ Первомайского района города Ижевска. Актуальность определяется недостаточной пропускной способностью на предварительную запись к услугам МФЦ центров через портал РПГУ [3] (региональный портал государственных и муниципальных услуг) УР, приводящей к излишнему времени ожидания подачи электронной заявки на оказание услуги.

В работе использовались статистические данные, представленные в открытом доступе на сайте МФЦ УР [4] в отчетах о деятельности МФЦ за 2017–2020 годы.

## FMR-анализ показателей работы МФЦ

FMR (Fastest Medium Rare – быстро, средне, медленно) – анализ услуг по частоте обращений. Характеризуется коэффициентом частоты обращений и вычисляется по следующей формуле:

$$K_i = \frac{n_i}{\sum_j^m n_j} \cdot 100 \%,$$

где  $n_i$  – количество предоставлений  $i$ -й услуги за период исследования,  $\sum_j^m n_j$  – общее количество предоставленных услуг;  $m$  – количество услуг оказываемых данным МФЦ.

По частоте обращений услуги разбиваются на три группы, используя закон Парето:

- категория F – наиболее часто запрашиваемые услуги (80 % от общего количества);
- категория M – менее часто запрашиваемая категория услуг (15 % от обращений);
- категория R – редко запрашиваемая услуга (оставшиеся 5 %).

В применении этого закона данная классификация математически схожа с ABC-анализом при использовании в качестве критерия частоты операций с услугами (стандартно в «ABC» анализируется стоимость) [5].

FMR-анализ данных о работе МФЦ Первомайского района [4] за период 2017–2020 гг. показал, что из всех предоставляемых данных МФЦ услуг 80 % составляют 8 основных услуг, приведенных в табл. 1 (без учета услуги «Выдача результатов предоставляемых услуг»).

Таблица 1. FMR-анализ работы МФЦ

Наименование услуги	Количество предоставленных услуг	Доля услуги в работе МФЦ, %	Категория
Государственный кадастровый учет недвижимого имущества и государственная регистрация прав на недвижимое имущество	40223	40,91	<b>F</b>
Предоставление сведений, содержащихся в ЕГРН	15673	15,94	<b>F</b>
Регистрационный учет граждан РФ по месту пребывания и по месту жительства в пределах РФ	10567	10,75	<b>F</b>
Выдача и замена паспортов гражданина РФ	2903	2,95	<b>F</b>
Осуществление миграционного учета иностранных граждан и лиц без гражданства в Российской Федерации	2801	2,85	<b>F</b>

Окончание табл. 1

Наименование услуги	Количество предоставленных услуг	Доля услуги в работе МФЦ, %	Категория
Выдача справок о наличии (отсутствии) судимости	2384	2,42%	<b>F</b>
Назначение и выплата пособия на ребенка	2366	2,41	<b>F</b>
Предоставление гражданам субсидий на оплату жилого помещения и коммунальных услуг в беззаявительном порядке	1258	1,28	<b>F</b>
Остальные услуги	20139	20,48	<b>M, R</b>
<b>Всего</b>	<b>98314</b>	<b>100,00</b>	

Из табл. 1 видно, что 41 % всех оказанных услуг составляет «Государственный кадастровый учет недвижимого имущества и государственная регистрация прав на недвижимое имущество».

На рис. 1 представлена кривая Парето и кумулятивная кривая, из которой видно, что 80 % все работы МФЦ составляют 5 % услуг, а 95 % – 22 % услуг.

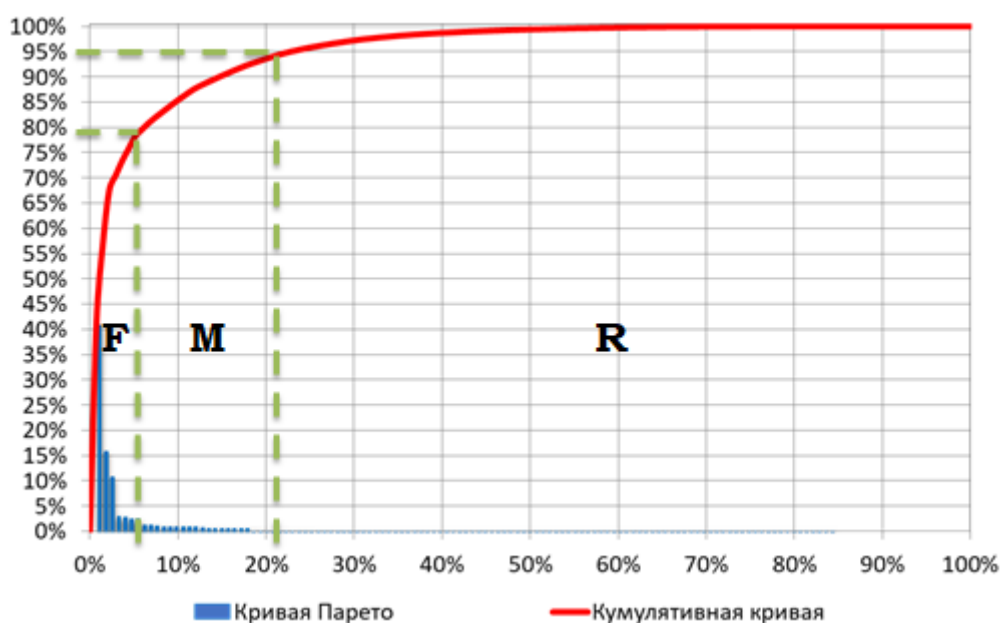


Рис. 1. Кривая Парето

Согласно принципу Парето для более глубокого анализа работы МФЦ центра достаточно эффективно проработать оказание 8 выделенных услуг (5 % из всех услуг МФЦ) для получения значительной часть от планируемого результата в ходе оптимизации работы МФЦ.

### XYZ-анализ показателей работы МФЦ

XYZ-анализ – анализ, который позволяет произвести классификацию услуг в зависимости от характера их потребления и точности прогнозирования

изменений в их потребности в течение определенного временного цикла. В анализе используется коэффициент вариации:

$$V_i = \frac{\sigma_{x_i}}{\bar{x}_i} 100 \%,$$

где  $\sigma_{x_i}$  – среднеквадратичное отклонение  $i$ -й услуги;  $\bar{x}_i$  – среднее арифметическая частота оказания  $i$ -й услуги за период.

Категория X – услуги характеризуются стабильной величиной востребованности, незначительными колебаниями и высокой точностью прогноза.

Категория Y – услуги характеризуются известными тенденциями определения потребности в них (например, сезонными колебаниями) и средними возможностями их прогнозирования.

Категория Z – востребованность услуги нерегулярна, какие-либо тенденции отсутствуют, точность прогнозирования невысокая.

Для выявления категорий X, Y, Z строится график коэффициентов вариации упорядоченных по возрастанию (см. рис. 2).

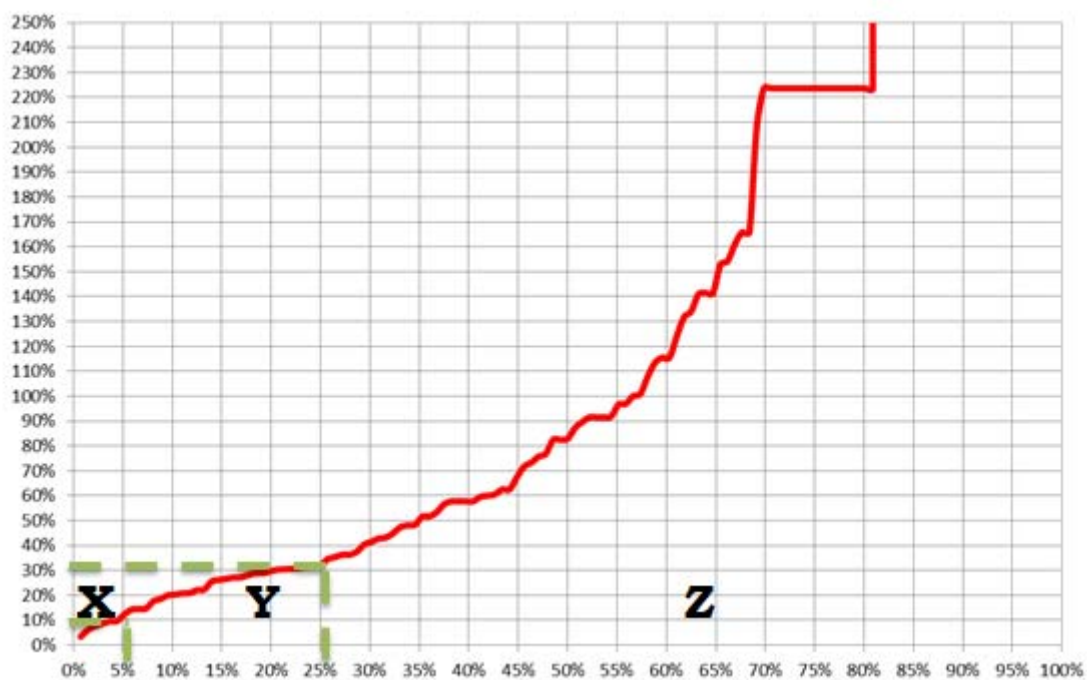


Рис. 2. Коэффициенты вариации

Из рис. 2 видно, что целесообразно разбить услуги на категории согласно эвристическому правилу: категория X при  $V < 10 \%$ , категория Y при  $V < 32 \%$ , категория Z при  $V \geq 32 \%$ .

Результат XYZ анализ данных МФЦ Первомайского района за период с второе полугодие 2020 года представлен в табл. 2.

Наиболее стабильная в запросе граждан услуга «Регистрационный учет граждан Российской Федерации по месту пребывания и по месту жительства в пределах Российской Федерации».

Таблица 2. XYZ – анализ работы МФЦ

Наименование услуги	Коэффициент вариации, %	Доля услуги в работе МФЦ
Регистрационный учет граждан РФ по месту пребывания и по месту жительства в пределах Российской Федерации	3,38	X
Информирование граждан об отнесении к категории граждан предпенсионного возраста	6,15	X
Предоставление сведений, содержащихся в ЕГРН	7,68	X
Прием от граждан анкет в целях регистрации в системе обязательного пенсионного страхования	8,59	X
Выплата страховых пенсий, накопительной пенсии и пенсий по государственному пенсионному обеспечению	9,54	X
Выдача и замена паспортов гражданина РФ, удостоверяющего личность гражданина РФ на территории РФ	9,64	X
Остальные услуги	Более 10	Y, Z

### FMR-XYZ-анализ показателей работы МФЦ

Сочетание FMR- и XYZ-анализов выявляет безусловных лидеров услуг (группа FX) и аутсайдеров (RZ). Оба метода хорошо дополняют друг друга. Всего при проведении такого многомерного совмещенного анализа получается 9 категорий услуг. Результаты такого анализа можно использовать для оптимизации работы МФЦ и прогнозирования востребованности услуг.

Использование совмещенных FMR- и XYZ-анализов имеет ряд значительных преимуществ:

- повышение эффективности системы управления;
- выявление ключевых услуг и причин, влияющих на общую динамику востребованности услуг МФЦ;
- перераспределение усилий персонала в зависимости от квалификации и имеющегося опыта.

Результаты объединения результатов FMR и XYZ анализов представлены в табл. 3.

### Прогнозирование спроса на услуги МФЦ

Услуги категории FX отличает высокая, стабильная и хорошо прогнозируемая востребованность у клиентов МФЦ. Необходимо обеспечить постоянное наличие достаточного количества менеджеров, оказывающих услуги данной категории. Поскольку спрос на данные услуги имеет устойчивую динамику, то для прогнозирования могут использоваться трендовые модели. На рис. 3 приведен пример прогнозирования одной услуг из категории FX.

Услуги категории FY отличает средняя и, как правило, сезонная востребованность у клиентов МФЦ. Для прогнозирования спроса на данные услуги подходят тренд-сезонные модели. На рис. 4 приведены примеры прогнозирования услуги из категории FY.



Таблица 3. Категории услуг МФЦ Первомайского района УР

FX (3 услуги)	FY (3 услуги)	FZ (2 услуги)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Регистрационный учет граждан РФ по месту пребывания и по месту жительства в пределах РФ</li> <li>• Предоставление сведений, содержащихся в ЕГРН</li> <li>• Выдача и замена паспортов гражданина РФ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Осуществление миграционного учета иностранных граждан и лиц без гражданства в РФ</li> <li>• Выдача справок о наличии (отсутствии) судимости</li> <li>• Назначение и выплата пособия на ребенка</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Государственный кадастровый учет недвижимого имущества и государственная регистрация прав на недвижимое имущество</li> <li>• Предоставление гражданам субсидий на оплату жилого помещения и коммунальных услуг в беззаявительном порядке</li> </ul>
<b>MX</b> (1 услуга)	<b>MY</b> (15 услуг)	<b>MZ</b> (7 услуг)
<b>RX</b> (2 услуги)	<b>RY</b> (26 услуг)	<b>RZ</b> (77 услуг)

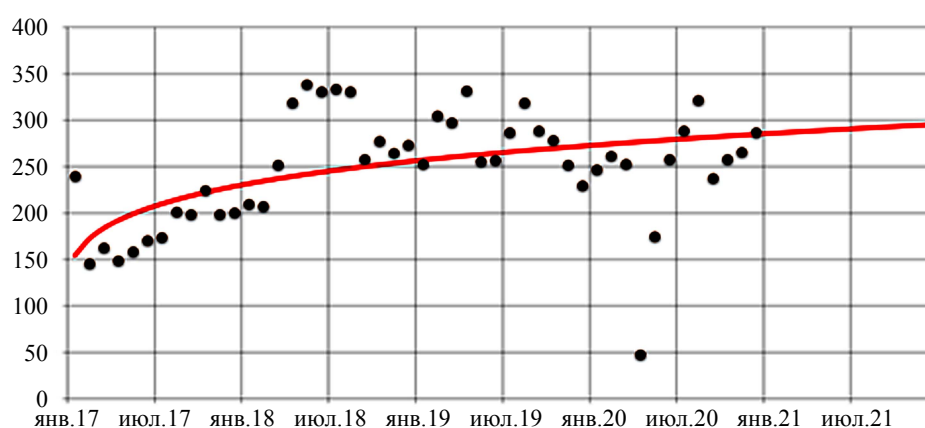


Рис. 3. Прогнозирование спроса на услугу «Выдача и замена паспортов гражданина РФ»

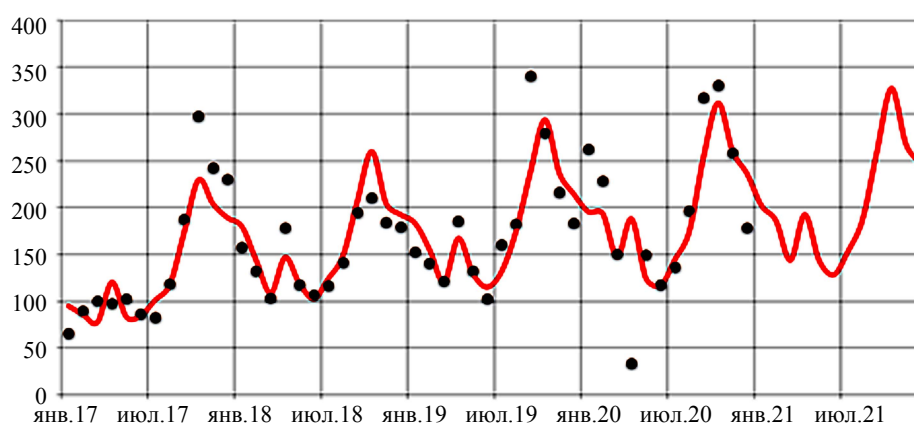


Рис. 4. Прогнозирование спроса на услугу «Назначение и выплата пособия на ребенка»

Услуги категории FZ при высоком спросе отличаются низкой прогнозируемостью, поэтому они, как правило, имеют стационарную динамику и для их прогнозирования подбираются модели временных рядов класса ARMA, ARIMA, SARIMA (см. рис. 5).

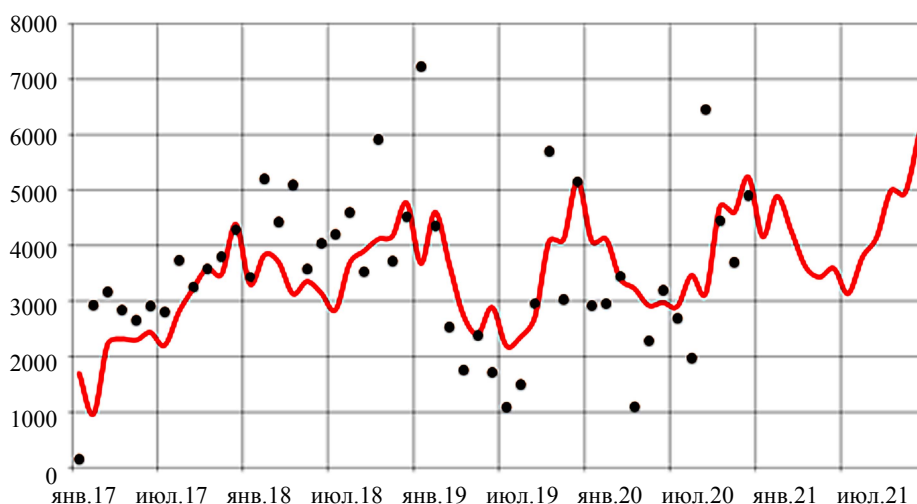


Рис. 5. Прогнозирование спроса на услугу «Государственный кадастровый учет недвижимого имущества и государственная регистрация прав на недвижимое имущество»

### Заключение

В ходе продуктовой аналитики (FMR-XYZ анализа) выделены девять категорий услуг, оказываемых многофункциональным центром предоставления государственных и муниципальных услуг.

К каждой категории услуг предложена методика прогноза на основе использования различных моделей временных рядов. Данные прогнозы выполнены для примера на услугах, характеризующихся высокой востребованностью у населения (услуги категории F).

Предложенная методика предпрогнозного и прогнозного анализа может быть тиражирована для любого МФЦ и использоваться при разработке управленческих решений по оптимизации работы многофункциональных центров.

### Список использованных источников и литературы

1. Губанова, Н. В. Перспективы оптимизации предоставления муниципальных и государственных услуг населению на базе МФЦ / Н. В. Губанова, И. Л. Димитров // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. – 2015. – № 8.
2. Котельников, С. С. Государственное и муниципальное управление в России: исторический анализ, новые тенденции в организации управления на современном этапе / С. С. Котельников // Общетеоретические и отраслевые проблемы науки и пути их решения. – Калуга: Агентство международных исследований, 2019. – С. 232–235.
3. Государственные услуги Удмуртской Республики. – URL: <https://uslugi.udmurt.ru> (дата обращения: 01.05.2021).
4. Автономное учреждение «Многофункциональный центр предоставления государственных и муниципальных услуг Удмуртской Республики» / Отчетность и государственные задания. – URL: [https://mfcur.ru/about/documents/document-7154/?sphrase\\_id=180937](https://mfcur.ru/about/documents/document-7154/?sphrase_id=180937) (дата обращения: 01.05.2021).
5. Конигов, А. И. Исследование с помощью abc-xyz-fmr-ven анализа рынка программных продуктов / А. И. Конигов, Т. В. Кузнецова, Г. А. Конигов // Научные труды Вольного экономического общества России. – 2014.

## Математическое и компьютерное моделирование движения транспортных потоков в городской среде

М. А. Кудрина, Д. Г. Нефедов

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*В работе приводится имитационная модель движения транспортных потоков в условиях светофорного регулирования. В качестве примера рассматривается система перекрестков г. Ижевска. Средствами математического моделирования определены зависимости количества автомобилей в системе от времени, выработан вариант оптимизации работы светофора с использованием системы AnyLogic. Для трехмерного моделирования использована система визуализации Unity 3D.*

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, математическое моделирование транспортных потоков, система перекрестков, светофорное регулирование, очередь.

В настоящее время загруженность автомобильных дорог для многих крупных городов остается одной из главных проблем, требующих немедленного решения. Так, например, за последние пятнадцать лет в России более чем в два раза увеличилось количество автомобилей на тысячу человек [1]. Такой рост количества автомобилей влияет не только на увеличение очередей на дорогах, но и пагубно влияет на окружающую среду.

Организация городских пассажирских перевозок является одной из серьезных проблем, решение которой обеспечивает жизнедеятельность современных городов. Поэтому вопросы внутригородских пассажирских перевозок затрагивают интересы подавляющего большинства населения. Постоянный рост уровня автомобилизации и несоответствующее этому росту развитие улично-дорожной сети, методов организации движения и систем управления приводит к возникновению сложных транспортных проблем. Эффективность функционирования городской транспортной системы во многом определяется режимами светофорного регулирования на перекрестках[2].

Рассмотрим математическую модель движения транспортных потоков на многополосном регулируемом перекрестке, который основывается на использовании теории систем массового обслуживания с изменяющейся интенсивностью обслуживания. Такой подход предложен и изучен в публикациях. Считается, что в период, когда проезд запрещен, интенсивность обслуживания равна нулю. Числом обслуживающих каналов  $m$  будет количество полос для проезда перекрестка в одну сторону[3].

Для расчета характеристик системы перекрестков, когда транспортные средства движутся в одном направлении вдоль одной полосы движения, можно

использовать одноканальную модель системы массового обслуживания с ограниченной очередью [4].

Пусть  $T$  – полный цикл светофора, где зеленая фаза составляет половину длины цикла  $\tau = \frac{T}{2}$ . Интенсивность обслуживания потока автомобилей  $\mu_{ij}(t)$  можно задать функцией с периодом  $T$ :

$$\mu_{ij}(t) = \begin{cases} 0, & \left( t - \left[ \frac{t}{T_i} \right] T_i \right) \geq \tau_{ij}, \\ \mu_0, & \left( t - \left[ \frac{t}{T_i} \right] T_i \right) < \tau_{ij}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\left[ \frac{t}{T} \right]$  – целая часть числа;  $\mu_0(t)$  – интенсивность проезда перекрестка, когда горит зеленый сигнал светофора.

Для моделирования транспортного потока нам необходимо рассчитать интенсивность входного потока автомобилей по следующей формуле:

$$\lambda_{ij}(t) = \beta_{ij} \lambda_0(t), \quad (2)$$

$$\lambda_{ij}(t) = \sigma_{lk}(t - \Delta t_{i-l}), \quad (3)$$

где в формуле (2) рассчитывается интенсивность входящего потока с использованием базовой интенсивности и коэффициента изменения базовой интенсивности, а по формуле (3) можно рассчитать интенсивность входящего потока внутри системы с использованием выходящего потока и среднего времени проезда между светофорами[5].

Чтобы рассчитать среднее проезда между перекрестками воспользуемся формулой

$$\Delta t_{i-l}(t) = \frac{L_{i-l}}{V_{i-l}}. \quad (4)$$

Для моделирования выходящего потока для системы перекрестков будем использовать следующую формулу:

$$\sigma_{ik}(t) = \sum_{j=1}^m (p_{ij \rightarrow ik} \cdot \mu_{ij}(t)). \quad (5)$$

Используя все вышеперечисленные характеристики и формулы, смоделируем поток машин в системе:

$$N_{ij}(t) = \begin{cases} 0, & N_{ij}(t-1) + \lambda_{ij}(t) - \mu_{ij}(t) \leq 0, \\ N_{ij}(t-1) + \lambda_{ij}(t) - \mu_{ij}(t), & \text{иначе.} \end{cases} \quad (6)$$

Данная формула позволяет рассчитать количество автомобилей для каждой полосы в системе.

Рассмотрим работу участка дороги, состоящего из девяти взаимосвязанных перекрестков в г. Ижевске, представленного на рис. 1.

С помощью вышеперечисленных формул были рассчитаны необходимые параметры и построен график очередей на дорогах. На рис. 2 представлен перекресток № 2 со стороны 5, для которого запишем систему выходящего потока и покажем фазы работы светофора (рис. 3).

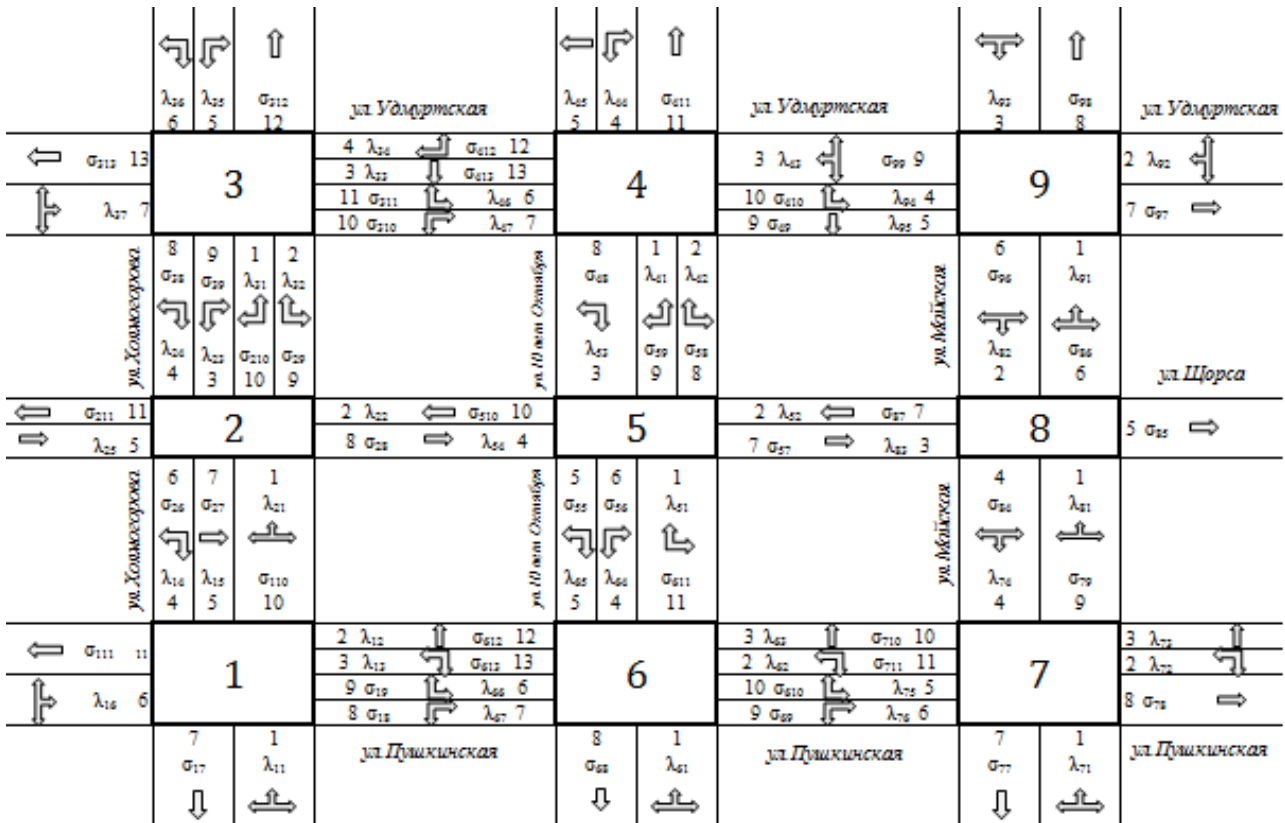


Рис. 1. Сеть перекрестков в г. Ижевске

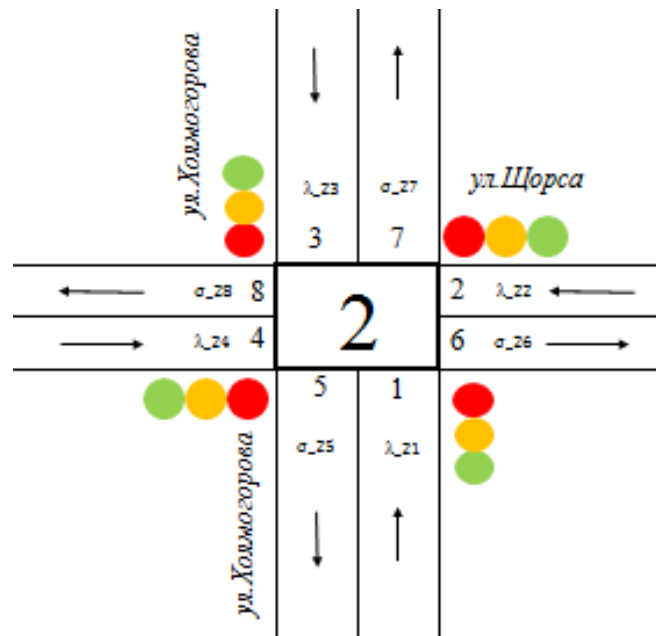


Рис. 2. Рассматриваемый перекресток

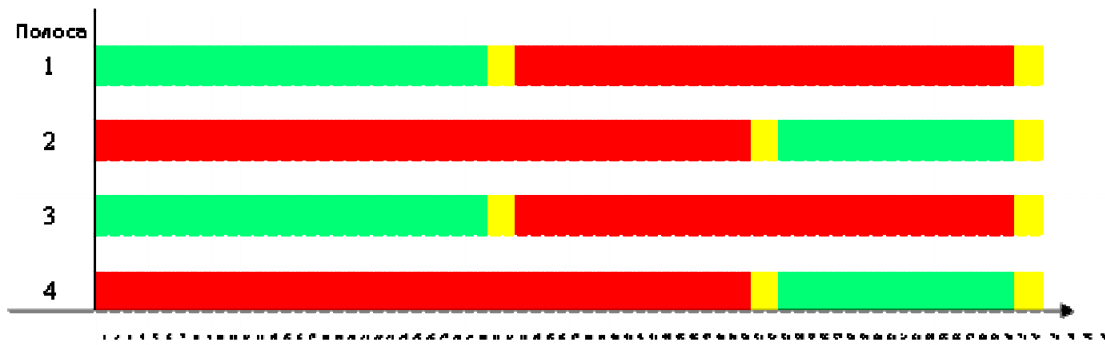


Рис. 3. Фазы светофоров на перекрестке улиц Холмогорова и Щорса

Для данного перекрестка запишем систему выходящего потока

$$\begin{cases} \sigma_{2.5} = \mu_{2.2}p_{2.2 \rightarrow 2.5} + \mu_{2.3}p_{2.3 \rightarrow 2.5} + \mu_{2.4}p_{2.4 \rightarrow 2.5}, \\ \sigma_{2.6} = \mu_{2.1}p_{2.1 \rightarrow 2.6} + \mu_{2.3}p_{2.3 \rightarrow 2.6} + \mu_{2.4}p_{2.4 \rightarrow 2.6}, \\ \sigma_{2.7} = \mu_{2.1}p_{2.1 \rightarrow 2.7} + \mu_{2.2}p_{2.2 \rightarrow 2.7} + \mu_{2.4}p_{2.4 \rightarrow 2.7}, \\ \sigma_{2.8} = \mu_{2.1}p_{2.1 \rightarrow 2.8} + \mu_{2.2}p_{2.2 \rightarrow 2.8} + \mu_{2.3}p_{2.3 \rightarrow 2.8}, \end{cases} \quad (7)$$

где

$$\sum_{i=5}^8 p_{2.1 \rightarrow 2.i} = 1, \quad \sum_{i=5}^8 p_{2.2 \rightarrow 2.i} = 1, \quad \sum_{i=5}^8 p_{2.3 \rightarrow 2.i} = 1, \quad \sum_{i=5}^8 p_{2.4 \rightarrow 2.i} = 1.$$

На рис. 4 можно увидеть, что ближе к 8.30 достигается пик максимальной очереди около 9 машин в системе, которая ближе к 9.00 начинает снижаться.

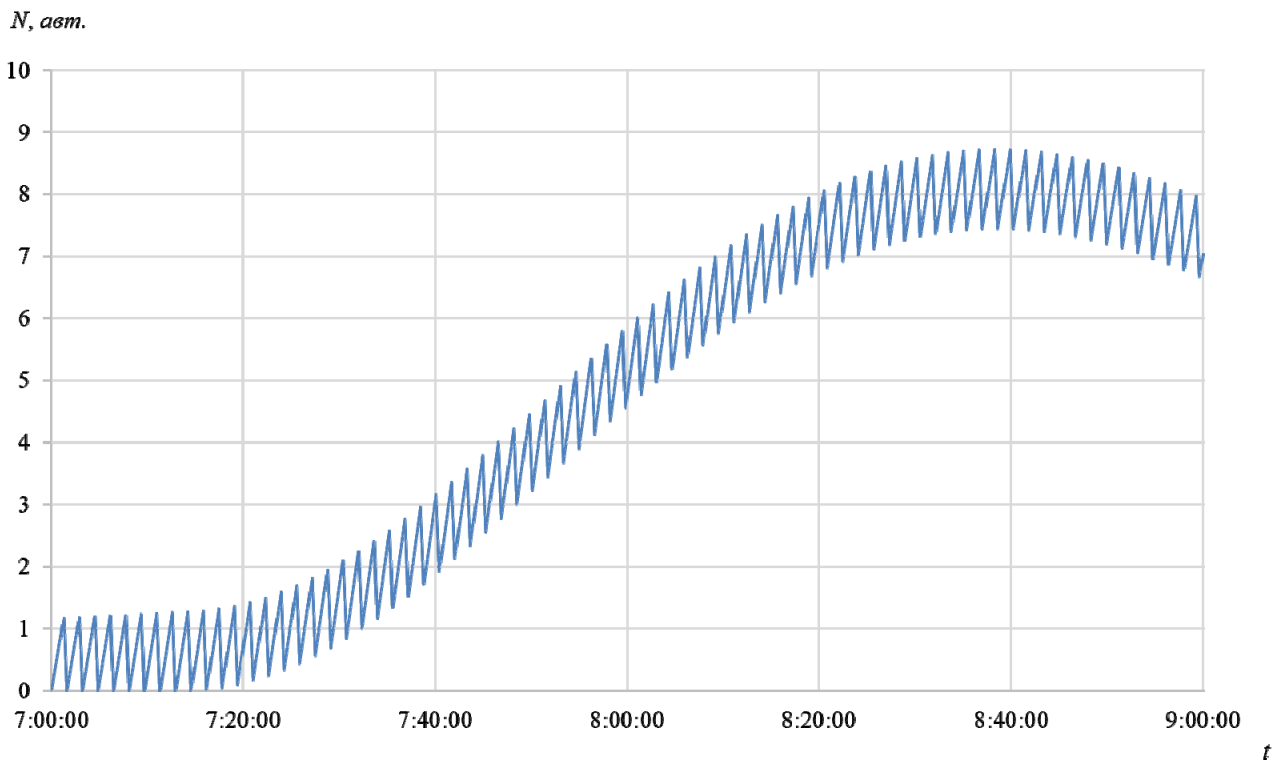


Рис. 4. Длина очереди на перекрестке № 2 со стороны 5

Для оптимизации работы светофора с целью уменьшения дорожных заторов воспользуемся программой AnyLogic. Чтобы оптимизировать модель, необходимо:

1. Создать оптимизационный эксперимент.
2. Задать целевой функционал (функцию, которую нужно минимизировать или максимизировать).
3. Задать оптимизационные параметры (параметры, значения которых будут меняться).
4. Задать ограничения, которые будут наложены на значения параметров и переменных (опционально).
5. Задать условия остановки прогона.
6. Задать условия остановки оптимизации.
7. Запустить оптимизационный эксперимент на комплексе Anylogic.

После оптимизационного эксперимента были получены следующие результаты: длина очереди на перекрестке № 2 со стороны 5 уменьшилась до 5 машин.

Визуализируем рассмотренный перекресток в программном продукте Unity 3D. На рис. 5 представлен скриншот системы до оптимизации.

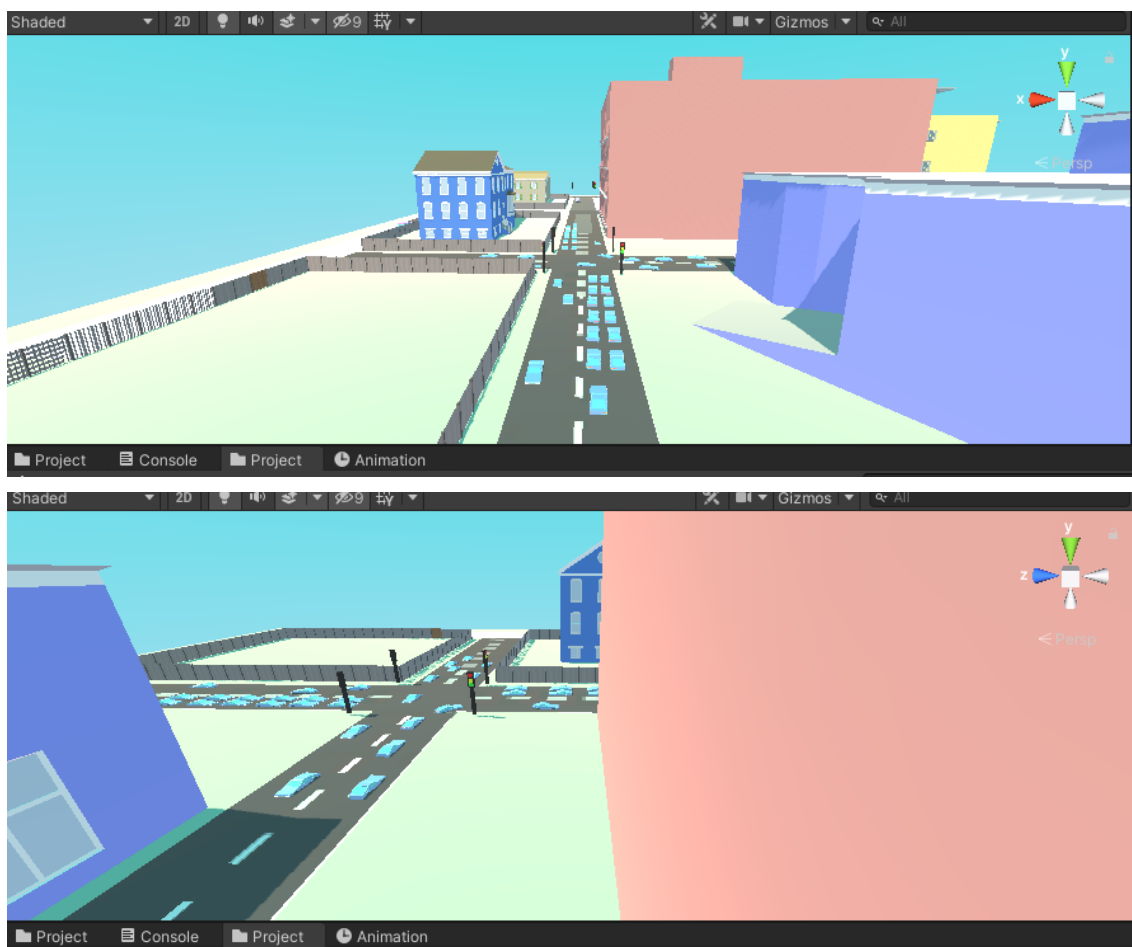


Рис. 5. Перекресток № 2 со стороны 5 до оптимизации

На рис. 6 представлен перекресток после оптимизации.

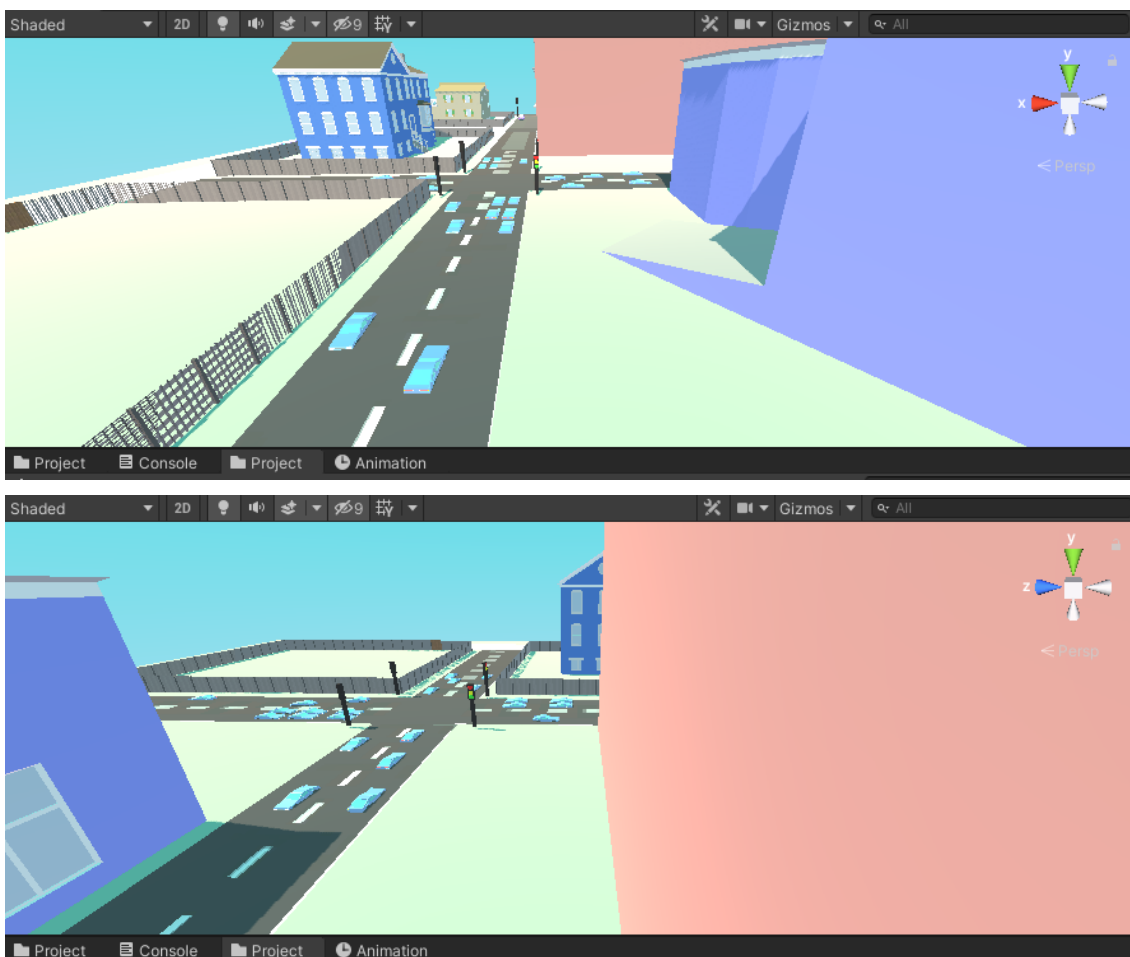


Рис. 6. Перекресток №2 со стороны 5 после оптимизации

Таким образом, можно видеть, что очередь системы уменьшилась после оптимизации работы светофора. Данное исследование в дальнейшем можно использовать для оптимизации целой системы перекрестков с целью устранения дорожных заторов.

### Список использованных источников и литературы

1. *Ахмадинуров, М. М.* Математические модели управления транспортными потоками : монография / М. М. Ахмадинуров, Д. С. Завалищин, Г. А. Тимофеева. – Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2011. – 120 с.
2. *Loginova J., Kasatkina E.* Simulation of the traffic flow in conditions of traffic signal regulation // International Conference on Computer Technology and Science Scientific public organization “Professional science”. – 2017. – С. 30–37.
3. *Кудрина, М. А.* Моделирование транспортных потоков в системе перекрестков Ижевска / М. А. Кудрина, Е. В. Касаткина // Сборник материалов XXVII Республиканской выставки-сессии студенческих инновационных проектов. – 2019. – С. 63–67.
4. *Кудрина, М. А.* Моделирование транспортных потоков на примере дорожной системы одного из районов города Ижевска / М. А. Кудрина, Е. В. Касаткина, Д. Г. Нефедов // Сборник материалов Второго республиканского форума Молодежь и инновации: развитие научно-инновационного потенциала региона. – 2021. – С. 67–72.
5. *Касаткина, Е. В.* Моделирование транспортных потоков на примере дорожной системы одного из районов города Ижевска // E-SCIO. – 2020. – С. 86–93.



## Математическое моделирование и оптимизация метаногенеза при переработке отходов животноводства

Д. В. Майков

Ижевский торгово-экономический техникум

*В статье описан подход к математическому моделированию метаногенеза при переработке животноводческих отходов как в одном, так и последовательно в двух метантенках. Для решения задач идентификации параметров этой модели по экспериментальным данным и оптимального управления предложен алгоритм пресноводных гидр.*

**Ключевые слова:** метаногенез, математическая модель, оптимальное управление, популяционные алгоритмы.

Для производства мясной и молочной продукции создаются животноводческие предприятия (птицефабрики, свинокомплексы и фермы крупного рогатого скота (КРС)). При этом образуется значительное количество отходов, оказывающих вредное воздействие на природу. Одним из способов решения этой проблемы является переработка отходов в особых резервуарах (метантенках) в горючий газ (биогаз) и биоудобрения в процессе метаногенеза.

Для метаногенеза чаще всего используется мезофильная (при температуре от 25 до 38 °С) и термофильная (при температуре 45–60 °С) среды. Оптимальная температура ( $T_{opt}$ ) для мезофильной среды составляет 37 °С, а для термофильной – 56 °С. Время переработки субстрата для этих сред составляет 25 и 12 суток соответственно.

### Математическая модель метаногенеза

Для описания и управления метаногенезом была разработана его математическую модель на основе следующих допущений:

- 1) перемешивание обеспечивает однородность концентраций метанообразующих бактерий и субстрата, выравнивание температуры субстрата;
- 2) метаногенез осуществляется в один этап;
- 3) концентрация метанообразующих бактерий в поступающем субстрате пренебрежимо мала;
- 4) субстрат не содержит катализаторов и ингибиторов процесса.

Сначала рассматривается случай периодического режима, когда происходит однократная загрузка субстрата в метантенк, а по завершении периода сбрасывания он полностью опорожняется.

Для описания популяционной динамики метанообразующих бактерий вводится их концентрация  $X$ , приращение которой составляет [1, 2]:

$$dX = dX_g - dX_d,$$

за счет их размножения ( $dX_g$ ) и отмирания ( $dX_d$ ). Это уравнение приводится

к виду:  $\frac{dX}{dt} = \left( \frac{dX_g}{Xdt} - \frac{dX_d}{Xdt} \right) X$ . При этом величина  $\mu_g = \frac{1}{X} \frac{dX_g}{dt}$  характеризует

относительную скорость прироста концентрации метанообразующих бактерий и называется относительной скоростью роста. Аналогично, величина

$\mu_d = \frac{1}{X} \frac{dX_d}{dt}$  называется относительной скоростью отмирания.

В случае периодического режима концентрация питательных веществ в субстрате должна монотонно убывать ввиду ее постоянного потребления бактериями. График концентрации метанообразующих бактерий должен иметь вид колоколообразной кривой, т. к. в начале процесса этих бактерий сравнительно мало, а питательные вещества имеются в избытке. По мере потребления питательных веществ наступает их нехватка, приводящая к гибели бактерий.

Было построено множество моделей на основе биотехнологических закономерностей [1], найдены их коэффициенты по экспериментальным данным и вычислены коэффициенты детерминации. Наилучшие свойства показала модель, построенная на основе законов Моно

$\mu_g(L) = \frac{\mu_{mg}L}{K_L + L}$  и Колпикова

$\mu_d(L) = \frac{\mu_{md}K_d}{K_d + L}$ . Для моделирования динамики концентрации питательных ве-

ществ в субстрате использовано уравнение вида  $\frac{dL}{dt} = -\beta\mu_g X$ . Скорость образования биогаза определялась с помощью соотношения  $\eta = \gamma\mu_g$ .

Для непрерывного режима поступления субстрата модель метаногенеза принимает вид [3]:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = \left( \frac{\mu_{mg}(T_c)L}{a+L} - \frac{\mu_{md}(T_c)b}{b+L} - u \right) X, \\ \frac{dL}{dt} = u(L_0 - L) - \frac{\beta\mu_{mg}(T_c)LX}{a+L}, \end{cases} \quad (1)$$

с начальными условиями:

$$X(0) = X_0, \quad L(0) = L_0.$$

Влияние температуры субстрата  $T_c$  на интенсивность метаногенеза учитывается через максимально возможные относительные скорости прироста ( $\mu_{mg}$ ) и отмирания бактерий ( $\mu_{md}$ ) [4]:

$$\mu_{mg}(T) = r_{mg} \exp\left(-\frac{(T - T_{opt})^2}{c_{mg}}\right), \quad \mu_{md}(T) = 1 - (1 - r_{md}) \exp\left(-\frac{(T - T_{opt})^2}{c_{md}}\right).$$

Если дополнить систему уравнений (1) критериальным функционалом:

$$V_{\text{общ}} = \int_0^K \frac{\gamma \mu_{mg}(T_c) L X}{a + L} dt \rightarrow \max, \quad (2)$$

то получается задача оптимального управления относительно температуры субстрата  $T_c = T_c(t)$  и скорости его поступления  $u = u(t)$ . Выражение (2) представляет собой общий выход биогаза за период от нуля до  $K$  суток.

Для повышения степени переработки субстрата целесообразно использовать последовательно два метантенка [5]. Далее нижние индексы «1» и «2» соответствуют номеру метантенка. Пусть  $Q_1$  и  $Q_2$  – объемы субстрата в метантенках;

$q_0$  – скорость поступления субстрата в первый метантенк,  $q_1 = \frac{dQ_1}{dt}$

и  $q_2 = \frac{dQ_2}{dt}$  – скорости вытекания субстрата из метантенков,  $q_0 = q_1 = q_2 = q$ . Относительные скорости поступления субстрата в метантенки составляют

$u_1 = \frac{1}{Q_1} \cdot \frac{dQ_1}{dt} = \frac{q_1}{Q_1}$  и  $u_2 = \frac{1}{Q_2} \cdot \frac{dQ_2}{dt} = \frac{q_2}{Q_2}$ , поэтому  $Q_2 = \frac{u_1}{u_2} Q_1$ .

Математическая модель процесса имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dX_1}{dt} = \left( \frac{\mu_{mg1} L_1}{a_1 + L_1} - \frac{\mu_{md1} b_1}{b_1 + L_1} - u_1 \right) \cdot X_1, \\ \frac{dL_1}{dt} = u_1 \cdot (L_0 - L_1) - \frac{\beta_1 \mu_{mg1} L_1 X_1}{a_1 + L_1}, \\ \frac{dX_2}{dt} = \lambda u_2 X_1 + \left( \frac{\mu_{mg2} L_2}{a_2 + L_2} - \frac{\mu_{md2} b_2}{b_2 + L_2} - u_2 \right) \cdot X_2, \\ \frac{dL_2}{dt} = u_2 \cdot (L_1 - L_2) - \frac{\beta_2 \mu_{mg2} L_2 X_2}{a_2 + L_2}. \end{cases} \quad (3)$$

Параметр  $\lambda$  равен нулю, если температурные среды в метантенках различны, и единице, если эти среды совпадают.

Начальные условия имеют вид:

$$X_1(0) = X_2(0) = X_0, \quad L_1(0) = L_2(0) = L_0.$$

Критериальный функционал задачи:

$$V = \int_0^T \left( \frac{\gamma_1 \mu_{mg1} L_1 X_1}{a_1 + L_1} + \frac{\gamma_2 \mu_{mg2} L_2 X_2}{a_2 + L_2} \right) dt \rightarrow \max. \quad (4)$$

## Постановка задачи оптимизации

В общем случае задача оптимального управления в форме Лагранжа имеет следующий вид. Для системы дифференциальных уравнений [6]:

$$\frac{d\mathbf{x}_i}{dt} = f(\mathbf{x}_i(t), \mathbf{u}(t), t), \quad \mathbf{u} \in R^p \quad i = \overline{1, n} \quad (5)$$

с начальными условиями  $\mathbf{x}_0(t_0) = \mathbf{x}_0$  необходимо построить такие вектор-функции  $\mathbf{u}(t)$ , чтобы критериальный функционал

$$J = \int_0^T \varphi(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) dt \quad (6)$$

принимал наибольшее значение.

Решение этой задачи осуществляется на основе численной реализации принципа максимума Понтрягина. На отрезке  $[0, T]$  вводится разностная сетка с узлами  $t_0 = 0, t_1, \dots, t_j, \dots, t_q = T$  и шагом  $h = t_j - t_{j-1}$ . Задаются значения вектора полных управлений  $\mathbf{U}$ . При этом сначала определяется последовательность  $u(t_j)$ ,  $j = \overline{0, q}$  (для схемы с двумя метантенками  $u_1(t_j)$  и  $u_2(t_j)$ ), а затем – температура субстрата  $T_j$ ,  $j = \overline{0, q}$ .

На следующем этапе численно (например, методом Рунге – Кутты четвертого порядка) решается система уравнений (5) и численно интегрируется критериальный функционал (6). После этого решается система сопряженных уравнений:

$$\mathbf{p}_j = \mathbf{p}_{j+1} + h \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{x}_j} + G_j^T \cdot \mathbf{p}_{j+1} \cdot h, \quad \mathbf{p}_q = \mathbf{0}, \quad j = \overline{1, q-1},$$

где  $\mathbf{p} = \mathbf{p}(t)$  – вектор-функция двойственных переменных,  $G_j = \left( \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}_j, \mathbf{u}_j, t_j)}{\partial \mathbf{x}_j} \right)$  –

матрица Якоби, составленная для системы (5).

При использовании градиентных методов оптимизации требуется найти частные производные функционала (6) с помощью двойственных переменных.

## Алгоритм решения задачи оптимального управления

Для нахождения вектора полных управлений  $\mathbf{U}$  целесообразно применять популяционные алгоритмы оптимизации [7, 8]. Эти алгоритмы на протяжении каждой итерации работают с множеством (популяцией) допустимых решений (особей). Популяционные алгоритмы намного эффективнее классических (сопряженных градиентов и др.) решают задачи высокой размерности, а также задачи, целевая функция в которых многоэкстремальна или недифференцируема.

Примером такого популяционного алгоритма является разработанный автором алгоритм пресноводных гидр [9]. В начале работы алгоритма случайным

образом генерируется популяция из  $S$  особей  $\mathbf{U}_j$ , все координаты  $x_{ij}$  которых лежат внутри заданного диапазона  $[U_i^{\min}, U_i^{\max}]$ ,  $i = \overline{1, pq}$ . На каждой итерации алгоритма находится особь  $\mathbf{U}^{**}$  с лучшим значением целевой функции (лидер).

Особи гидр могут перемещаться в трех направлениях: текущем, к лидеру и случайном. В варианте алгоритма на основе метода анализа иерархий (Н-АНР-алгоритм) предпочтения в пользу каждого (из  $m = 3$ ) направления для  $j$ -й особи определяются матрицей парных сравнений  $A_j$ . Эта матрица подвергается нормировке путем деления каждого элемента на сумму элементов того столбца, в котором он находится. Приоритет  $r$ -го направления ( $r = \overline{1, 3}$ ) определяется как среднее значение элементов строки нормированной матрицы  $B$ :

$$w_r = \frac{1}{3} \sum_{p=1}^3 b_{rp}. \quad (7)$$

Для каждой  $j$ -й особи выполняется пробный шаг в направлении текущей скорости движения особи заданной длины  $\lambda \in R^{pq}$ :

$$\mathbf{U}_j^{k+1} = \mathbf{U}_j^k + \lambda^k \otimes \mathbf{v}_j^k,$$

где символ  $\otimes$  обозначает поэлементное произведение векторов. Если значение целевой функции при этом улучшается, то координаты особи полагают равными  $\mathbf{U}_j^{k+1}$ , иначе генерируется случайный вектор скорости с компонентами

$$\mathbf{v}_j^{rand} \in [-1, 1] \text{ и вектор скорости в направлении к лидеру: } \mathbf{v}_j^{leader} = \frac{\mathbf{U}^{**} - \mathbf{U}_j}{\|\mathbf{U}^{**} - \mathbf{U}_j\|}.$$

После этого по формуле (7) находится вектор  $\mathbf{w}$ , а также скорость особи:

$$\mathbf{v}_j^{k+1} = w_1 \mathbf{v}_j^k + w_2 \mathbf{v}_j^{leader} + w_3 \mathbf{v}_j^{rand}$$

и ее положение

$$\mathbf{U}_j^{k+1} = \mathbf{U}_j^k + \lambda^k \otimes \frac{\mathbf{v}_j^{k+1}}{\|\mathbf{v}_j^{k+1}\|}.$$

Если значение целевой функции по-прежнему не улучшается, то выполняется пробный шаг в случайном направлении:

$$\mathbf{U}_j^{k+1} = \mathbf{U}_j^k + \lambda^k \otimes \mathbf{v}_j^{rand}.$$

С целью увеличения обзора пространства поиска используется оператор переноса:

$$U_{ij}^{k+1} = \begin{cases} U_{ij}^k + \alpha_{ij} \cdot (U_i^{\max} - U_{ij}^k) \cdot g(k), & \beta_{ij} \geq 0,5, \\ U_{ij}^k - \alpha_{ij} \cdot (U_{ij}^k - U_i^{\min}) \cdot g(k), & \beta_{ij} < 0,5, \end{cases}$$

где  $g(q) = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 - \frac{q}{\mu + |q|} \right)$ ,  $q = k - \frac{K}{2}$ , случайные числа  $\alpha_{ij}$  и  $\beta_{ij} \in [0, 1]$ . Оператор применяется, когда число итераций, в которых целевая функция особи не улучшалась, достигает критического значения.

### Результаты моделирования и оптимизации метаногенеза

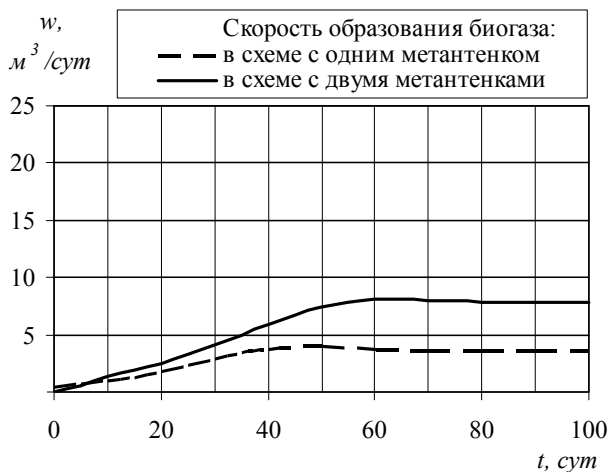
Оптимальные значения параметров метаногенеза представлены в таблице. Соответствующие графики приведены на рис. 1 и 2.

#### Оптимальные параметры метаногенеза

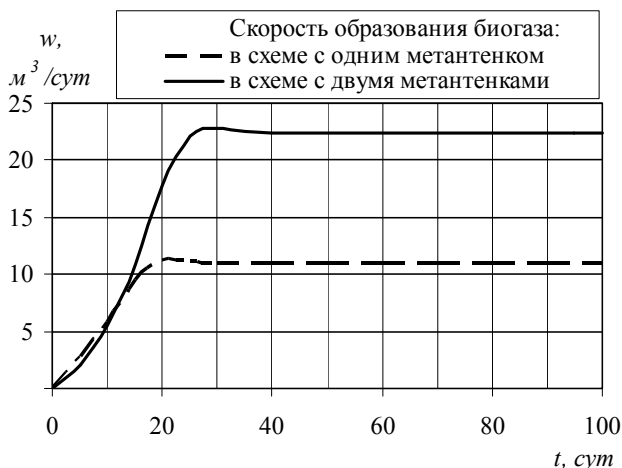
Характеристики	Источник сырья		
	птицефабрики	свинокомплексы	фермы КРС
I. Один метантенк с мезофильной / термофильной средой			
$u^*$ , сут. <sup>-1</sup>	0,149 / 0,402	0,128 / 0,341	0,112 / 0,268
$w^*$ , м <sup>3</sup> /сут.	7,25 / 24,51	3,58 / 10,76	1,81 / 5,42
$L^*/L_0$ , %	56 / 43	51 / 38	52 / 41
II. Два метантенка с мезофильной / термофильной средой в каждом			
$u_1^*$ , сут. <sup>-1</sup>	0,168 / 0,432	0,144 / 0,362	0,117 / 0,287
$u_2^*$ , сут. <sup>-1</sup>	0,491 / 2,448	0,412 / 1,858	0,367 / 1,424
$w^*$ , м <sup>3</sup> /сут.	15,19 / 50,21	7,79 / 22,19	3,85 / 10,92
$L_2^*/L_0$ , %	45 / 35	38 / 33	38 / 33
III. Два метантенка, в первом – мезофильная, во втором – термофильная среда / в первом – термофильная, во втором – мезофильная среда			
$u_1^*$ , сут. <sup>-1</sup>	0,149 / 0,402	0,128 / 0,341	0,112 / 0,268
$u_2^*$ , сут. <sup>-1</sup>	0,312 / 0,051	0,222 / 0,059	0,183 / 0,051
$w^*$ , м <sup>3</sup> /сут.	15,35 / 25,12	6,61 / 11,42	3,26 / 5,42
$L_2^*/L_0$ , %	30 / 34	29 / 35	26 / 32

В результате численных исследований найдены оптимальные значения скорости образования биогаза для случая использования одного метантенка, равные 1,83–7,18 м<sup>3</sup>/сут. для мезофильного режима и 5,34–24,81 м<sup>3</sup>/сут. – для термофильного, что существенно превышает значения средней скорости образования биогаза при периодическом режиме ферментации до полного разложения субстрата.

Последовательная переработка субстрата в двух метантенках с одинаковыми температурными средами позволяет увеличить степень переработки субстрата на 5–10 %. При этом скорость образования биогаза увеличивается вдвое. Степень переработки субстрата для мезофильного режима при этом также на 5–10 % выше, чем для термофильного.

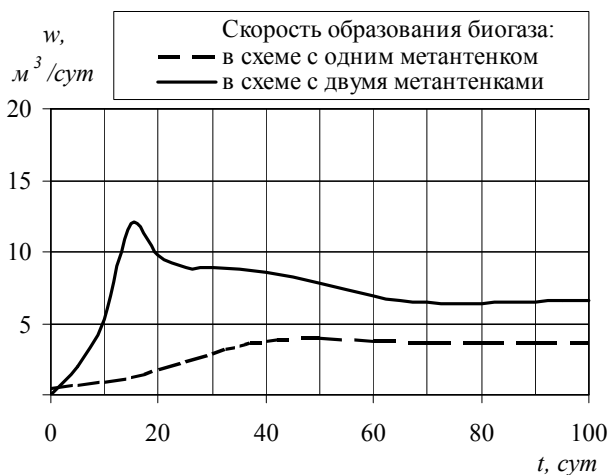


*a*

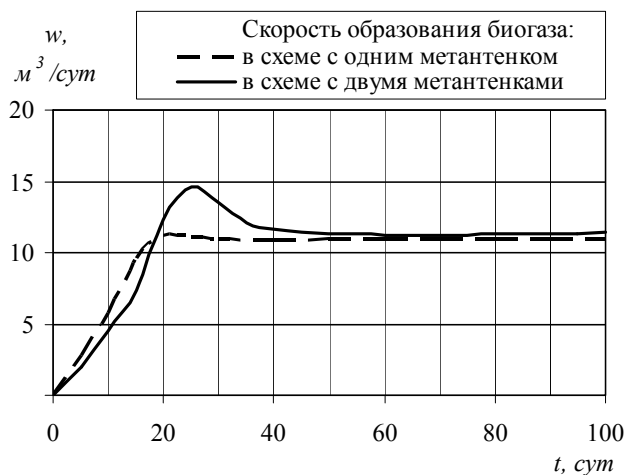


*б*

*Рис. 1.* Скорость образования биогаза при использовании отходов свинокомплексов для двух метантенков с мезофильной (*a*) и термофильной (*б*) средой в каждом



*a*



*б*

*Рис. 2.* Скорость образования биогаза при использовании отходов свинокомплексов и двух метантенков: *a* – в первом метантенке мезофильная, во втором – термофильная среда; *б* – в первом метантенке термофильная, во втором – мезофильная среда

Если температурные среды в метантенках отличаются, то в варианте, когда субстрат сначала перерабатывается в мезофильной среде, а потом поступает в метантенк с термофильной средой, доля переработки субстрата выше на 20–25 %, скорость выработки биогаза почти вдове выше, чем для случая использования одного метантенка. В варианте, когда сначала используется термофильная среда, а потом мезофильная, показатели мало отличаются от случая применения одного метантенка, поэтому этот вариант не рассматривается.

### Список использованных источников и литературы

1. Компьютерное моделирование биотехнологических процессов и систем / Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий, И. Е. Муратова, А. А. Ермаков. – Тамбов: Издательство ТГТУ, 2005. – 80 с.

2. *Колодязная, В. А.* Биотехнология / В. А. Колодязная, М. А. Самотруева. – Москва : ГЭОТАР-Медиа, 2020. – 384 с.
3. *Русяк, И. Г.* Исследование стационарных решений и оптимизация параметров математической модели метаногенеза / И. Г. Русяк, С. А. Королев, Д. В. Майков // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2012. – № 3 (19). – С. 15–21.
4. *Королев, С. А.* Моделирование метаногенеза при изменении условий теплообмена с окружающей средой / С. А. Королев, Д. В. Майков // Всеросс. конф. с международ. участием «Теория управления и математическое моделирование», посвященной памяти профессора Н. В. Азбелева и профессора Е. Л. Тонкова (СТММ2020): сб. тр. Всеросс. конф. (Ижевск, 15–19 июня 2020 г.). – Ижевск: Издательский центр «Удмуртский университет», 2020. – С. 298–299.
5. *Королев, С. А.* Оптимизация двухстадийного режима метаногенеза на основе принципа максимума Понтрягина / С. А. Королев, Д. В. Майков // Вестник Донского государственного технического университета. – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 195–203.
6. *Котюков, А. М.* Принцип максимума Понтрягина для системы второго порядка // Некоторые вопросы анализа, алгебры, геометрии и математического образования. – 2017. – № 7. – С. 118–119.
7. *Карпенко, А. П.* Современные алгоритмы оптимизации : учеб. пособие. – Москва : Изд-во МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2017. – 448 с.
8. *Биоинспирированные методы в оптимизации / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик, П. В. Сороколетов.* – Москва : Физматлит, 2009. – 384 с.
9. *Королев, С. А.* Модификация алгоритма роя частиц на основе метода анализа иерархий / С. А. Королев, Д. В. Майков // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2019. – № 4. – С. 36–46.



## Математическое и компьютерное моделирование системы «Умный дом»

Т. Д. Насридинов

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*В работе представлена целесообразность применения 3D-моделирования интеллектуальной системы «Умный дом». Также демонстрируется сравнительный анализ комплектов системы «Умный дом» и эффективность концепции на основе предлагаемого аналогичного по функциональности оборудования. Реализуется программный комплекс для визуального представления объектов жилых помещений, в которых встроена интеллектуальная система «Умный дом».*

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, система «Умный дом», 3D-модель, SketchUp, Visual Studio, база данных, SQL.

### Введение

Цифровые технологии окружают людей со всех сторон: они есть в каждом современном доме, учреждении, на предприятиях, больницах, школах, университетах. Они используются для 3D-печати, для создания виртуальной реальности, в робототехнике, в области искусственного интеллекта, научных исследований, в промышленности, в здравоохранении, в сельском хозяйстве и т. д. [1–3]. В том числе трехмерное моделирование, одно из перспективных и быстро развивающихся направлений, используется для получения новых знаний о моделируемом объекте или для приближенной оценки поведения различных сложных систем. В настоящее время наиболее актуально математическое и компьютерное моделирование инженерных систем.

Исследователи считают, что цифровые технологии развиваются высокими темпами. По экспертным оценкам, Российская Федерация в настоящее время активно движется в сторону развития цифровых технологий и участия населения страны в этом процессе. По данным международной страховой компании Euler Hermes, лидерами в этом вопросе являются такие страны, как США, Германия и Дания. В 2020 году из 115 стран Российская Федерация находится на 38-м месте по цифровизации, соседствуя с Китаем, Индией и Малайзией.

Технологии автоматизации подразумевают наличие программно-аппаратного комплекса, обеспечивающего независимое от человека управление оборудованием систем жизнеобеспечения, что дает возможность снизить затраты на эксплуатацию здания, а также повысить безопасность, предотвращая аварийные ситуации. Ярким представителем систем жизнеобеспечения является быстроразвивающаяся концепция «Умный дом» (УД) [4–6].

По своему определению, УД позволяет снизить затраты энергоресурсов, например, касательно системы отопления. При этом объем информации, который следует рассмотреть для расчета теплового баланса помещения и оценки эффективности мероприятий по энергосбережению системы УД, достаточно велик. Вследствие этого актуально создание программно-вычислительного комплекса, который поспособствует оперативному и эффективному управлению данными при разработке системы УД.

### **Разработка 3D-модели коттеджных домов, оснащенных системой «Умный дом»**

Система УД решает задачи предоставления пользователю удобства и комфорта жизни, энергосбережения и безопасности имущества. Существует большое множество различных компонент системы УД от разных производителей. Все они обладают схожим друг с другом функционалом, но отличаются ценой. Компании, занимающиеся установкой системы УД, предлагают в качестве основного управляющего компонента программируемый логический контроллер (ПЛК). Однако ПЛК обладают характеристиками, рассчитанными на высокие нагрузки с высокой точностью, которые чаще всего являются избыточными для применения в жилом доме. Поэтому в качестве аналога можно выбрать микроконтроллер, который обладает такими же функциональными возможностями, экономически выгоднее, чем ПЛК. Так, компания Arduino предоставляет микроконтроллеры, среди которых Arduino Mega 2560 более современный, обладающий большим количеством входов/выходов [7]. Таким образом, на основании вышеупомянутых условий получаем систему, состоящую из датчиков движения PIR-SB312, утечки газа MQ-2, освещенности BH-1750, температуры DHT11, а также платы расширения Arduino Shield Ethernet W5100. На рис. 1 представлен комплект системы УД.



*Рис. 1. Комплект системы УД*

В качестве энергосберегающих мероприятий предлагаются мероприятия по регулировке освещенности (использование датчика освещенности для регулировки яркости искусственных источников, достижения требуемого освещения за счет естественного источников), регулировке отопления (отключение системы отопления в период отсутствия жильцов и восстановления температуры к норме при их возвращении) и мероприятие «Отключить всё» (отключение питания во время отсутствия жильцов для уменьшения затрат на пассивное потребление приборами электроэнергии) [8]. Результаты и оценка эффективности энергосберегающих мероприятий будут представлены ниже.

Будущему пользователю будет также удобно предоставить доступ к проекту с визуальным представлением. Для этого следует создать 3D-модель размещения компонентов системы в помещении. Целью 3D-моделирования является предоставление в объемном формате рассматриваемого объекта.

Одной из программных сред для создания трехмерных моделей является SketchUp [9]. Это простая и доступная программа, обладающая необходимыми инструментами для создания объемных объектов. В качестве исходных данных, на основе которых будет происходить моделирование, были выбраны типовые дома коттеджных поселков. Так, на рис. 2 представлены разработанные модели домов.



Рис. 2. 3D-модель одного из типовых домов

Важным моментом является то, что, помимо соответствия масштаба и внутреннего оснащения интерьера, в моделях размещена система УД. На рис. 3 продемонстрированы некоторые из компонентов.

Созданная модель позволяет продемонстрировать, как рассматриваемый объект будет выглядеть в действительности, и в случае необходимости внести поправки, пока идея не реализована.

### **Разработка программного комплекса для расчета потерь энергоресурсов при использовании энергосберегающих мероприятий**

При создании программы необходимо учесть, что существуют различные типы планировок зданий, и для более эффективного выполнения расчетов необходимо создать базу данных (БД). Для создания БД домов был выбран про-

граммный продукт СУБД MS Access. Созданная база должна включать в себя различные параметры, такие как координаты домов, информация о них, некоторые параметры, влияющие на расчет (площадь помещения, стен, окон, материалы и т. д.). На рис. 4 представлена таблица с заполненной информацией о домах.



Рис. 3. Модель распределительной коробки с микроконтроллером Arduino

	Код дома	Адрес	ШиротаДома	ДолготаДома	Щелкните для д
+	28	ул.Весенняя д.18	56,949128	53,230355	
+	29	ул.Весенняя д.22	56,948769	53,230732	
+	30	ул.Весенняя д.23	56,948548	53,231648	
+	31	ул.Весенняя д.28	56,948426	53,232035	
+	32	ул.Весенняя д.34	56,948141	53,232825	
+	33	ул.Весенняя д.42	56,947444	53,234236	
+	34	ул.Весенняя д.44	56,94737	53,234685	
+	35	ул.Медовая д.5	56,949746	53,22757	
+	36	ул.Медовая д.11	56,949186	53,22845	
+	37	ул.Медовая д.13	56,949078	53,228675	
+	38	ул.Медовая д.15	56,948313	53,231208	
+	39	ул.Медовая д.17	56,948048	53,231496	
+	40	ул.Медовая д.19	56,947925	53,231837	
+	41	ул.Медовая д.25	56,947522	53,232888	
+	42	ул.Медовая д.33	56,946967	53,234218	
+	43	ул.Медовая д.4	56,949201	53,227274	
+	44	ул.Медовая д.6	56,949093	53,227588	
+	45	ул.Медовая д.10	56,948833	53,228244	

Рис. 4. База данных информации о зданиях

Далее был реализован программный код, который с помощью sql-запросов и библиотеки Gmap.NET в программной среде Visual Studio извлекает данные из БД и использует их в качестве визуального представления домов на карте (см. рис. 5).

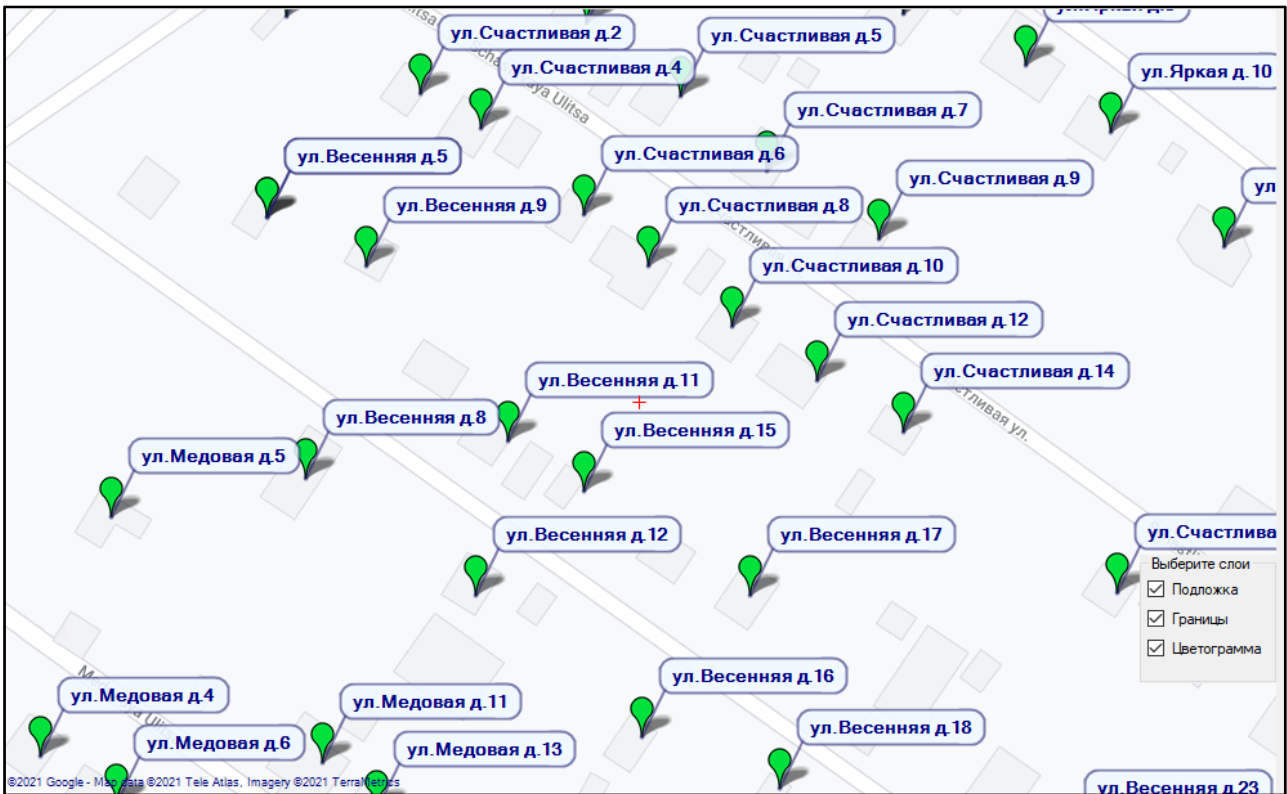


Рис. 5. Отображение домов в БД на карте в интерфейсе программы

Математическая модель, на основе которой производится вычисление затрат, например, при расчете тепловых потерь включает уравнения теплопроводности для многослойной стенки, граничных условий, а также уравнения теплотерь через стеновые ограждения помещений, потерь тепла наружу за счет инфильтрации воздуха через двери и суммарных тепловых потерь (см. формулы (1)–(5)).

$$\begin{cases} q_b = \alpha_b (t_b - t_1) \\ q_1 = -\lambda_1 \frac{(t_1 - t_2)}{\delta_1} \\ \dots \\ q_n = \alpha_n (t_{n+1} - t_n); \end{cases} \quad (1)$$

$$q_b = q_1 = \dots = q_n = \lambda \frac{(t_b - t_n)}{\delta} = \frac{(t_b - t_n)}{R}; \quad (2)$$

$$Q_{ст.кв}^T = \frac{F_{ст.кв}}{R_{ст.кв}} (t_b - t_n) n; \quad (3)$$

$$Q_{дв}^И = \eta A_{дв}^И G_{дв}^И F_{дв} c (t_b - t_n) = K_{дв}^И (t_b - t_n); \quad (4)$$

$$Q = Q_{ст}^T + Q_{ч.п}^T + Q_{п.п}^T + Q_{ок}^T + Q_{ок}^И + Q_{дв}^T + Q_{дв}^И, \quad (5)$$



где  $q$  – удельный тепловой поток;  $\alpha_b$  – суммарный (кондуктивный, конвективный, лучистый) коэффициент теплообмена на внутренней поверхности;  $\delta_i, \lambda_i$  – толщина и коэффициент теплопроводности соответствующего  $i$ -го утепляющего слоя;  $R_{ct}^T$  – сопротивление теплопередачи стенового ограждения;  $F_{ct}$  – площадь стенового ограждения;  $A_{ок}^{и}$  – поправочный коэффициент;  $t_b$  – температура воздуха внутри помещения;  $c$  – удельная массовая теплоемкость воздуха;  $G_{ок}^{и}$  – количество воздуха, поступающего путем инфильтрации.

На основе закона Ньютона – Рихмана определяется время нагрева (охлаждения) тела в среде с постоянной температурой:

$$z = (\ln|t_n - t_1| - \ln|t_n - t_2|) \cdot c \cdot \rho \cdot \frac{V}{\alpha \cdot F}, \quad (6)$$

где  $t_n$  – температура среды, °С;  $t_1$  – начальная температура тела, °С;  $t_2$  – температура тела по истечении времени  $z$ , °С;  $c$  – удельная теплоемкость тела, Дж/(кг·К);  $\rho$  – плотность тела, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – объем тела, м<sup>3</sup>;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи на границе поверхность тела – среда, Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $F$  – площадь поверхности тела, м<sup>2</sup>. Из этого уравнения определяется коэффициент аккумуляции – величина тепловой аккумуляции зданий, которая зависит от толщины стен, коэффициента теплопередачи и коэффициента остекления [10]:

$$\beta = \frac{z}{\ln \left| \frac{t_n - t_1}{t_n - t_2} \right|}. \quad (7)$$

По представленным выше формулам вычисляются тепловые затраты в программном комплексе. Также выполняются расчеты затрат электроэнергии на приборы и освещение в виде затраченной мощности, в натуральных единицах и в денежной форме, на основе тарифной ставки за 1 кВт электроэнергии. В выводе предоставляется информация о доме, для которого производится расчет и возможность выбора энергосберегающих мероприятий. Ключевыми показателями являются прибыль от использования системы УД (на основе эффективности мероприятий) и ее срок окупаемости. Для предоставления информации о температуре помещения во время энергосберегающего мероприятия в интерфейсе программы выводится график. Таким образом, интерфейс программы по расчету представлен на рис. 7.

## Заключение

Выполнена компьютерная и визуальная модель системы «Умный дом» для расчета затрат энергоресурсов и анализа эффективности концепции с использованием энергосберегающих мероприятий.

Разработана трехмерная модель домов нескольких типов планировки, оснащенных системой «Умный дом». Выбранная система экономически выгодна и предоставляет функциональную возможность такую же, как и от коммерческих компаний.

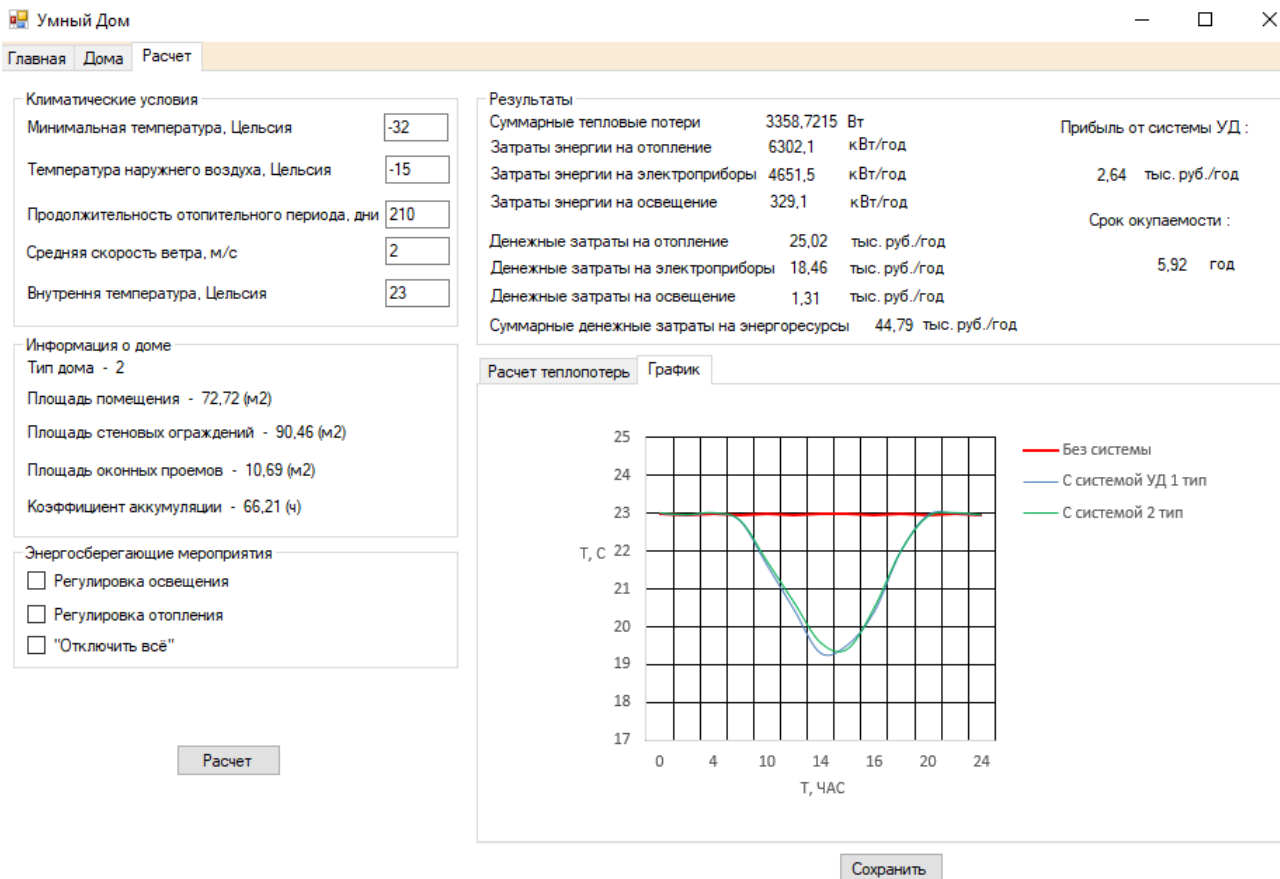


Рис. 7. Интерфейс программного комплекса

Анализ эффективности энергосберегающих мероприятий показал, что для рассматриваемых типов домов мероприятие «Выключить все» позволяет уменьшить затраты на пассивное использование электроэнергии на 33 %, регулировка освещения позволяет сэкономить на ресурсах 49 и 48 %, а регулировка отопления уменьшает затраты в год на 12,5 и 18,7 % соответственно. Таким образом, использование системы «Умный дом» позволяет сэкономить 2,8 и 2,6 тыс. руб. в год, и получить срок окупаемости 5,6 и 5,9 лет для двух планировок соответственно.

### Список использованных источников и литературы

1. Насридинов, Т. Д. Компьютерное моделирование интеллектуальной системы «Умный дом» / Т. Д. Насридинов, Д. Г. Нефедов // Выставка инноваций – 2020 (осенняя сессия) : сборник материалов XXX Республиканской выставки-сессии студенческих инновационных проектов. – 2021. – С. 124–128.
2. Опыт математического моделирования исходов инфаркта миокарда / И. В. Логачева, С. Б. Пономарев, И. Г. Русяк, В. Г. Суфиянов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2004. – № 2 (4). – С. 156–161.
3. Vavilova, D. D. Application of genetic algorithm for adjusting the structure of multilayered neural network for prediction of investment processes / D. D. Vavilova, K. V. Ketova, E. V. Kasatkina // Материалы VIII Международной конференции. – В 2 т. – 2019. – С. 223–233.
4. Насридинов, Т. Д. Экономическое обоснование внедрения интеллектуальной системы «Умный дом» / Т. Д. Насридинов, Д. Г. Нефедов // Актуальные проблемы

формирования и развития национальных инновационных систем : материалы II Международной научно-практической конференции. Институт управления и социально-экономического развития; Саратовский государственный технический университет. – Саратов, 2020. – С. 54–56.

5. *Hargreaves T., Wilson C., Hauxwell-Baldwin R.* Learning to live in a smart home // Building Research & Information. – 2018. – Т. 46. – №. 1. – С. 127–139.

6. Editorial Team Guide to the Arduino// All about circuits: electronic scientific journal. June 12 2015. URL: <https://www.allaboutcircuits.com/projects/getting-started-with-the-arduino/> (Дата обращения: 19.10.2020)

7. *Chandramohan J.* Intelligent smart home automation and security system using Arduino and Wi-fi //International Journal of Engineering and Computer Science (IJECS). 2017. Т. 6. №. 3. С. 20694-20698.

8. *Пташинский, В. С.* Проектируем интерьер сами. Sweet Home 3D, FloorPlan 3D, Google SketchUp и IKEA Home Planner. – Издательский дом «Питер», 2013.

9. *Булатова, В. А.* Интеллектуальная автоматизированная система энергосбережения «Умный дом» // Эпоха науки. – 2015. – № 4.

10. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий. – Москва : ФГУП ЦПП, 2004.



## Моделирование процессов в системе здравоохранения (на примере Российской Федерации)

Ю. А. Никитина

Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова

*Работа посвящена изучению вопросов построения математических оценок уровня здоровья населения, которые являются следствием процессов, происходящих в системе здравоохранения. Анализ структуры и динамики состояния здоровья населения проведен на примере Российской Федерации с использованием первичных современных данных за период 2000-2019 годы. Получено, что уровень здоровья населения снижается с каждым годом. Обобщенный индекс здоровья населения за изучаемый период снизился со значения 0,85 до значения 0,78 (пределы изменения индекса от 0 до 1).*

**Ключевые слова:** уровень здоровья, математическое моделирование, социально-экономическая система, система здравоохранения, первичная и общая заболеваемость, здоровый индивид, инвалидность.

### Введение

Здравоохранение как система жизнеобеспечения любого общества существует с древности. Каждому историческому этапу развития общества соответствует своя система его организации. Вопросы управления системой здравоохранения, основная суть и понятия подробно приведены в работе Ю. С. Рязанцевой [1].

Очевидно, чем выше состояние развития человеческого общества, тем более организованной и систематизированной является его система здравоохранения.

Географические, национальные и культурные факторы оказывают сильное влияние на становление и развитие систем здравоохранения. Уже в древности великие реформаторы медицины, такие как Гиппократ, Гален, Ибн-Сина, отмечали, что система здравоохранения является важным звеном в развитии общества. Вклад выдающихся врачей древности в становление медицины проанализирован в работе И. А. Демьяненко, О. С. Третьяковой и И. А. Сухаревой [2].

Впоследствии известные российские ученые М. В. Ломоносов, А. Н. Радищев, Н. Г. Чернышевский определили систему здравоохранения как один из важнейших механизмов укрепления государственности [3].

Ключевая роль системы здравоохранения в современной социальной системе также сохраняется. Эта роль обусловлена своей спецификой. В связи с этой спецификой услуги здравоохранения принято рассматривать в качестве

социально значимых благ. Как правильно отметил заведующий кафедрой «Инновационные технологии и финансовый менеджмент в здравоохранении» Ташкентского института усовершенствования врачей Б. Дурманов, «здоровье – не экономическая категория, оно не покупается и не продается. Покупаются лишь товары и услуги, которые определенным образом могут повлиять на состояние здоровья» [4].

Здравоохранение является важным институтом безопасности, это высший приоритет цивилизованного государства. Здравоохранение, как и большинство социальных отраслей, является стратегической отраслью, так как низкий уровень ее развития может привести к деградации. В современном мире здоровье нации является залогом эффективного функционирования социально-экономических систем, необходимым фактором, обеспечивающим прогрессивное развитие общества. Так, решение задач управления социально-экономическими системами с учетом фактора состояния здоровья населения представлено в работах К. В. Кетовой [5], Д. Д. Вавиловой [6], Е. А. Дерендяевой [7].

### **Содержательная постановка задачи моделирования состояния здоровья населения. Анализ статистических данных**

В настоящей работе изучим структуру и динамику уровня здоровья населения социально-экономической системы. Численные расчеты будем проводить на примере социально-экономической системы Российской Федерации.

Как правило, комплексная статистическая информация по исследуемым показателям отсутствует, поэтому необходимо проанализировать и перегруппировать имеющуюся первичную информацию.

Состояние здоровья определяет возможности человека в трудовой деятельности и степень его участия в ней. Здоровый человек имеет возможность к полной самореализации, проблемы со здоровьем ограничивают его [8].

В соответствии с [9] сгруппируем население по состоянию здоровья: 1) здоровый человек; 2) имеющий хронические заболевания; 3) способен к трудовой деятельности (III группа инвалидности); 4) частично способен к труду (II группа инвалидности); 5) неспособен к труду (I группа инвалидности).

Задачу оценки состояния здоровья населения рассмотрим на примере населения РФ. В таблице приведены данные о заболеваемости населения за период 2000–2018 гг., которые представлены в информационно-аналитических материалах Федеральной службы государственной статистики РФ [10].

В соответствии с медицинской классификацией [11], первичная заболеваемость – это совокупность вновь возникших и нигде ранее не учтенных заболеваний; общая заболеваемость представляет собой сумму первичных заболеваний и заболеваний, накопленных в предыдущие годы. Таким образом, общая заболеваемость характеризует общее число существующих заболеваний среди населения данной территории за определенный период времени.

Общая заболеваемость населения РФ за период 2000–2018 гг. выросла на 25,5 % (240 млн чел. в 2018 году). Первичная заболеваемость населения РФ за рассматриваемый период 2000–2018 гг. выросла на 8,0 % (по сравнению с началом периода 2000 год) и составила 114,8 млн заболеваний.

### Общая и первичная заболеваемость населения РФ за период 2000–2018 гг.

Год	Численность населения, млн чел.	Общая заболеваемость, млн чел.	Первичная заболеваемость, млн чел.	Темп роста к 2000 году, %	
				Общая заболеваемость	Первичная заболеваемость
2000	146,9	191,3	106,3	100,0	100,0
2001	146,3	192,4	104,3	100,6	98,1
2002	145,2	198,1	106,7	103,6	100,4
2003	145,0	201,1	107,4	105,1	101,0
2004	144,3	204,2	106,3	106,7	100,0
2005	143,8	207,8	105,9	108,6	99,6
2006	143,2	216,2	108,8	113,0	102,4
2007	142,8	219,5	109,6	114,7	103,1
2008	142,8	221,7	109,6	115,9	103,1
2009	142,7	228,1	113,9	119,2	107,1
2010	142,9	226,2	111,4	118,2	104,8
2011	142,9	229,2	113,9	119,8	107,1
2012	143,0	229,7	113,7	120,1	106,9
2013	143,3	231,1	114,7	120,8	107,9
2014	143,7	235,0	115,0	122,8	108,1
2015	146,3	234,3	113,9	122,5	107,1
2016	146,5	237,1	115,2	123,9	108,3
2017	146,8	237,5	114,4	124,1	107,6
2018	146,9	240,0	114,8	125,5	108,0

Можно сделать вывод, что рост общей заболеваемости населения РФ за период 2000–2018 гг. в основном обусловлен наличием хронических заболеваний.

На рис. 1 представлены в графическом виде данные по наиболее статистически значимым заболеваниям для населения РФ за период 2000–2018 годы (в расчете на 1000 человек) по данным [12–15]. Таковыми оказались болезни органов дыхания, болезни мочеполовой системы, болезни кожи и подкожной клетчатки, болезни органов пищеварения, болезни системы кровообращения, новообразования.

Наблюдается тенденция увеличения общей заболеваемости населения РФ болезнями органов дыхания (за период 2000–2019 годы повышение составило 12,3 %), болезнями крови (за период повышение составило 10,53 %), а также болезнями системы кровообращения (за период 2000–2019 произошло увеличение в 2 раза). Наблюдается рост болезней, связанных с появлением новообразований.

Средний ежегодный темп роста заболеваемости населения РФ в течение периода 2000–2019 гг. по видам заболеваний был следующий: заболеваемость органов дыхания 0,69 %; системы кровообращения – 3,95 %; новообразования – 1,88 %; болезни крови – 0,89 %. При этом среднегодовой темп снижения числа болезней органов пищеварения на 1000 человек населения РФ составил 0,01 %.

Показатель общей заболеваемости населения за период 2000–2019 гг. вырос на 41,67 %.



Рис. 1. Динамика общей заболеваемости населения РФ за период 2000–2019 гг. по видам болезней (на 1000 человек)

На диаграмме (рис. 2) приведена статистика по численности людей, имеющих инвалидность, а также статистика по внутренней структуре этой категории населения РФ в 2000 году и в 2019 году. Информация представлена по данным Федеральной службы государственной статистики и Федерального реестра Пенсионного фонда РФ [14, 15].

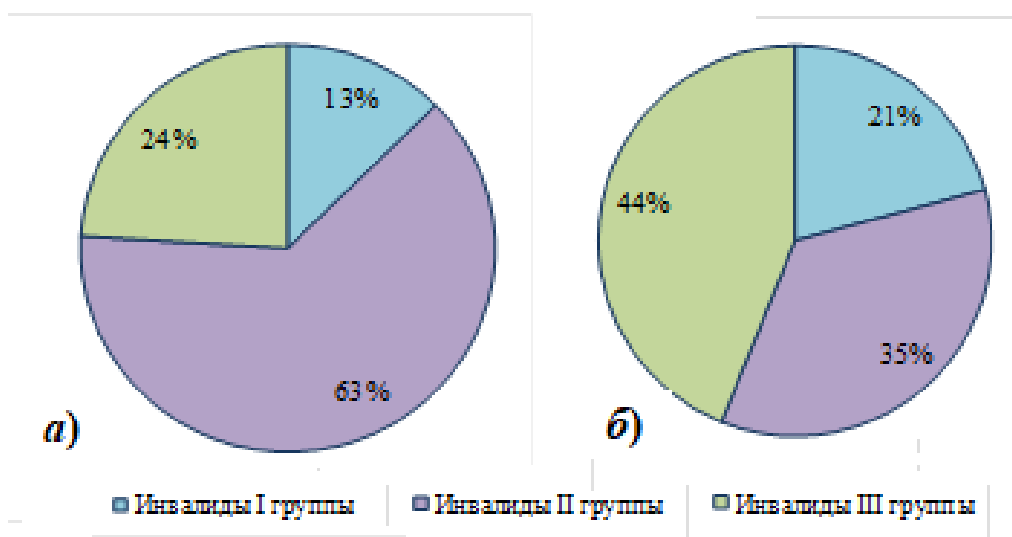


Рис. 2. Распределение людей с инвалидностью по группам инвалидности в РФ в 2000 году (а) и 2019 году (б)

Третья группа инвалидности предполагает способность к трудовой деятельности, вторая группа позволяет частично участвовать в трудовом процессе, первая группа инвалидности указывает на неспособность к трудовой деятель-

ности. Между группами происходит перераспределение. Увеличивается удельная доля людей, способных к трудовой деятельности. За период 2000–2019 гг. увеличение людей, способных к трудовой деятельности, составило 82,9 %.

### Результаты численного анализа уровня здоровья населения РФ

В соответствии с работами [17, 18] и на основе данных [12, 14, 15], построим распределение количества людей по уровню здоровья в РФ за период 2000–2018 гг. (рис. 3).

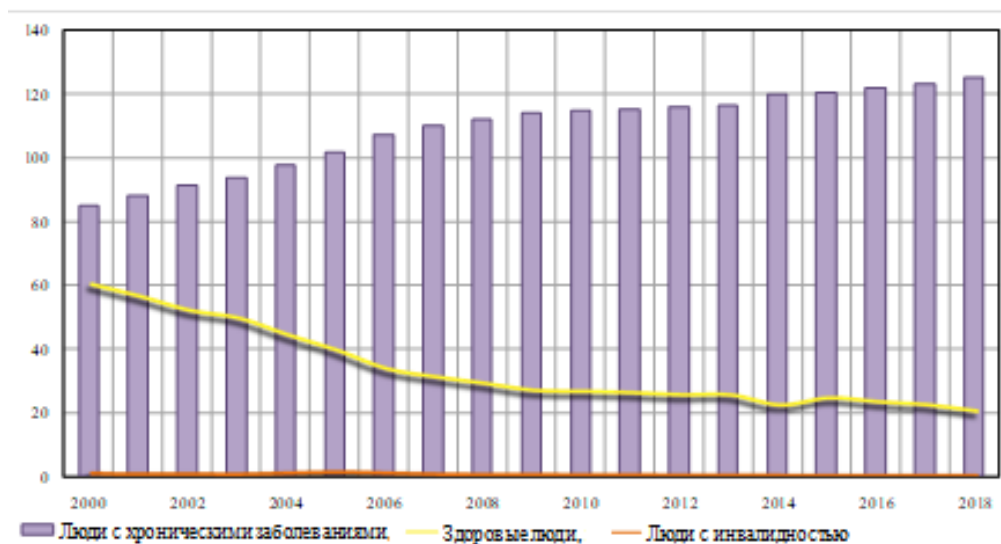


Рис. 3. Распределение численности населения РФ по состоянию здоровья за период 2000–2018 гг.

Доля здоровых людей снизилась с 41,40 % в 2000 году до 14,33 % в 2018 году; возросла доля людей, имеющих хронические заболевания: 57,85 % в 2000 году и 85,23 % в 2018 году. Удельный вес людей с инвалидностью увеличился для третьей рабочей группы инвалидности с 0,18 до 0,19 %; для второй частично рабочей группы снижение составило 0,32 %; удельный вес людей с первой нерабочей группой уменьшился с 0,09 до 0,08 %. В целом, доля людей с инвалидностью в общей численности населения уменьшилась с 0,75 % до 0,44 %.

Рассчитаем индекс здоровья населения, предложенный в работах К. В. Кетовой и Д. Д. Вавиловой [17, 18]:

$$\rho = \sum_{i=1}^5 z_i f_i / \sum_{i=1}^5 f_i, \quad 0 \leq \rho \leq 1,$$

где  $z$  – категория состояния здоровья человека ( $i = 1$  – здоровый человек,  $i = 2$  – имеющий хронические заболевания,  $i = 3$  – имеющий третью группу инвалидности,  $i = 4$  – вторая группа инвалидности и  $i = 5$  – первая группа инвалидности):  $z_1 = 1$ ;  $z_2 = 0,75$ ;  $z_3 = 0,5$ ;  $z_4 = 0,25$ ;  $z_5 = 0$ . Весовой коэффициент  $f_i$  задает долю населения одной из пяти групп в общей численности населения.

На рис. 4 представлена динамика индекса здоровья населения, рассчитанного для РФ за период 2000–2018 гг.

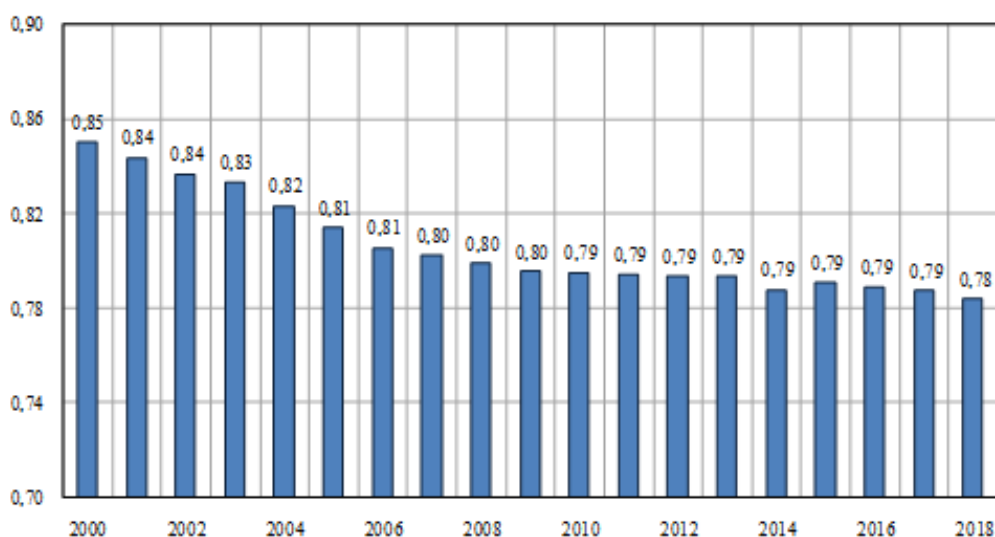


Рис. 4. Динамика индекса здоровья населения РФ за период 2000–2018 гг.

Индекс здоровья населения РФ за период 2000–2018 гг. снизился с 0,85 до 0,78. Средний ежегодный темп снижения составил 0,1 процентных пункта.

### Заключение

По материалам работ К. В. Кетовой и Д. Д. Вавиловой были построены численные оценки уровня здоровья населения на примере РФ.

Были проанализированы первичные статистические данные за период 2000–2018 годы. Выявлено, что в рассматриваемый период качество составляющей здоровья человеческого капитала снижается, о чем свидетельствует снижение индекса здоровья населения Российской Федерации со значения 0,85 до значения 0,78. Его снижение в основном связано с изменениями в структуре населения по состоянию здоровья:

1. Доля здорового населения снизилась с 41,40 % в 2000 году до 14,33 % в 2018 году.
2. Доля людей с хроническими заболеваниями увеличилась: 57,85 % в 2000 году и 85,23 % в 2018 году.

По мнению автора, для повышения уровня здоровья населения необходимо расширить масштабы вовлечения населения в здоровый образ жизни, улучшать систему профилактического здравоохранения, повышать доступность и качество медицинской помощи населению.\

### Список использованных источников и литературы

1. *Рязанцева, Ю. С.* Управление системой здравоохранения: сущность основных понятий // Социальная политика и социология. – 2012. – № 4 (82). – С. 129–140.
2. *Демьяненко, И. А.* Вклад выдающихся врачей древности в становление медицины / И. А. Демьяненко, О. С. Третьякова, И. А. Сухарева // История медицины. – 2016. – Т. 19, № 3. – С. 127–134.
3. Вопросы медицины, врачебного образования, общественного здоровья и социального развития в научном наследии М.В. Ломоносова (к 300-летию со дня рождения) / Ю. Л. Шевченко, С. А. Матвеев, Л. Д. Шалыгин, В. Г. Гудымович // Вестник

Национального медико-хирургического центра им. Н. И. Пирогова. – 2011. – Т. 6, № 3. – С. 118–119.

4. *Дурманов, Б.* Социально-экономическая природа рынка медицинских услуг // Экономика и финансы (Узбекистан). – 2013. – № 1. – С. 3–13.

5. *Кетова, К. В.* Об одной задаче макроэкономической динамики региона с учетом факторов экономического развития // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2007. – № 3. – С. 33–40.

6. *Вавилова, Д. Д.* Нейросетевая модель прогнозирования человеческого капитала / Д. Д. Вавилова, К. В. Кетова // Интеллектуальные системы в производстве. – 2020. – Т. 18, № 1. – С. 26–35.

7. *Дерендяева, Е. А.* Изучение динамики человеческого капитала для регионов РФ в соответствии с рейтингом их социально-экономического положения / Е. А. Дерендяева, К. В. Кетова // Современные проблемы науки и образования. – 2011. – № 6. – С. 224.

8. *Кетова, К. В.* Экономико-математическая модель потенциала трудовых ресурсов и стоимостных характеристик демографических потерь // Прикладная эконометрика. – 2007. – № 3 (7). – С. 80–94.

9. *Кетова, К. В.* Структурно-динамический анализ составляющей здоровья человеческого капитала социально-экономической системы / К. В. Кетова, Д. Д. Вавилова // Статистика и Экономика. – 2021. – Т. 18, № 1. – С. 54–66.

10. Информационно-аналитические материалы Федеральной службы государственной статистики Российской Федерации. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13218> (дата обращения: 02.05.2021).

11. *Страшеникова, Т. Н.* Сравнительный анализ общей и первичной заболеваемости у лиц трудоспособного возраста в Российской Федерации и на ее административных территориях // Современные проблемы науки и образования. № 2. 2014. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=12717> (дата обращения: 30.05.2021).

12. Статистические данные по видам болезней в Российской Федерации. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/13721> (дата обращения: 30.05.2021).

13. Динамика заболеваемости у населения различных возрастных групп в Российской Федерации / В. А. Погодина, А. И. Бабенко, Е. А. Бабенко, Н. А. Гусельникова // Вестник Уральской медицинской академической науки. – 2016. – № 2 (57). – С. 170–179.

14. Сведения об инвалидах в Российской Федерации. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/13964> (дата обращения: 30.05.2021).

15. Численность инвалидов в Российской Федерации, федеральных округах и субъектах РФ. – URL: <https://sfri.ru/analitika/chislennost> (дата обращения: 30.05.2021).

16. *Кетова, К. В.* Построение индекса здоровья населения экономической системы региона / К. В. Кетова, Д. Д. Вавилова // Дневник науки. – 2021. – № 1 (49). – С. 46.

17. *Кетова, К. В.* Индекс здоровья населения экономической системы: региональный аспект / К. В. Кетова, Д. Д. Вавилова // StudNet. – 2021. – Т. 4, № 1. – С. 125.

## Математическое моделирование зависимости рождаемости и смертности от уровня потребления (на примере Российской Федерации)

*Д. А. Перевощикова*

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*Работа посвящена изучению вопросов построения математических зависимостей рождаемости и смертности от уровня потребления населения для последующего их включения в модели демографической динамики. Численный анализ проведен на примере РФ с использованием статистических данных за период 2000–2019 гг. Получено, что увеличение потребления влияет существенным образом на снижение смертности, но в то же время на рождаемость оказывает очень малое влияние.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, социально-экономическая система, рождаемость, смертность, уровень потребления.

### Введение

Рождаемость и смертность являются фундаментальными характеристиками демографических процессов. Изучение факторов, влияющих на эти процессы, дает реальное понимание причинно-следственных связей наблюдающейся в последние десятилетия в развитых странах убыли населения. Такие исследования позволяют строить с использованием научного инструментария стратегии развития социально-экономических систем на долгосрочный период.

Научные стратегии оптимального управления с учетом демографических процессов должны быть сформированы с использованием инструментов математического моделирования [1]. Примерами современных работ, в которых проведены исследования динамики социально-экономических систем с использованием актуального математического инструментария, являются, например, работы В. Беленького, И. Русяка и К. Кетовой [2–4].

Большой вклад в изучение демографических процессов математическими методами внесли российские ученые В. Буняковский С., Новосельский, О. Староверов, М. Птуха, К. Герман, В. Паевский [5, 6]. А. Боярский систематизировал демографические знания [7, 8]. Большой вклад в систематизацию демографии внесли А. Вишневецкий [9, 10] и И. Венецкий [11, 12].

В данной работе будем изучать зависимость демографических показателей рождаемости и смертности от обобщенного потребления в социально-экономической системе. Численный анализ проведем на примере статистических данных по демографическим показателям в Российской Федерации.



## Модель анализа и прогноза численности населения

В соответствии с работой [2] для описания движения демографических элементов будем использовать модель вида:

$$\frac{\partial \rho(t, \tau)}{\partial t} + \frac{\partial \rho(t, \tau)}{\partial \tau} = -\mu(t, \tau)\psi(q)\rho(t, \tau), \quad (1)$$

где  $t$  – время;  $\tau$  – возраст человека;  $\rho(t, \tau)$  – функция распределения населения по возрастам;  $\mu(t, \tau)$  – функция смертности;  $\psi(q)$  – функция снижения смертности в зависимости от величины потребления  $q = c/c_0$ , где  $c$  – потребительские расходы на душу населения в текущем году;  $c_0$  – потребительские расходы на душу населения в базисном году.

Начальное условие:

$$\rho(t_0, \tau) = \rho_0(\tau), \quad \tau > 0, \quad (2)$$

где  $\rho_0(\tau)$  – в общем случае известная по исходным данным функция.

Граничное условие:

$$\rho(t, 0) = \int_{\tau_{1\phi}}^{\tau_{2\phi}} \beta(t, \tau)\varphi(q)\rho(t, \tau)d\tau, \quad t > t_0, \quad (3)$$

где  $\beta(t, \tau)$  – плотность распределения рождений из диапазона фертильности женщин  $[\tau_{1\phi}; \tau_{2\phi}]$ ;  $\varphi(q)$  – функция повышения рождаемости.

Отличительной особенностью модели (1)–(3) является присутствие в ней функций снижения смертности и повышения рождаемости. Эти функции могут быть построены в зависимости от факторов, влияющих на рождаемость и смертность. Примеры таких построений приведены, например, в работе [13], где описаны результаты моделирования взаимосвязи демографических и макроэкономических процессов на примере социально-экономической системы Удмуртской Республики). Предварительное социально-экономическое исследование процессов рождаемости для Удмуртской Республики приведено в работе [14], процессов смертности в регионе – в работе [15].

### Построение функций рождаемости и смертности (на примере статистических данных Российской Федерации)

На рис. 1 представлен график распределения численности населения РФ по возрастам  $\tau$  для года  $t_0 = 2019$ , построенный по статистическим данным [16].

Оценка эмпирических зависимостей для плотности распределения рождений  $\beta(t, \tau)$  из диапазона фертильности ( $\tau \in [15, 50]$  лет) за период 2008–2018 гг. показала, что зависимость функции  $\beta(t, \tau)$  от времени  $t$  незначительна, поэтому будем полагать  $\beta(t, \tau) = \tilde{\beta}(\tau)$ . На рис. 2, а представлена эмпирическая кривая  $\tilde{\beta}(\tau)$ , построенная по статистическим данным РФ за период 2008–2018 гг.

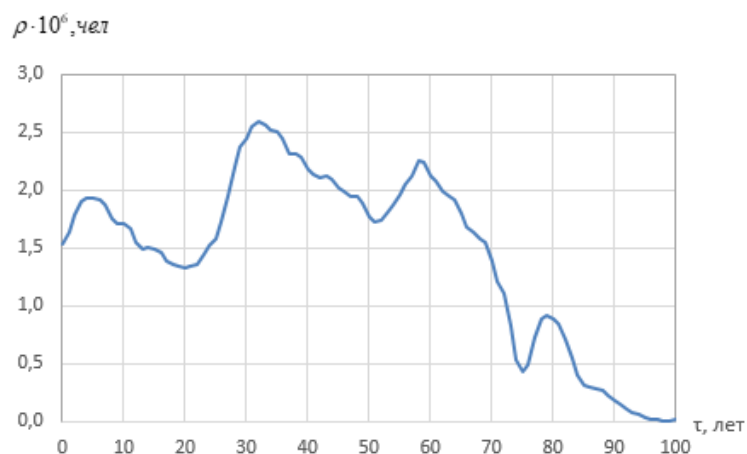


Рис. 1. Распределение численности населения РФ по возрастам в 2019 году

Аналогичная ситуация складывается и для функции смертности  $\mu(t, \tau)$  в зависимости от возраста  $\tau$  за период 2008–2018 гг. В дальнейшем будем полагать  $\mu(t, \tau) = \tilde{\mu}(\tau)$ . На рис. 2, б представлена эмпирическая кривая  $\tilde{\mu}(\tau)$ .

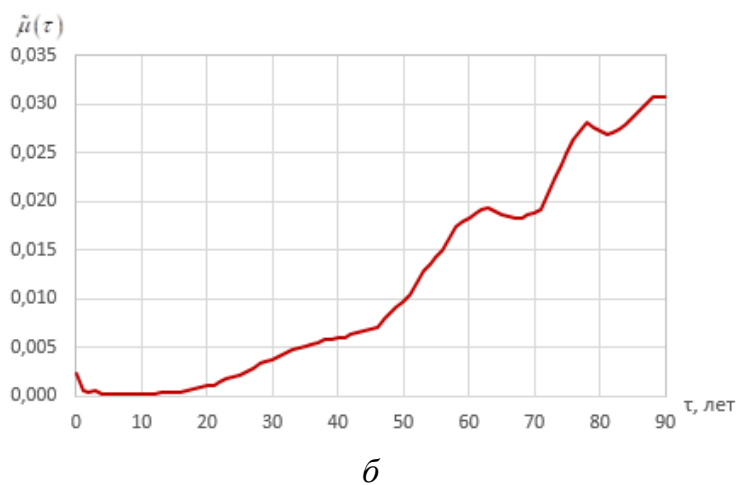
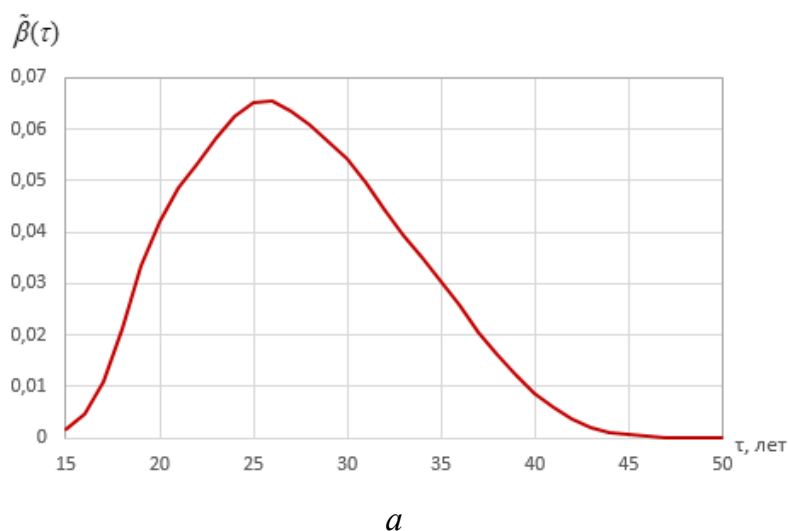


Рис. 2. Функция распределения рождений для РФ за период 2008–2018 гг. (а); функция смертности для РФ за период 2011–2018 гг. (б)

## Построение функций повышения рождаемости и снижения смертности (на примере статистических данных Российской Федерации)

Для проведения параметрических расчетов, которые характеризовали бы возможности для уменьшения смертности и увеличения рождаемости, изучим зависимости  $\varphi(q)$  и  $\psi(q)$ . В качестве фактора, влияющего на процессы рождаемости и смертности, выберем совокупное потребление. В него включены как потребление продуктов питания, одежда, так и расходы на поддержания здоровья, культуры, развития образования.

Для проведения параметрических расчетов по оценке влияния фактора обобщенного потребления на рождаемость и смертность определим аналитический вид указанных функций в зависимости от потребительских расходов на душу населения по статистическим данным регионов РФ. Анализ степени дифференциации населения РФ по уровню доходов приведен в работе [17]; структурно-динамический анализ доходов населения социально-экономической системы – в работе [18]. Будем использовать результаты этих исследований.

Были изучены 20 регионов РФ по статистическим данным [19]. Эти регионы представляют весь имеющийся в стране спектр по удельному потреблению: с минимальным, со средним и с максимальным потреблением (рис. 3).

Одну зависимость для всех регионов РФ, которая имела бы достаточный коэффициент детерминации, построить затруднительно. Это обусловлено различиями, сложившимися в течение долгого времени по ряду социально-экономических, культурных, исторических, географических различий [20].

Выделяются 3 области: регионы с удельными потребительскими расходами, меняющимися в диапазоне от 15 до 46 тыс. руб. (выборка 1), регионы с потребительскими расходами до 12 тыс. руб., куда входят Ингушетия и Дагестан (выборка 2), а также Москва, где расходы являются наибольшими в стране и достигают 56–64 тыс. руб. в среднем на одного человека в месяц (рис. 3).

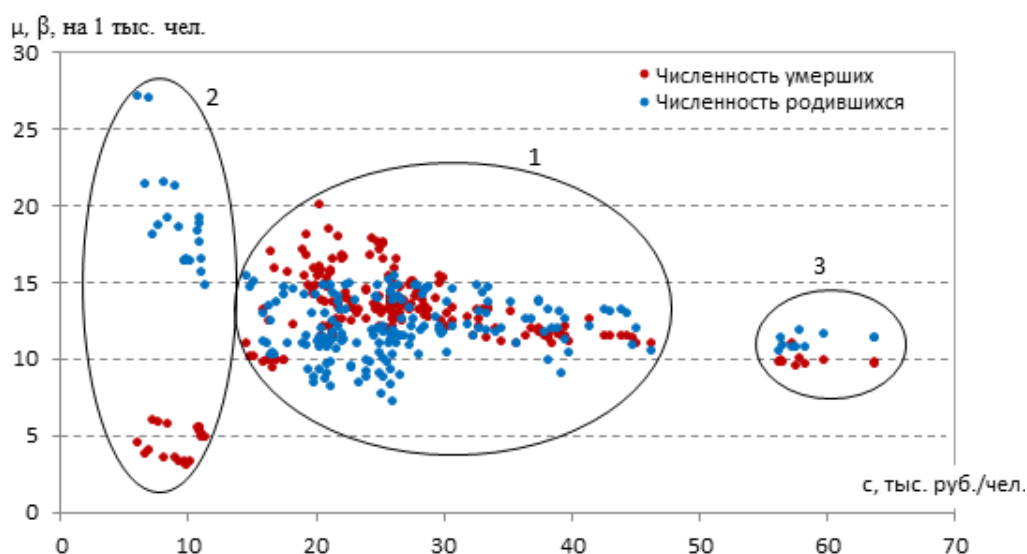


Рис. 3. Зависимость количества умерших и родившихся от совокупного потребления в РФ

Рассмотрим выборку 1. Функции смертности  $\bar{\mu}(c)$  и рождаемости  $\bar{\beta}(c)$  для рассматриваемых регионов могут быть описаны линейными регрессионными зависимостями вида:

$$\bar{\mu}(c) = 15,84 - 0,09c, \quad \bar{\beta}(c) = 11,48 + 0,019c. \quad (4)$$

Регрессионная зависимость для этих регионов представлена на рис. 4.

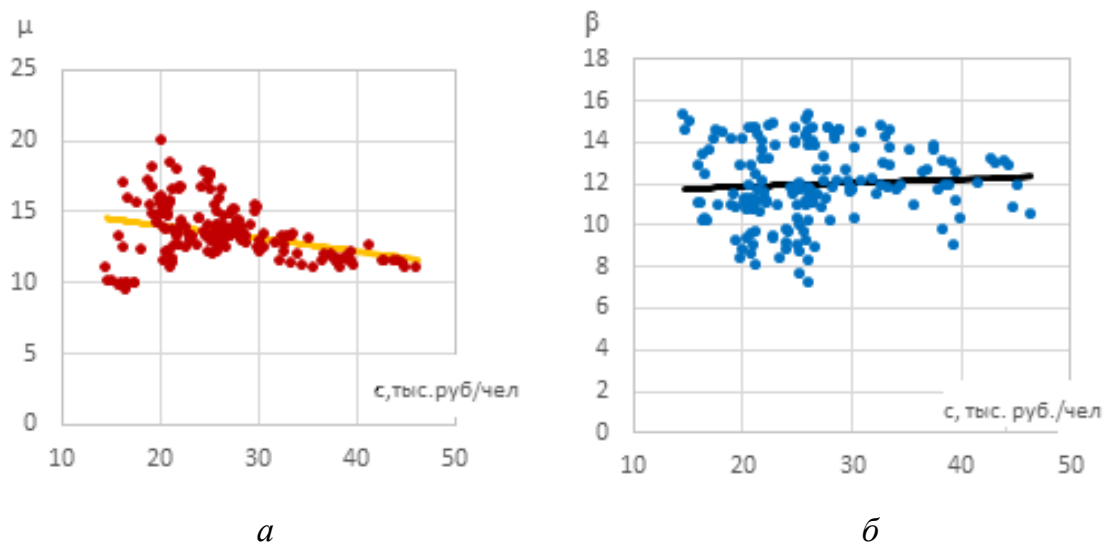


Рис. 4. Зависимость от потребительских расходов в выборке 1:  
*a* – смертности; *б* – рождаемости

Рассмотрим выборку 2 регионов с наименьшими потребительскими расходами. Функции смертности  $\bar{\mu}(c)$  и рождаемости  $\bar{\beta}(c)$  для этих регионов определяются следующими линейными регрессионными зависимостями:

$$\bar{\mu}(c) = 3,78 + 0,071c, \quad \bar{\beta}(c) = 33,29 - 1,539c. \quad (5)$$

Регрессионная зависимость для выборки 2 представлена на рис. 5.

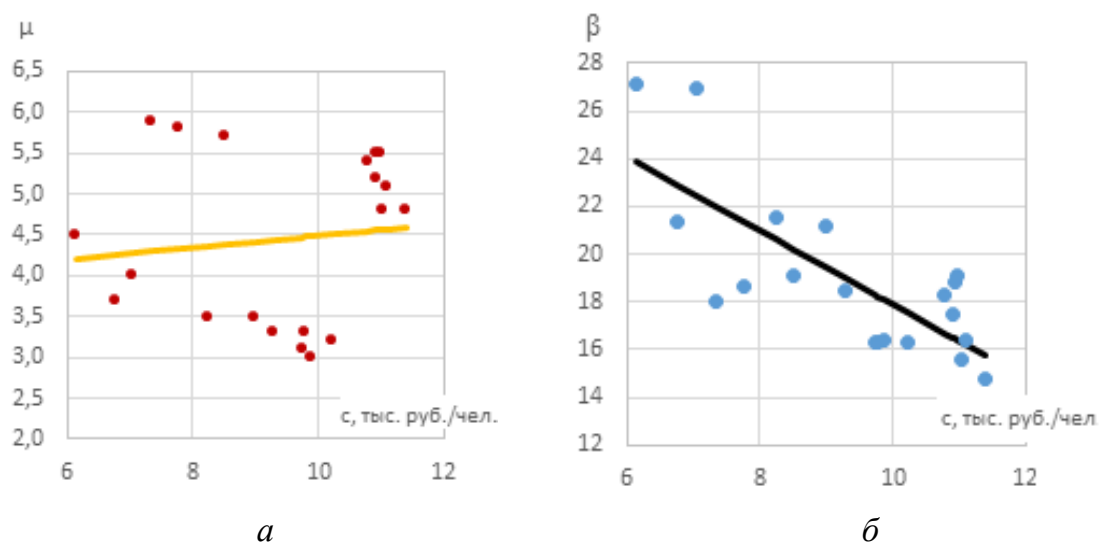


Рис. 5. Зависимость от потребительских расходов в выборке 2:  
*a* – смертности; *б* – рождаемости

Рассмотрим выборку 3 с максимальными потребительскими расходами. Функции смертности  $\bar{\mu}(c)$  и рождаемости  $\bar{\beta}(c)$  для регионов выборки 3:

$$\bar{\mu}(c) = 12,03 - 0,037c, \quad \bar{\beta}(c) = 7,18 + 0,066c. \quad (6)$$

Регрессионная зависимость для данных регионов представлена на рис. 6.

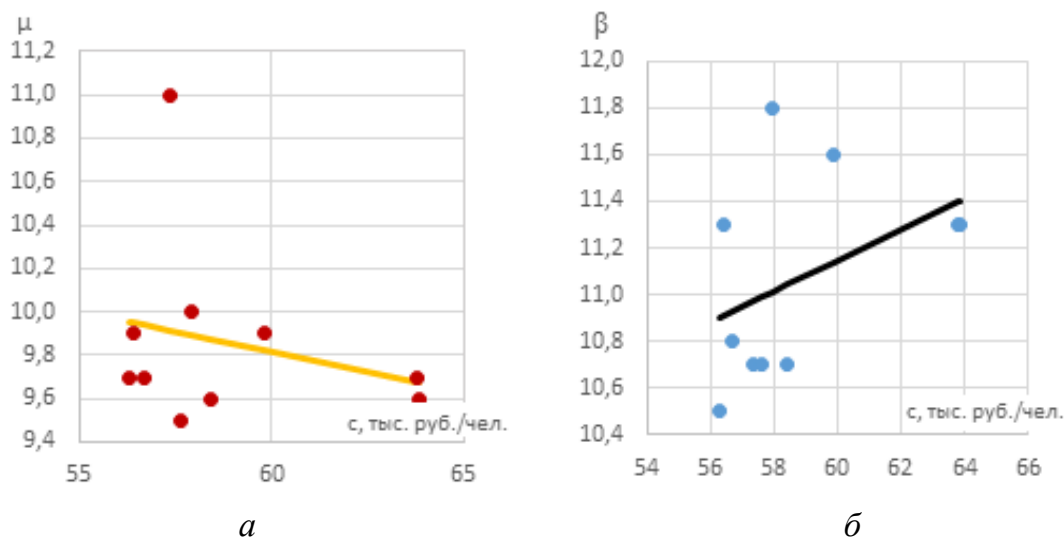


Рис. 6. Зависимость от потребительских расходов в выборке 3:  
а – смертности; б – рождаемости

Для примера представим расчет по выборке 1, в которой удельное потребление меняется в диапазоне от 15 до 46 тыс. руб. на человека.

Функции повышения рождаемости и снижения смертности, в соответствии с работой [13], будем искать в виде:

$$\psi(q) = \psi_0 [1 - \psi_1 \exp(-\psi_2/q)], \quad \varphi(q) = \varphi_0 [1 + \varphi_1 \exp(-\varphi_2/q)], \quad (7)$$

где параметры  $\psi_i, \varphi_i, i = \overline{0, 2}$  будут определяться на основе статистических данных [16, 19].

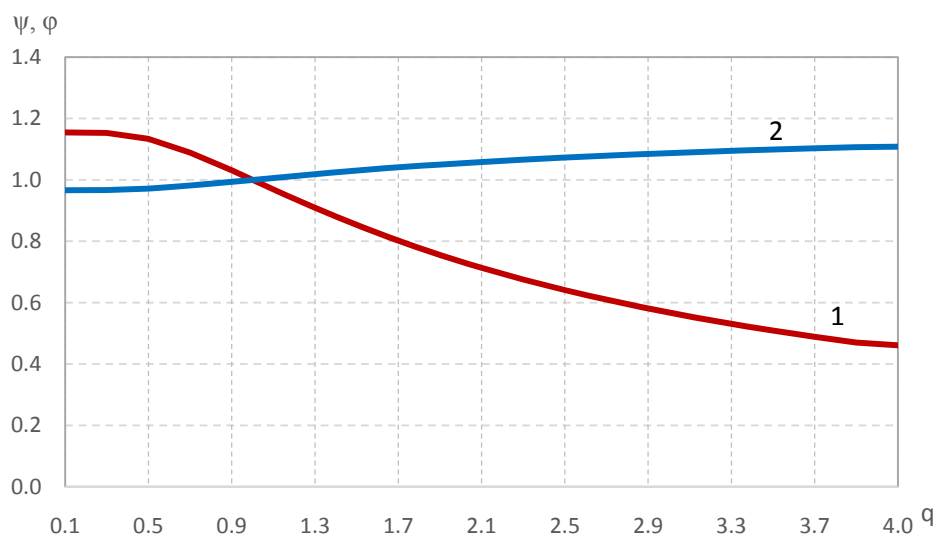
В исследуемом диапазоне изменения параметров функции снижения смертности и повышения рождаемости имеют вид:

$$\psi(q) = \frac{\bar{\mu}(c)}{\bar{\mu}(c_0)} = \frac{15,84 - 0,09c_0q}{15,84 - 0,09c_0}, \quad \varphi(q) = \frac{\bar{\beta}(c)}{\bar{\beta}(c_0)} = \frac{11,48 + 0,019c_0q}{11,48 + 0,019c_0}. \quad (8)$$

Зависимости (7) определим таким образом, чтобы на линейном участке они были равны найденным линейным уравнениям (8). Окончательный вид функций снижения смертности и увеличения рождаемости (рис. 7):

$$\psi(q) = 1,16 [1 - 0,99 \cdot \exp(-2/q)], \quad \varphi(q) = 0,97 [1 + 0,24 \cdot \exp(-1,91/q)]. \quad (9)$$

Исследования показали, что при увеличении потребления в 40 раз, смертность снижается на 40 %, а рождаемость увеличивается на 15 %.



*Рис. 7. Логистические функции:  
1 – снижения смертности; 2 – повышения рождаемости*

### **Заключение**

Таким образом, изучено влияние потребления на такие важные демографические показатели, как рождаемость и смертность. Для большинства регионов РФ при увеличении потребления смертность сокращается, а рождаемость увеличивается. Построены функции снижения силы смертности и повышения рождаемости в зависимости от потребления для регионов РФ. Получено, что увеличение потребления влияет существенным образом на снижение смертности, но в то же время на рождаемость оказывает очень малое влияние.

### **Список использованных источников и литературы**

1. Кузьмина, С. Н. Использование методов математического моделирования и инструментов экономики качества для обеспечения устойчивого развития социально-экономических систем / С. Н. Кузьмина, Н. В. Андросенко // *Науковедение : интернет-журнал.* – 2014. – № 6 (25). – DOI: 10.15862/155EVN614.
2. Беленький, В. З. Полное аналитическое решение макромоделей развития региона при экзогенном демографическом прогнозе / В. З. Беленький, К. В. Кетова // *Экономика и математические методы.* – 2006. – Т. 42, № 4. – С. 85–95.
3. Кетова, К. В. Об одной задаче макроэкономической динамики региона с учетом факторов экономического развития // *Вестник Ижевского государственного технического университета.* – 2007. – № 3. – С. 33–40.
4. Кетова, К. В. Об одной задаче управления демоэкономическим состоянием региона / К. В. Кетова, И. Г. Русяк // *Интеллектуальные системы в производстве.* – 2003. – № 2 (2). – С. 151–160.
5. Левина, Е. И. История демографии как науки и ее роль в современной макроэкономической ситуации в России // *Вестник ТГУ.* – 2008. – № 11. – С. 409–413.
6. Кетова, К. В. Математические модели экономической динамики : монография. – Ижевск: ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2013. – 284 с.
7. Боярский, А. Я. Модели демографических связей. – Москва : Статистика, 1972.

8. *Боярский, А. Я.* Население и методы его изучения // Сб. научных трудов. – Москва: Статистика, 1975. – 264 с.
9. *Вишневский, А. Г.* Воспроизводство населения и общество. – Москва : Финансы и статистика, 1982. – 287 с.
10. *Вишневский, А. Г.* Демографический потенциал России // Вопросы экономики. – 1998. – № 5. – С. 103–122.
11. *Венецкий, И. Г.* Статистические методы в демографии. – Москва : Статистика, 1977. – 208 с.
12. *Венецкий, И. Г.* Математические методы в демографии. – Москва : Статистика, 1971. – 296 с.
13. *Кетова, К. В.* Моделирование взаимосвязи демографических и макроэкономических процессов (на примере Удмуртской Республики) // Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО. – 2009. – № 3. – С. 55–58.
14. *Кетова, К. В.* Динамика рождаемости. Социально-экономическое исследование (на примере Удмуртской Республики) / К. В. Кетова, Я. И. Третьякова // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2020. – № 5-1 (63). – С. 196–205. – DOI: 10.24411/2411-0450-2020-10406.
15. *Кетова, К. В.* Социально-экономическое исследование основных причин смертности населения (на примере Удмуртской Республики) / К. В. Кетова, Е. Д. Давыдова // Дневник науки. – 2020. – № 4 (40). – С. 51.
16. Численность населения по полу и по возрасту – 2019 : стат. сб. // Федеральная служба государственной статистики. – 2019. – URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13284>.
17. *Кетова, К. В.* Анализ степени дифференциации населения Российской Федерации по уровню доходов / К. В. Кетова, И. Г. Русяк // E-Scio. – 2020. – № 6 (45). – С. 367–378.
18. *Кетова, К. В.* Структурно-динамический анализ доходов населения социально-экономической системы / К. В. Кетова, Н. В. Павлова // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2020. – № 6 (64). – С. 120–130. – DOI: 10.24411/2411-0450-2020-10545.
19. Регионы России. Социально-демографические показатели – 2020 : стат. сб. // Федеральная служба гос. статистики. 2020. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204>.
20. *Малкина, М. Ю.* Оценка социального благополучия российских регионов, уровня и динамики межрегиональных различий на основе функций благосостояния // Terra economicus. – 2016. – Т. 14, № 3. – С. 29–49. – DOI: 10.18522/2073-6606-2016-14-3-29-49.

## **Применение информационных технологий в прогнозировании энергопотребления в объектах гражданского строительства**

*П. С. Попов*

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*В статье приводятся сведения об использовании искусственных нейронных сетей и рассматривается прогнозирование энергопотребления с применением искусственной нейронной сети. В статье проведен анализ энергосетей и возможность применения искусственных нейронных сетей. В статье описаны варианты по разработке математической модели. Было проведено огромное количество исследований в области организации и управления проектами. В статье заверено, что искусственные нейронные сети улучшают любой процесс деятельности, и было бы разумным его применение в строительных работах, связанных с прогнозированием стоимости, производительности труда и оборудования, рисков и безопасности труда. В статье приведен пример возможного потенциала экономии с применением нейронных сетей в объектах гражданского строительства.*

**Ключевые слова:** энергосбережение, искусственные нейронные сети, объект гражданского строительства, жилищно-коммунальное хозяйство, энергопотребление.

Электроэнергетика – это одна из наиболее важных отраслей мирового хозяйства, включающая производство электроэнергии, распределение ее по линиям электропередач и сбыт потребителю [1].

Современная электроэнергетическая система обычно содержит в себе связанные между собой энергосистемы. Большая часть территорий страны, где присутствуют объекты генерации и передачи электроэнергии, обеспечиваются энергией этими системами. Стоит отметить, что ряд предприятий создают потенциал для увеличения промышленного производства, становясь развивающимся сегментом топливно-энергетического комплекса [2, 3]. Опять же участники электроэнергетического рынка, с одной стороны, должны придерживаться законодательной базы России. С другой – существует острая необходимость достижения минимизации расходов на электроэнергию на основе существующих тарифов и грамотного выбора ценовых категорий.

Технологический прогресс в электроэнергетике оказывает существенное влияние на развитие экономики страны, поскольку от улучшения производительности труда в этой отрасли будет происходить увеличение в потреблении энергии. В настоящее время особую актуальность имеет проблема устаревших энергосистем. Это ведет к выявлению неточности в определении качественного расчета потерь энергетических сетей. Использование искусственных нейрон-



ных сетей (ИНС) позволит решить ряд важных проблем в области электроэнергетики [4].

Цель обучения ИНС состоит в корректировке весовых коэффициентов связей [6]. Для этого необходимо иметь некоторый набор входных и выходных данных. Процесс обучения происходит следующим образом: входные данные подаются в нейронную сеть, где проходят обработку внутри структуры. Далее сеть вычисляет выходные значения, которые сравнивает с требуемыми выходными данными. Если данные не совпадают, то нейронная сеть корректирует весовые коэффициенты внутри системы до тех пор, пока выходные данные не станут отличаться от заданной точности.

Основными задачами, решаемыми с помощью ИНС, являются:

- прогнозирование (прогнозирование потребления электроэнергии, ее выработки и т. д.);
- оптимизация (режимов работы объектов энергосистем, потребления, конфигурации сетей и пр.);
- предсказание (мониторинг состояния энергетических объектов);
- кодирование и декодирование (преобразование входных и выходных данных в определенный вид);
- задачи принятия решений и управление.

ИНС используются в различных сферах электроэнергетики: для определения прогнозирования выработки потребления электроэнергии и оптимизирования работы электрооборудования, для предупреждения чрезвычайных ситуаций в электросетях и в оценке их состояния после произошедших аварий.

Переход на цифровые системы и отказ от аналоговых приведет к интеллектуализации отрасли, порождая энергоинформационную инфраструктуру внутри нее. Первым шагом должно быть создание сетей средствами «умных» технологий и последующая эволюция в интеллектуальные сети.

Поскольку показатели объема потребления электроэнергии постоянно увеличиваются, происходит скачок пиковых нагрузок, что приводит к необходимости усиления передающей мощности электросети. В связи с этим возникает проблема роста потребления. Очевидное решение – увеличение мощностей передающих сетей, но возникает риск снижения уровня обслуживания, зависящий от движения темпа роста.

Отказ от решения данной проблемы приведет к необходимости в момент пиковых нагрузок отключать пользователей от энергосети, что неизбежно приведет к недовольству со стороны потребителей. Такие случаи уже происходили в Италии, США и Канаде. Убытки насчитывались свыше десяти миллиардов долларов [7–9].

Существует три варианта развития энергосетей. Первый вариант говорит об отсутствии инвестиций в модернизацию. Это поможет в краткосрочной перспективе сократить расходы, но в конечном итоге приведет к непредсказуемым последствиям из-за устаревшего оборудования прошлого столетия.

Второй вариант основан на инвестициях в наращивание избыточной мощности. Эта стратегия является дорогостоящей по одной простой причине –

традиционная энергосеть основана на принципе неблагоприятных сценариев, что приводит к замене компонентов раньше, чем это необходимо.

Третий вариант дает возможность уменьшить риск катастрофы без неадекватных затрат на модернизацию. «Умная сеть» включает в себя сенсорные индикаторы, сетевую аналитику, мониторинг в режиме реального времени, а также реконфигурацию сетей.

«Умные сети» дают возможность реализовать график пиковых нагрузок с помощью использования сетевых приборов слежения. Компании могут начать вводить повременной тариф – брать дополнительную плату в момент пиковых нагрузок. Это решит проблему за счет постоянного стимулирования использования электроэнергии в периоды без пика [10, 11].

Данные сети дают возможность увидеть быстрые скачки в потреблении энергии, счет информации, полученной на данный момент. Кроме этого, они позволяют нам видеть количество потребления энергии в ближайшем будущем.

Основа «умной» сети: сетевая аналитика, дистанционный мониторинг оборудования, автоматизированный анализ информации.

Сетевая аналитика позволяет выбрать направления инвестиций в оборудование, которое в ближайшем будущем может дать сбой, перенастроить в случае отключения энергоснабжения, оптимизировать конфигурацию сети.

Автоматизированное считывание показателей сможет не только сократить необходимость в электроэнергии, но и уменьшить ее место сохранения. Этого можно добиться путем установки «Умных» приборов, так как именно они дают людям возможность изменять тарифы в зависимости от количества, которое они затрачивают.

Благодаря информации о месте и природе сбоя, данная инфраструктура позволяет отслеживать сети низкого напряжения и ставить ограничения, тем самым снижая уровень максимальной энергии. Также она сокращает затраты на управление клиентами более чем на сорок процентов, при этом снижая потери энергии и конфликтов с потребителями.

Удаленный мониторинг оборудования позволяет получить два потока информации: соответствие нагрузки сети ее мощности и сбои в оборудовании. Данная информация позволяет оператору регулировать нагрузку компонентов и менять конфигурацию сети для того, что уменьшить нагрузку на оборудование, также это позволяет оперативно предупреждать малейшие отклонения в работе оборудования [1, 11]. Подобные приборы помогут увеличить качество уровня обслуживания с помощью дистанционного сканирования и определения узких мест и неожиданных сбоев в сети.

Управление мобильной рабочей силой ускоряет ремонт в местах аварии за счет электронной оптимизации потока данных от датчиков. Техники получают точную информацию о месторасположении аварии и необходимом оборудовании для ремонта благодаря мобильным устройствам PDA. Данные от датчиков не только говорят о уже произошедшей аварии, но и могут предупредить о возможных сбоях оборудования, таким образом, управление мобильной рабочей силой позволяет оперативно устранять все неполадки.

Внедрение «умной» сети электроэнергии сама по себе сложная задача, но потенциальные выгоды заставляют сетевые компании пойти на этот шаг.

Если мы возьмем опыт граждан Российской Федерации, то заметим тенденцию, которая приводит к огромным недовольствам клиентов. Кроме этого, есть другая отрицательная сторона – недостаточное развитие страны в выбранной отрасли. Один из выходов этой ситуации заключается во внедрении нового подхода, который поможет справиться с поставленной проблемой. Метод раскроется в особом тарифном плане, дистанционном управлении, особом контроле потребителей и, безусловно, обратной связью с ними. Иными словами, «Умные сети» вполне могут стать лучшей альтернативой всему, что существует на данный момент.

Извечная проблема каждого нового принципа – это способ его применения. Переход на новую систему будет фундаментально базироваться на сетевой аналитике, автоматизированных приборах учета, удаленном доступе к любому контролю. Обращая внимание на опыт других стран, мы можем заметить то, что внедрение ИНС в электроэнергетику кардинально изменит потребление энергии, сделав его абсолютно рациональным.

В настоящий момент образующиеся при нейромоделировании задачи реализуются способами, которые ведут к созданию условий повышения качества самого нейромоделирования [9, 11]. Одной из ветвей развития в данном контексте будет распараллеливание сервисных процедур: схемы отбора примеров в излучающихся отраслях, способы оптимизации начальной обработки информации, гибридные методы, отбор информативных независимых переменных и так далее. Можно отметить то, что каждый профессиональный пользователь нейротехнологий старается использовать только собственные сервисные алгоритмы, так как каждый человек имеет свое собственное виденье на любое происходящее событие в нашем мире.

Скорость работы программ при практическом программировании можно повысить, если задать запрос программного числа параллельных процессов и размеров их сохранения. Таким образом, получится добиться сверхлинейного ускорения всех действий при условии, что был выбран оптимальный вариант разделения задач между процессорами с учетом совместимости данных, с которыми работает процессор.

Таким образом, мы можем сказать, что ИНС улучшают любой процесс деятельности, и было бы разумным его применение в строительных работах, связанных с прогнозированием стоимости, производительности труда и оборудования, рисков и безопасности труда. Прогнозирование входных параметров с высокой степенью вероятности учета оценки рисков и оптимизации потоков главенствующих ресурсов ИНС способны анализировать и обрабатывать значительные массивы статистических данных. ИНС можно применять в различных объектах гражданского строительства по аналогии с их применением в электроэнергетике [1, 3].

С точки зрения машинного обучения нейросети будут являться особым вариантом отображения методов распознавания образов, дискриминантного

анализа, методов кластеризации и подобных им. Иными словами, решение комплексной задачи усовершенствования систем и будет являться обучением нейронных сетей. Основываясь на точные науки, мы может дать определение, что нейронная сеть – метод разрешения эффективного параллелизма.

При исследовании, моделировании и разработке нейросетей особое внимание должны уделяться их возможностям, таким как работа в реальном времени, грамотное и полное использование поступающей в систему информации, память о предыдущих прецедентах. Обязательным условием будет сохранение возможности беспрепятственно и в непрерывном режиме обрабатывать и анализировать всю поступающую информацию.

Нейроны, по аналогии с клетками мозга, выступают в качестве относительно простых и однотипных элементов. Они объединены друг с другом посредством входов и выходов, транслируя через них сигналы возбуждения и торможения. Для наглядного отображения подобного взаимодействия, в случае искусственных нейронов обычно используется математическая теория оптимального решения. Данными, которые способны влиять на результат расчета, в данном случае будут выступать физические свойства отдельного элемента, входные данные и сама топология сети, а сила влияния одного элемента на другой может быть описана весовым коэффициентом взаимодействия нейронов.

Подводя итог, можно сказать о возможности применения нейронных сетей для решения ряда проблем в различных областях. ИНС могут быть построены на основе достаточно простых моделей, и для первого этапа перехода к интеллектуализации сетей предприятия этого будет более чем достаточно. Впоследствии в процессе обучения ИНС будет совершенствоваться и сама система. Совмещение методов энергетического менеджмента, «умных сетей», построенных на ИНС, и постепенно обновление энергосистемы страны в перспективе приведут к улучшению качества жизни в целом.

#### **Список использованных источников и литературы**

1. *Бабанова, И. С.* Применение искусственных нейронных сетей в задачах прогнозирования энергопотребления для предприятий минерально-сырьевого комплекса // *Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире : материалы IX Международной науч.-практ. конф. – 2015. – Т. 1. – С. 128–134.*

2. *Abramovich B. N., Babanova I. S.* Improvement of monitoring system commercial electricity accounting for compressor plants on the enterprises for gas industry. Efficiency and sustainability in the mineral industry innovation in Geology, Mining, Processing, Economics, Safety and Environmental Management. Scientific reports on resource issues (2015), TU Bergakademie Freiberg, val. 1, pp. 383-386.

3. *Абрамович, Б. Н.* Автоматизированные системы управления энергопотреблением горных предприятий / *Б. Н. Абрамович, И. С. Бабанова* // *Материалы XII Международной научной школы молодых ученых и специалистов, 23–27 ноября. – 2015. – С. 225–229.*

4. *Абрамович, Б. Н.* Применение искусственных нейронных технологий в процессе преподавания дисциплин электротехнического цикла / *Б. Н. Абрамович, И. С. Бабанова* // *Современные образовательные технологии в преподавании естественно-научных и гуманитарных дисциплин : сборник научных трудов II Междуна-*

родной науч.-метод. конф. 09–10 апреля (2015). «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – Санкт-Петербург, 2015. – С. 229–234.

5. *Бабанова, И. С.* Разработка перспективного планирования энергосистемы на основе создания модели искусственной нейронной сети / И. С. Бабанова, Б. Н. Абрамович // *Материалы XI Международной научной школы молодых ученых и специалистов*, 24–28 ноября. – 2014. – С. 388.

6. *Попов, П. С.* Повышение эффективности применения технологий энергоресурсосбережения / Попов П. С., Бочкарева П. А., Козлов И. А. // *Материалы III Международной конференции В. И. Кудинова*. – Ижевск, 2020. – С. 203–210.

7. *Weron, Rafal.* Modelling and forecasting electricity loads and prices. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd (2006).

8. *Charytoniuk W., Chen M. S.* Very Short-Term Load Forecasting Using ANN. *IEEE Transactions on Power Systems* 15 (1), pp. 263-268.

9. *Huseynov A. F., Yusifbeyli N. A. and Hashimov A. M.* (2010). “Electrical System Load forecasting with Polynomial Neural Networks (based on Combinatorial Algorithm)”. *Modern Electric Power Systems 2010*, Wroclaw, Poland, MEPS’10, paper 04.3.

10. *Samsher K. S. and Unde M. G.* (2012). Shortterm forecasting using ANN technique. *International Journal of Engineering Sciences and Engineering Technologies*, Feb. (2012), ISSN: 2231-6604. Vol. 1, issue 2, pp. 97-107 © IJSEST.

11. *Balwant Singh Bisht, Rajesh M Holmukhe.* Electricity load forecasting by artificial neural network model using weather data. *International journal of electrical engineering& technology (ijeet)* Vol. 4, Issue 1, January-February (2013), pp. 91-99.

12. *M. Olama Mohammed, Teja Kuruganti, James Nutaro, Jin Dong.* Coordination and control of building HVAC systems to provide frequency regulation to the electric grid, Received 29 July (2020), Revised 6 February (2021), Accepted 20 April (2021), Available online 5 May (2021). *Journal Energy*.

13. *M. Olama Mohammed, Teja Kuruganti, James Nutaro, Jin Dong.* A hierarchical optimal control strategy for continuous demand response of building HVAC systems to provide frequency regulation service to smart power grids, Received 29 July (2020), Revised 6 February (2021), Accepted 20 April (2021), Available online 5 May (2021). *Journal Energy*.

## Применение машинного обучения для кластеризации регионов России по социально-экономическому положению

Д. Ю. Раимова

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*В работе приведен анализ социально-экономических показателей развития регионов России. Для выявления региональных кластеров применены методы машинного обучения. Базой данных, использованной в работе, являлись реальные статистические данные за 2019 год по социально-экономическому положению региона и отраслевой структуре ВРП. Выполнена предобработка исходных данных: стандартизация данных, оцифровка категорий данных, обработка пустых данных и статистических выбросов, понижение размерности методом главных компонент. Кластеризация регионов выполнена с использованием различных алгоритмов машинного обучения. Установлено, что целесообразно выделить 3 региональных кластера.*

**Ключевые слова:** машинное обучение, социально-экономические показатели, отраслевая структура ВРП, кластерный анализ, метод главных компонент.

### Введение

Интенсивное развитие экономики России оказывает влияние на территориальную дифференциацию регионов по различным показателям [1]. Регионы РФ отличаются друг от друга по социально-экономическим показателям, поэтому для принятия управленческих решений нужно выделять региональные кластеры.

Применение методов машинного обучения для решения задач кластеризации регионов является актуальной задачей на сегодняшний момент [2–5].

### Показатели социально-экономического положения регионов

Кластеризация регионов России выполнялась по показателям социально-экономического положения регионов [6, 7], приведенных в таблице.

#### Показатели социально-экономического развития региона

Группа	Наименование показателя	Обозначение	Использование в исследовании
Федеральные округа	ЦФО, СЗФО, ЮФО, СКФО, ПФО, УрФО, СФО, ДФО	–	Фиктивные переменные
Основные социально-экономические показатели	Численность населения	$X_1$	–
	Стоимость основных фондов	$X_8$	$Y_4 = X_8 / X_1$
	Добыча полезных ископаемых	$X_9$	$Y_5 = X_9 / X_1$
	Сельское хозяйство	$X_{13}$	$Y_9 = X_{13} / X_1$ $PCA_1$

Продолжение таблицы

Группа	Наименование показателя	Обозначение	Использование в исследовании
	Обрабатывающие производства	$X_{10}$	$Y_6 = X_{10}/X_1$ $Y_7 = X_{11}/X_1$ $Y_8 = X_{12}/X_1$ $PCA_2$
	Обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха	$X_{11}$	
	Водоснабжение; водоотведение, организация сбора и утилизации отходов, деятельность по ликвидации загрязнений	$X_{12}$	
	Оборот розничной торговли	$X_{15}$	$Y_{10} = X_{15}/X_1$
	Сальдированный финансовый результат	$X_{16}$	$Y_{11} = X_{16}/X_1$
Население	Соотношение мужчин и женщин	$X_{19}$	$X_{19}$
	Возрастной состав населения младше трудоспособного возраста	$X_{20}$	$X_{20}$
	Возрастной состав населения в трудоспособном возрасте	$X_{21}$	$X_{21}$
	Возрастной состав населения старше трудоспособного возраста	$X_{22}$	$X_{22}$
	Общие коэффициенты рождаемости	$X_{23}$	$X_{23}$
	Общие коэффициенты смертности	$X_{24}$	$X_{24}$
	Коэффициенты младенческой смертности	$X_{25}$	$X_{25}$
	Соотношение браков и разводов	$X_{26}$	$X_{26}$
Занятость и безработица	Уровень безработицы	$X_{34}$	$X_{34}$
	Среднегодовая численность занятых	$X_2$	$Y_1 = X_2/X_1$
	Потребность в работниках, заявленная работодателями	$X_{17}$	$Y_{12} = X_{17}/X_1$
	Численность работников государственных органов и органов местного самоуправления	$X_{27}$	$Y_{13} = X_{27}/X_1$
Уровень жизни населения	Средняя номинальная начисленная заработная плата работников организаций	$X_5$	$PCA_3$
	Среднедушевые денежные доходы населения	$X_3$	
	Потребительские расходы в среднем на душу населения	$X_4$	
	Средний размер назначенных пенсий	$X_{29}$	
	Площадь жилых помещений, приходящая в среднем на одного жителя	$X_{14}$	$X_{14}$
	Жилищный фонд	$X_{30}$	$Y_{14} = X_{30}/X_1$
	Использование свежей воды	$X_{32}$	$Y_{16} = X_{32}/X_1$
Инвестиции	Поступление прямых иностранных инвестиций в РФ	$X_{33}$	$Y_{17} = X_{33}/X_1$

Группа	Наименование показателя	Обозначение	Использование в исследовании	
	Инвестиции в основной капитал	$X_7$	$Y_3 = X_7 / X_1$	
Образование, здравоохранение	Численность аспирантов	$X_{31}$	$Y_{15} = X_{31} / X_1$	
	Численность населения на одну больничную койку	$X_{18}$	$X_{18}$	
ВРП	Валовой региональный продукт	$X_6$	$X_6$	
	Отраслевая структура ВРП:			
	Добыча полезных ископаемых	$D_2$	$PCA_4$	
	Торговля оптовая и розничная; ремонт автотранспортных средств и мотоциклов	$D_7$		
	Деятельность в области информации и связи	$D_{10}$		
	Деятельность по операциям с недвижимым имуществом	$D_{12}$		
	Деятельность в области здравоохранения и социальных услуг	$D_{17}$		
	Деятельность в области культуры, спорта, организации досуга и развлечений	$D_{18}$		
	Деятельность домашних хозяйств как работодателей	$D_{19}$		
	Сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство	$D_1$		$PCA_5$
	Обрабатывающие производства	$D_3$		
	Строительство	$D_6$		
	Деятельность финансовая и страховая	$D_{11}$		
	Деятельность профессиональная, научная и техническая	$D_{13}$		
	Государственное управление и обеспечение военной безопасности; социальное обеспечение	$D_{15}$		
	Образование	$D_{16}$		
	Водоснабжение; водоотведение, организация сбора и утилизации отходов, деятельность по ликвидации загрязнений	$D_5$	$PCA_6$	
	Транспортировка и хранение	$D_8$		
	Деятельность административная и сопутствующие дополнительные услуги	$D_{14}$		
		Обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха	$D_4$	$PCA_7$
		Деятельность гостиниц и предприятий общественного питания	$D_9$	



Часть показателей вошла в исследование в исходном виде (например,  $X_{19}$ ,  $X_{26}$ ), часть показателей переводились к удельным значениям (например,  $X_8 \rightarrow Y_4$ ,  $X_{30} \rightarrow Y_{14}$ ), а для ряда показателей выполнено снижение размерности методом главных компонент (РСА) [8].

На рисунке 1 представлена тепловая карта (HeatMap) коэффициентов корреляции Пирсона между удельными переменными  $Y_5, Y_6, Y_7, Y_8, Y_9$  и полученными для них методом РСА главными компонентами  $PCA_1$  и  $PCA_2$ .

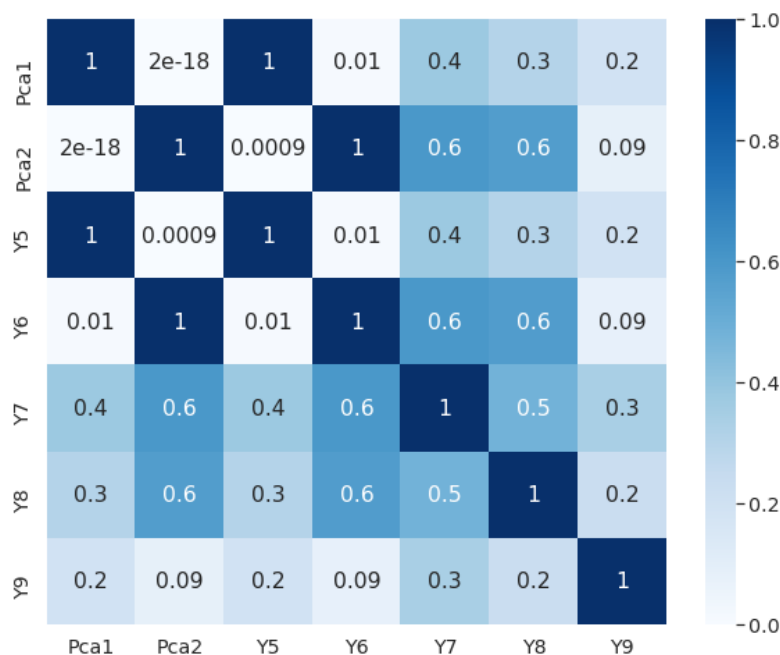


Рис. 1. HeatMap отображение коэффициентов корреляции Пирсона между переменными  $Y_5, Y_6, Y_7, Y_8, Y_9$  и главными компонентами

Из рисунка 1 видно, что главная компонента  $PCA_1$  отвечает за переменные  $Y_5$  и  $Y_9$ , главная компонента  $PCA_2$  отвечает за переменные  $Y_6, Y_7, Y_8$ .

В результате использования удельных значений и снижения размерности вместо 52 показателей при решении задачи кластеризации регионов использовалось 38 переменных.

Перед применением методов машинного обучения переменные стандартизировались с использованием функции `sklearn.preprocessing.scale` [8].

### Кластеризация регионов по социально-экономическому положению

Для выявления региональных кластеров применяются методы машинного обучения, предназначенные для решения задачи кластеризации. Устойчивый алгоритм кластеризации представлен в работах [9, 10] и состоит из двух последовательных этапов: иерархический кластерный анализ, который используется для определения оптимального количества кластеров; метод k-средних, применяется для устойчивого распределения объектов по кластерам.

Иерархическая кластеризация выполнена с использованием модели машинного обучения `sklearn.cluster.AgglomerativeClustering` [8]. По результатам иерархического кластерного анализа выполнено построение дендрограммы (см. рис. 2). Из дендрограммы видно, что оптимальное число кластеров равно 3.

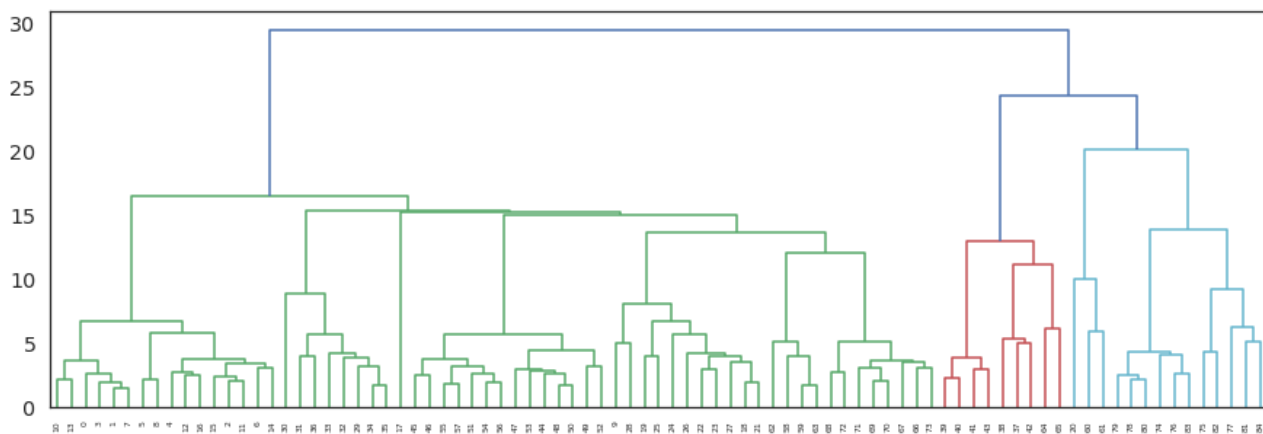


Рис. 2. Дендограмма иерархической кластеризации регионов России

Моделью машинного обучения `sklearn.cluster.KMeans` [8] проверена устойчивость распределения регионов по кластерам. В результате применения различных методов объединения получены одинаковые результаты кластеризации на ярко выраженные три группы.

По результатам применения модели `KMeans` получен график совместных распределений главных компонент, отвечающих за отраслевую структуру ВРП:  $PCA_4$ ,  $PCA_5$ ,  $PCA_6$ ,  $PCA_7$  (см. рис. 3).

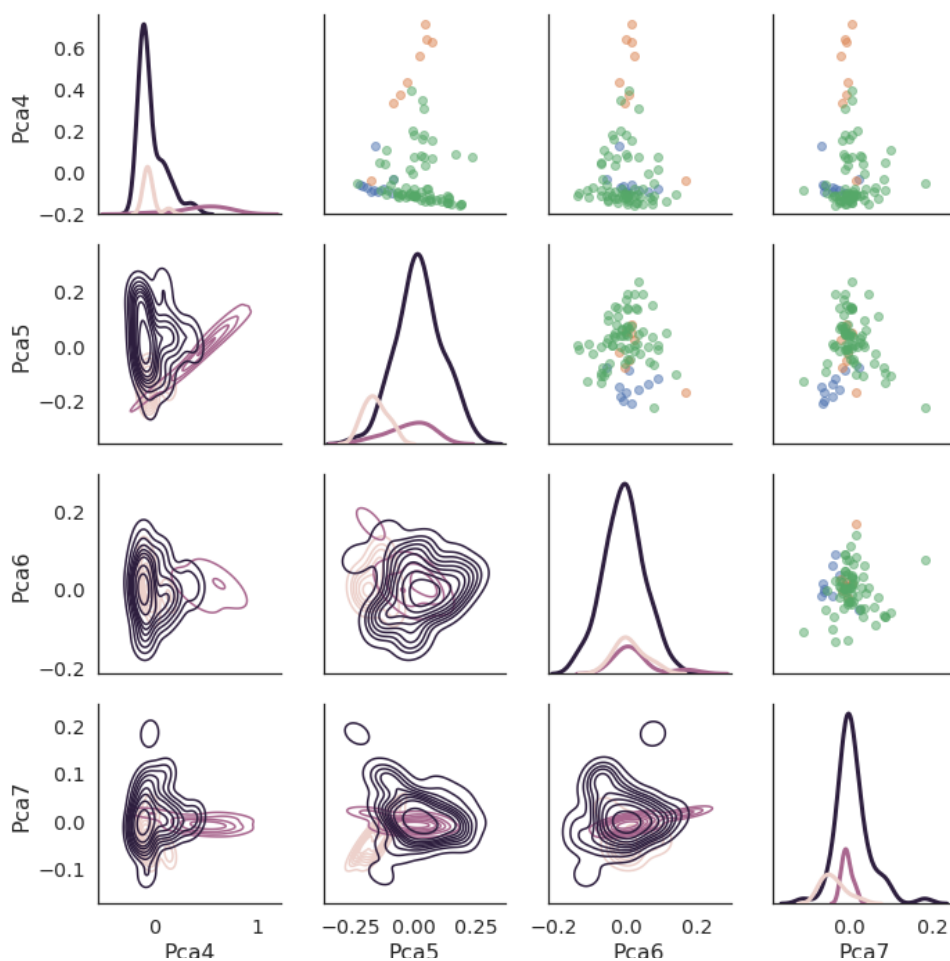


Рис. 3. Совместное распределение главных компонент отраслевой структуры ВРП

Из рис. 3 видно, что распределения главных компонент, которые отвечают за отраслевую структуру ВРП, отличаются в зависимости от кластера.



Рис. 4. Цветограмма распределения кластеров России по территории

## Заключение

С использованием методов машинного обучения выпалена кластеризация регионов России, в ходе которой сформированы три региональных кластера согласно социально-экономическому положению регионов и отраслевой структуре валового регионального продукта.

## Список использованных источников и литературы

1. Мичкова, А. С., Касаткина, Е. В. Дифференциация регионов Приволжского федерального округа методами кластерного анализа / А. С. Мичкова, Е. В. Касаткина // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке : сборник материалов III Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием: электронное научное издание. – 2015. – С. 485–489.

2. Жолудева, В. В. Применение кластерного анализа для оценки социально-экономического развития регионов на примере ЦФО и Ярославской области / В. В. Жолудева, Н. Ф. Мельниченко, Г. В. Козлов // Статистика и экономика. – 2014. – № 1.

3. Логинова, Ю. А. Дифференциация регионов с учетом отраслевой структуры валового регионального продукта / Ю. А. Логинова, Е. В. Касаткина // Новая наука: теоретический и практический взгляд : сборник материалов Международной научно-практической конференции. – 2017. – С. 203–212.

4. Кричевский, М. Л. Использование методов машинного обучения для оценки инвестиционной деятельности различных регионов России / М. Л. Кричевский,

Ю. А. Мартынова // Вопросы инновационной экономики. – 2019. – Т. 9, № 4. – С. 1557–1572.

5. *Логинова, Ю. А.* Опыт применения генетического алгоритма для решения задачи дифференциации регионов / Ю. А. Логинова, Е. В. Касаткина // Современные тенденции в научной деятельности : сборник материалов XXVII Международной научно-практической конференции. – 2017. – С. 15–19.

6. Федеральная служба государственной статистики. Регионы России. Социально-экономические показатели. – URL: [https://gks.ru/bgd/regl/b20\\_14p/Main.htm](https://gks.ru/bgd/regl/b20_14p/Main.htm) (дата обращения: 22.05.2021).

7. *Насридинова, Д. Д.* Построение и анализ производственной функции экономической системы удмуртской республики / Д. Д. Насридинова, Е. В. Касаткина // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке. – 2013. – С. 706–710.

8. Машинное обучение на Python. – URL: <https://scikit-learn.org> (дата обращения: 22.05.2021).

9. *Кетова, К. В.* Применение кластерного анализа для решения задачи оптимального распределения топливно-энергетических ресурсов / К. В. Кетова, Р. Ю. Кривенков, Е. В. Трушкова // Интеллектуальные системы в производстве. – 2010. – № 2 (16). – С. 207–213.

10. *Кетова, К. В.* Решение логистической задачи топливоснабжения распределенной региональной системы теплоснабжения / К. В. Кетова, Е. В. Трушкова // Компьютерные исследования и моделирование. – 2012. – Т. 4, № 2. – С. 451–470.

## **Выявление иерархических структур на цифровых изображениях с использованием нейронной сети глубокого обучения**

*Р. А. Седов, В. Г. Суфиянов*

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*В данной работе представлены обзор исходных данных, подготовка (предобработка) данных для обучения и результаты обучения нейронной сети глубинного обучения для выявления иерархических структур на цифровых изображениях.*

**Ключевые слова:** иерархические структуры, распознавание образов, анализ изображений, нейронные сети, глубокое обучение.

### **Введение**

В настоящее время быстрыми темпами развиваются методы глубокого обучения, как основного направления машинного обучения. С помощью нейронных сетей глубокого обучения осуществляется решение таких задач, как распознавание речи, обработка естественного языка, обычная и семантическая сегментация цифровых изображений.

Для того чтобы решить задачу выявления иерархических структур на цифровых изображениях, необходимо выполнить несколько этапов предобработки исходных данных: выполнить ручную разметку необходимых объектов на изображениях, выделить основные фильтры, для которых будут наблюдаться наилучшие условия для приобретения сетью обобщающей способности, применение искусственных аугментаций.

В качестве фильтров улучшения качества изображений могут выступить стандартные операции: усиление/ослабление резкости, контрастности, яркости; добавление/удаление размытия, выравнивание гистограммы изображения.

### **Подготовка исходных данных**

Исходными данными для обучения сверточной нейронной сети (CNN) являются цифровые изображения, обладающие следующими характеристиками:

1. Цветовое пространство – RGB.
2. Разрешение – 2048×1536 пикселей.
3. Глубина цвета – 24.

На рис. 1 представлена выборка из 3 экземпляров исходных данных.

Как видно из рис. 1, иерархические структуры на каждом экземпляре имеют разную форму, кривизну, уровни вложенности, цвет. Данный факт усложняет задачу выделения структур на цифровых изображениях, поэтому было принято решение осуществлять ручную разметку иерархических структур.

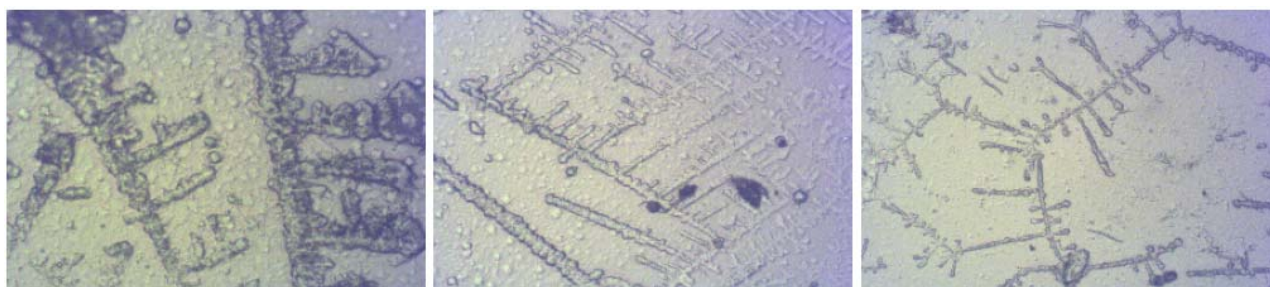


Рис. 1. Часть выборки исходных данных цифровых изображений

В качестве инструмента ручной разметки была выбрана система с открытым исходным кодом CVAT [1]. Основной задачей системы является предоставление пользователю удобных и эффективных средств разметки наборов данных [1]. Данная система является веб-приложением, что означает – нет необходимости в установке дополнительного программного обеспечения. Также поддерживается режим разделения на задачи, что позволяет осуществлять делегацию выполнения на других пользователей.

Конечным результатом ручной разметки является набор масок исходных изображений, где значение пикселя определяется следующим образом:

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, & g_{ij} \in S, \\ 0, & g_{ij} \notin S, \end{cases} \quad (1)$$

где  $p_{ij}$  – значение пикселя маски;  $g_{ij}$  – значение исходного изображения;  $S$  – множество точек, относящихся к иерархической структуре.

Результат разметки для 3 экземпляров исходных изображений (рис. 1) представлен на рис. 2.

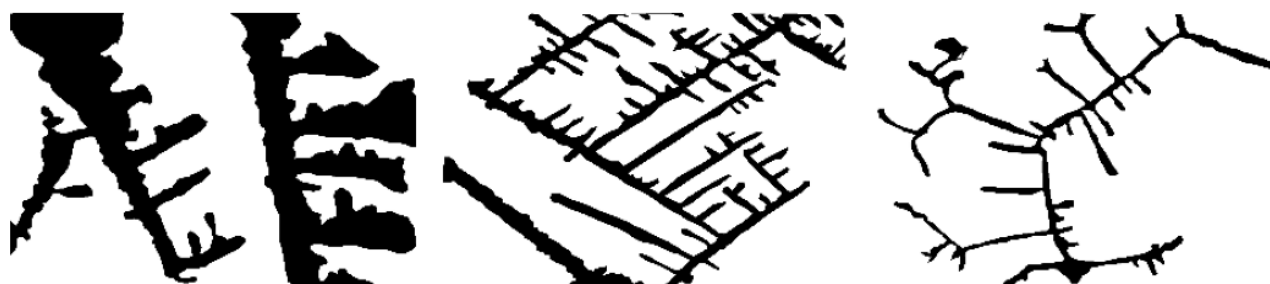


Рис. 2. Пример полученных масок изображений после процесса ручной разметки

Как видно из рис. 2, значение каждого пикселя маски в соответствии с формулой (1) принимает значение 1, если данный пиксель относится к структуре, и значение 0, если пиксель относится к фону.

Главной характеристикой при решении задачи выявления иерархических структур на изображениях является ее контур или же граница. Данную характеристику необходимо установить на полученных масках изображений для того, чтобы осуществить большой вклад в обобщающую способность сверточной нейронной сети. Данный факт обуславливается тем, что сети будет проще определить границу, нежели целое множество структуры, исходя даже из вычислительных затрат.



На рис. 3 изображен пример создания обводки, где белый цвет (значение 0) соответствует фону, черный цвет (значение 1) соответствует иерархической структуре, а зеленый цвет (значение 2) соответствует границе (контуру) иерархической структуры. Набор цветов несет исключительно иллюстративный характер.

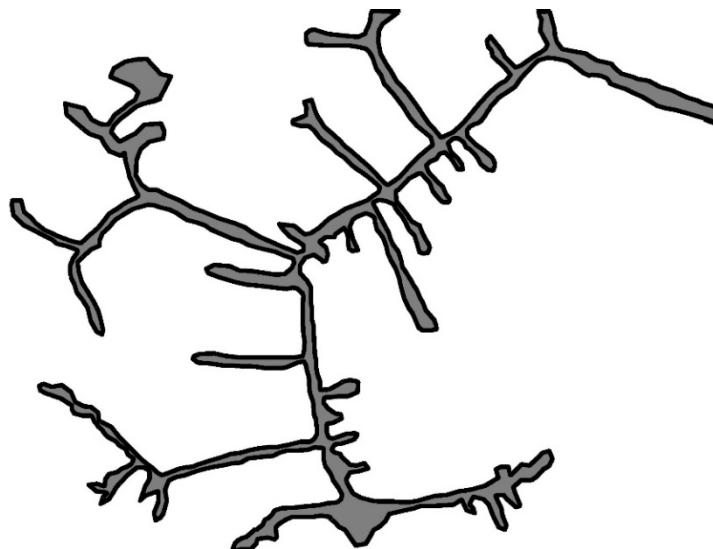


Рис. 3. Пример создания обводки

Следующим этапом подготовки исходных данных является создание искусственных аугментаций. Под аугментацией понимается такой процесс, результатом которого будет увеличение количества экземпляров выборки путем выполнения простейших действий, например, осуществление операций с цветом (регулирование каналов цветового пространства, регулирование контраста, резкости и яркости), геометрические операции (поворот, масштабирование, отражение, переворот и т. д.). Применение аугментаций необходимо тогда, когда выборка данных слишком мала и необходимо защититься от переобучения модели. Самый простой вариант аугментации представлен на рис. 4.



Рис. 4. Пример применения простой аугментации

Под простой аугментацией на рис. 4 понимается осуществления двух операций – переворот и отражение изображения. Данная аугментация приведет к тому, что количество экземпляров в итоговой выборке увеличится в 3 раза, что окажет положительный эффект при обучении модели.

## Описание нейронной сети

CNN – архитектура искусственных нейронных сетей, имеющая высокую эффективность при решении задач сегментации цифровых изображений, а также распознавание образов. Общий смысл любой CNN-сети – использование сверток для создания карт признаков (абстракции), которые в свою очередь, по мере уменьшения основной размерности изображения, но увеличения глубины, ведут к свойствам более высокого уровня. Под свойствами будем понимать наличие различного рода кривых, прямых линий, изгибов, поворотов и т. д. Типовая архитектура сети CNN представлена на рис. 5.

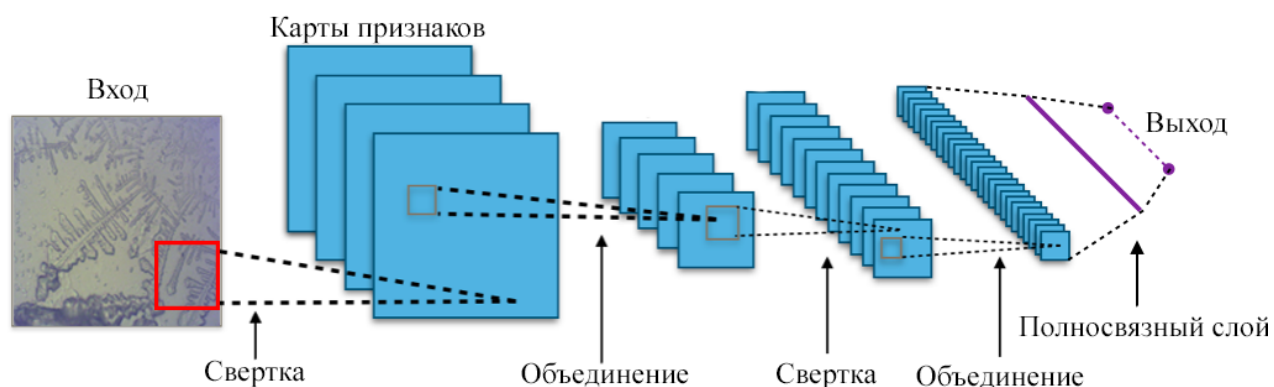


Рис. 5. Типовая архитектура сети CNN

Как видно из рис. 5, в архитектуре сети имеется несколько блоков, также называемых строительными блоками. В качестве основных блоков (первых) используются сверточные слои, их основная задача – вычислить веса следующего слоя, исходя из весов ядра свертки и рецепторного поля. Веса карты признаков получаются следующим образом:

$$W = I * K, \quad (2)$$

где  $I$  – входное изображение текущего слоя;  $K$  – ядро фильтра (матрица  $3 \times 3$  или  $5 \times 5$ );  $W$  – выходные веса карты признаков. Важно отметить тот факт, что ядро фильтра ( $K$ ) должны описывать определенное свойство, например, матрица

$$K = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

является фильтром для поиска на исходном изображении вертикальных линий.

Для экономии вычислительных ресурсов используются объединяющие слои, их смысл кроется в том, что нет необходимости дорожить огромным количеством параметров о том или ином свойстве, важнее знать, есть данное свойство у изображения или нет. Наиболее популярным объединением является объединение по максимуму, его смысл заключается в том, чтобы брать только максимальные элементы среди некоторого поля (например, матрица  $2 \times 2$ ).



В рамках выявления иерархических структур было принято решение использовать сеть типа MobileNetV2. Данная сеть реализована компанией Google в 2018 году, особенностями данной сети выступают: высокая скорость отклика (прогноза), меньшее количество параметров (нейронов) по сравнению с аналогичными CNN сетями, как следствие, малое требование к оперативной памяти [3].

В качестве среды разработки для реализации и обучения сети использовалась удаленная платформа для машинного обучения – Google Colab, так как для обучения такого рода сети с учетом большого набора данных требуется соответствующее количество оперативной памяти и вычислений на графических процессорах.

### Обучение нейронной сети

Реализованная нейронная сеть во входном слое принимает следующий тензор:

$$\vec{x} = (128, 128, 3, N), \quad (5)$$

где  $N$  – количество элементов партии.

В результате ручной разметки была получена выборка из 17 экземпляров изображений, являющаяся словарем по типу «изображение, маска». После применения аугментаций выборка получилась с количеством 51 экземпляр.

В результате проведенных параметрических экспериментов был установлен следующий паспорт модели:

1. Разделение выборки на обучающую и эволюционную – 70:30.
2. Количество эпох обучения – 10.
3. Размер партии обучения – 32.

В качестве оценки качества работы сегментации была применена кросс-энтропийная функция потерь:

$$H(y, \hat{y}) = \sum_i y_i \log \frac{1}{\hat{y}_i}. \quad (6)$$

В качестве метода минимизации ошибки сети использовался метод градиентного спуска.

График зависимости точности сети на обучающей и эволюционной выборках представлен на рис. 6.

Как видно из рис. 6, точность на обучающей выборке приблизилась к 99 %, а точность на тестовой выборке к 84 %. Исходя из данных показателей точности можно прийти к выводу – сеть приобрела обобщающую способность. Визуальное представление прогноза сети для некоторого экземпляра представлена на рис. 7.

Как видно из рис. 7, сеть хорошо справилась с выявлением иерархической структуры, так как точность сети на тестовой выборке равна 84 %, то это означает, что не все пиксели границы или участка самой структуры были распознаны точно.

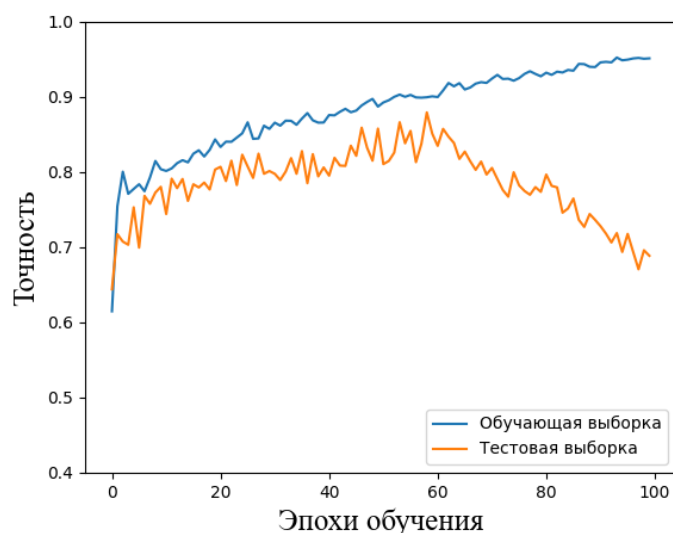


Рис. 6. График точности сети на обучающей и тестовой выборках



Рис. 7. Визуальное представление прогноза сети

## Выводы

1. Исходные данные были подготовлены для обучения сверточной нейронной сети, а именно, выполнена ручная разметка иерархических структур, выполнены простые аугментации, созданы обводки границ.
2. Была реализована и обучена CNN-сеть прототипа MobileNetV2 на фреймворке TensorFlow на IDLE Google Colab для решения задачи выявления иерархических структур на цифровых изображениях.
3. Достигнута оптимальная точность сети на тестовой выборке – 84 %, что гарантирует адекватное выявление иерархических структур на цифровых изображениях.

## Список использованных источников и литературы

1. Computer Vision Annotation Tool: универсальный подход к разметке данных / Блог компании Intel / Хабр. – URL: <https://habr.com/ru/company/intel/blog/433772>.
2. Жерон, О. Прикладное машинное обучение с помощью Scikit-Learn и TensorFlow: концепции, инструменты и техники для создания интеллектуальных систем / пер. с англ. – Санкт-Петербург : Диалектика, 2019. – 688 с.
3. Google AI Blog: MobileNetV2: The Next Generation of On-Device Computer Vision Networks. – URL: <https://ai.googleblog.com/2018/04/mobilenetv2-next-generation-of-on.html>.

**Экономико-математическое моделирование  
динамики численности, рождаемости и смертности  
(на примере Удмуртской Республики)**

*Я. И. Третьякова*

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*Работа посвящена изучению вопросов построения экономико-математических оценок состояния демографических процессов, происходящих в социально-экономической системе. Анализ проведен на примере Удмуртской Республики с использованием первичных современных данных за период 2000-2019 годы. Получено, что численность населения в регионе снижается, а смертность к 2019 году превышает рождаемость. Рассчитана максимальная упущенная выгода при потере демографической единицы. Также рассчитана выгода, полученная экономикой УР от трудовой деятельности среднестатистического человека.*

**Ключевые слова:** экономико-математическое моделирование, социально-экономическая система, демографические показатели, численность населения, рождаемость, смертность, упущенная выгода.

### **Введение**

Человеческое общество – это сложная неравновесная развивающаяся система. Его сложность, многофакторность и противоречивость затрудняют количественную оценку многих процессов, происходящих в обществе. Актуальная оценка степени неопределенности социально-экономических систем приведена в работе К. В. Павлова [1]. Содержательное изложение концепции развития демографии как науки изложено в работе Е. И. Левиной [2].

Демографические показатели относятся к числу наиболее доступных для непосредственного измерения социальных показателей. Основными индикаторами в демографии являются численность населения, рождаемость (как входной поток в демографическую систему) и смертность (как выходной поток, уменьшающий значение основного показателя – численности населения). Результаты математического моделирования ряда демографических показателей (на примере Удмуртской Республики) приведены в работах К. В. Кетовой и И. Г. Русяка [3, 4].

### **Тенденции изменения численности населения Удмуртской Республики**

В целом, тенденция становления численности населения Удмуртской Республики (УР) начинается с 1920 года. График ее изменения за длительный период 1920–2019 гг., построенный по статистическим данным [5–7], представлен на рис. 1.

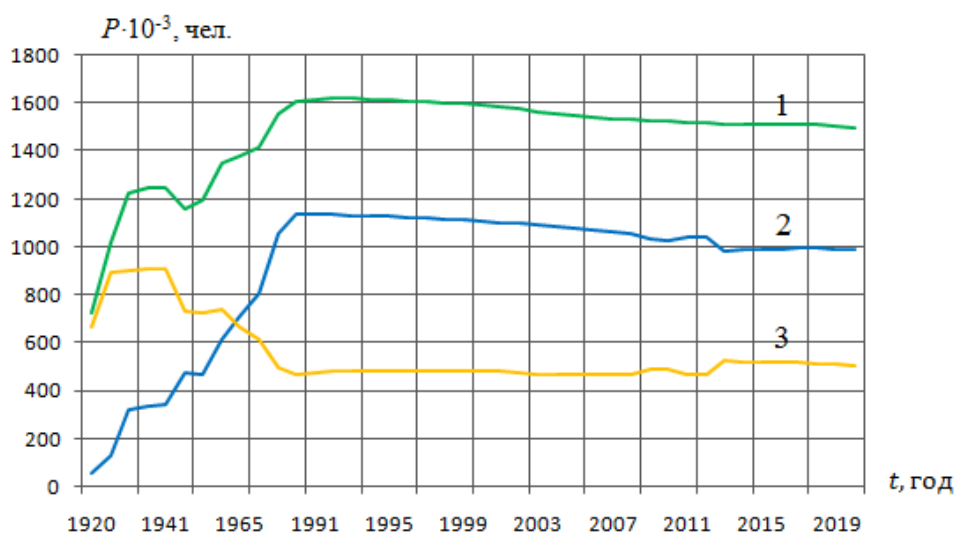


Рис. 1. Изменение численности населения УР в период 1920-2020 годы:  
1 – общая; 2 – городского населения; 3 – сельского населения

Так, рост численности жителей УР продолжался до 1993 года и достиг максимального значения за весь период существования республики – 1624,8 тыс. человек. С 1993 года наблюдается спад общей численности населения, который продолжается по настоящее время. Снижение общей численности населения региона к 2020 году составило 7,6 % от максимального количества населения на начало 1993 года. Численность жителей городского населения превышает численность сельского. В 2020 году городское население по численности превышает сельское почти в 2 раза.

Важной характеристикой при анализе демографической структуры населения является его распределение  $\rho(t, \tau)$  по возрастам  $\tau$ . На рис. 2 представлен график распределения населения УР для 2020 года по данным [6].

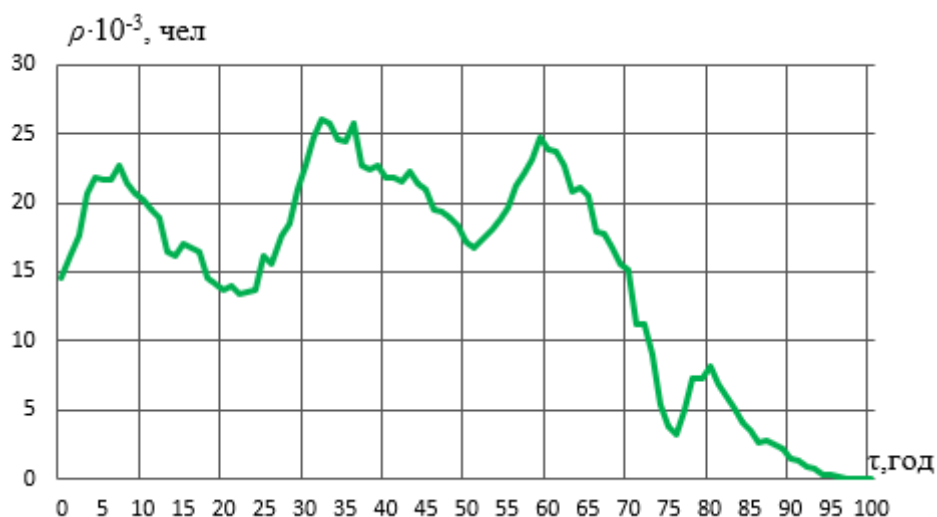


Рис. 2. Распределение численности населения УР по возрастам в 2020 году

Наблюдаем три «провала». Первый ( $\tau \approx 75$  лет) обусловлен низкой рождаемостью в годы Второй мировой войны. Второго и третьего ( $\tau \approx 51$  год и 23 го-

да соответственно) повторяются через 25–28 лет и являются частично следствием первого.

На рис. 3 и 4 представлены динамика рождаемости и смертности в УР за период 2000–2019 гг. соответственно.

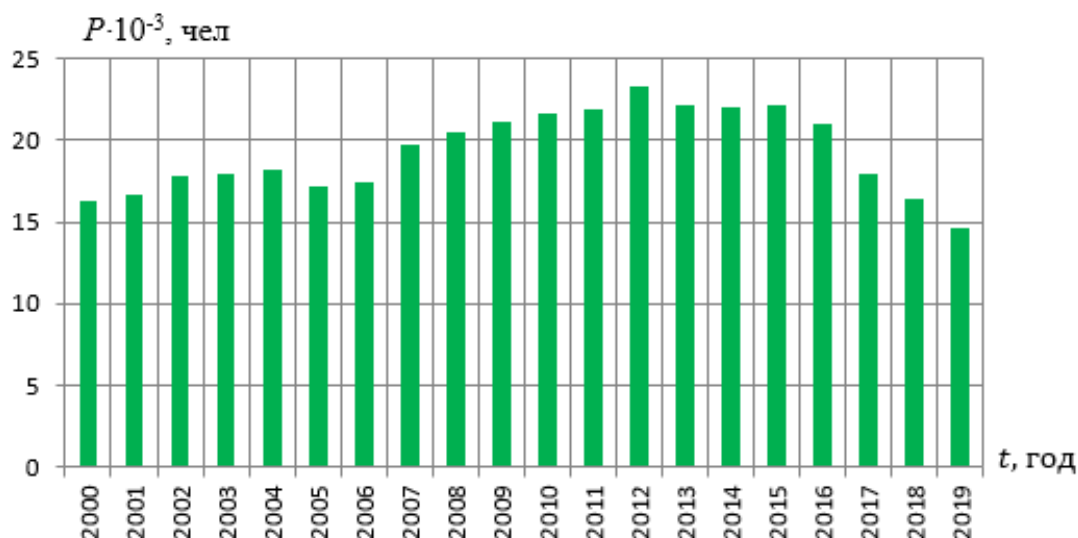


Рис. 3. Рождаемость в УР в период 2000–2019 гг.

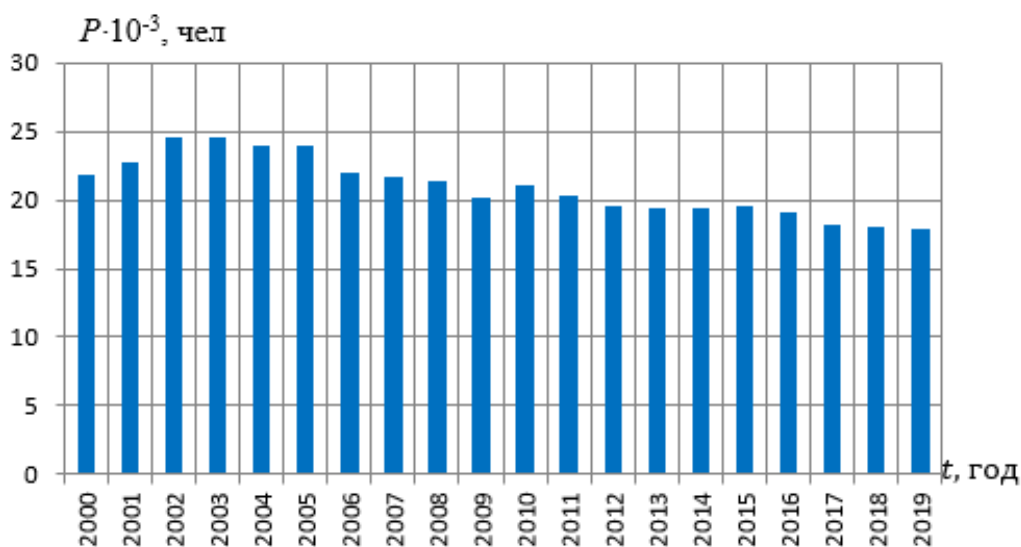


Рис. 4. Смертность в УР в период 2000–2019 гг.

В период с 2006 по 2012 год рождаемость увеличивается, а смертность уменьшается, хотя и остается на достаточно высоком уровне. Максимум рождаемости по УР приходился на 2012 год, затем наблюдается спад этого показателя. Так, по отношению к 2012 году, в 2019 году рождаемость уменьшилась на 37 %. Уровень смертности населения УР за рассматриваемый период снижается. Наибольший уровень наблюдался в 2003 году, самый низкий – в 2019 году. По отношению к 2003 году снижение составило 27 %. В 2009 и в 2017 годах кривые рождаемости и смертности пересеклись и находились на уровне 20,5 тыс. чел. и 18,5 тыс. чел. соответственно (рис. 5).

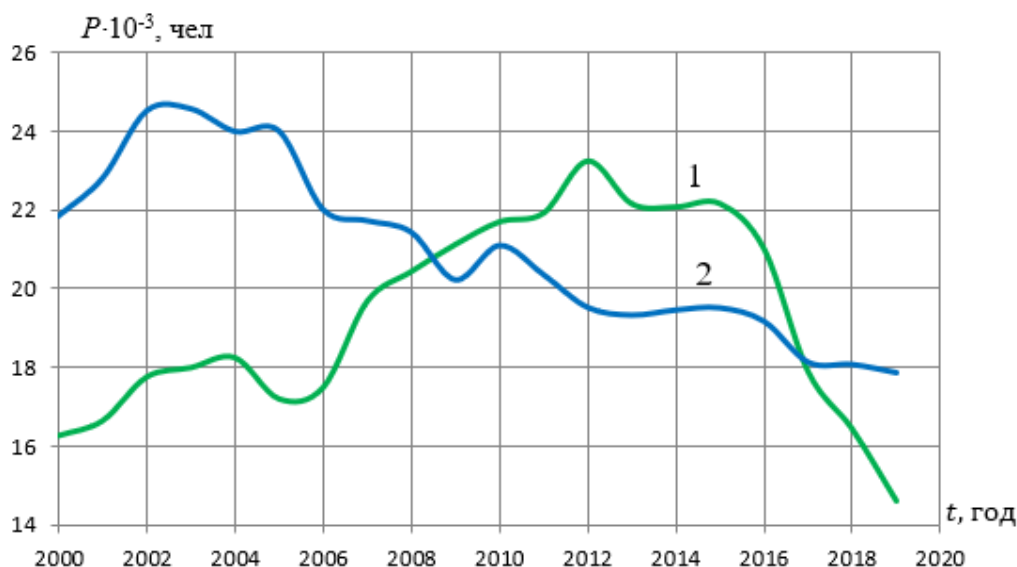


Рис. 5. Динамика рождаемости и смертности населения УР в период 2000–2019 гг.: 1 – смертность; 2 – рождаемость

Некоторое улучшение демографической ситуации в регионе частично обусловлено мерами, принимаемыми в государстве для улучшения демографической ситуации. Ряд из этих мер изложен в недавнем послании Президента Федеральному Собранию [8]. Это и материнский капитал, который выплачивается, начиная с 2007 года, и своевременно индексируется в соответствии с инфляцией. И строительство в 2010 году в УР перинатального центра, который обеспечил объективный диагностический контроль, а также снижение младенческой смертности [9, 10].

Математические оценки демографических процессов являются важным элементом при построении оптимальных стратегий при управлении социально-экономическими системами [4, 11]. Также математические оценки демографических процессов важны при анализе взаимосвязи экономики и демографии [12, 13], при изучении упущенной выгоды для экономической системы при демографических потерях [14]. Проведем оценку некоторых экономических потерь, связанных с демографическими потерями, по результатам работ [12–14].

### **Оценка некоторых экономических убытков, связанных с демографическими потерями**

На рис. 6 представлен график упущенной выгоды при выбытии человека в возрасте  $\tau$ , который построен по материалам работ [12–14] по статистическим данным [7] для 2019 года. Максимальная упущенная выгода достигается при потере человека в возрасте ( $\tau = 20$  лет и составляет 2,6 млн руб. Характерной точкой на графике является точка  $\tau = 62$ – $63$  года. Начиная с этого возраста затраты государства вместе с заработной платой среднестатистического работника в предстоящий период его жизни начинают превосходить прибавочный продукт, создаваемый им в этом же периоде. Упущенная выгода от преждевременных ежегодных потерь в год  $t$  всех людей возраста  $\tau$  определится по формуле

$$u_{\mu}(t, \tau) = u(t, \tau)\mu(t, \tau)\rho(t, \tau), \quad (1)$$

где  $u_{\mu}(t, \tau)$  – упущенная выгода;  $\mu(t, \tau)$  – функция смертности;  $\rho(t, \tau)$  – функция плотности распределения населения по возрастам.

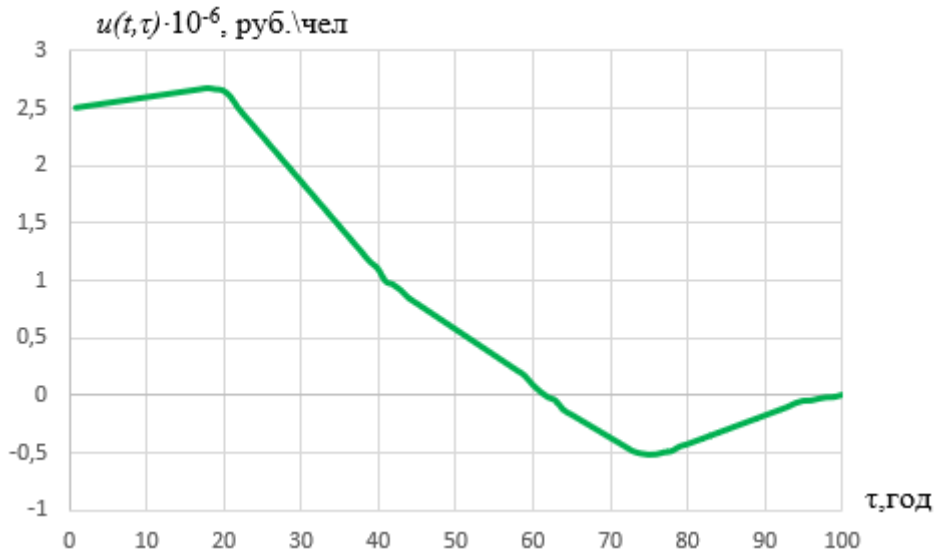


Рис. 6. Упущенная выгода для экономики УР при выбытии среднестатистического человека в возрасте  $\tau$  на момент времени  $t = 2019$  год

График «окупаемости» (рис. 7), или величины накопленного сальдо  $s(t, \tau)$  среднестатистического демографического элемента к возрасту  $\tau$ , определяется:

$$s(t, \tau) = \frac{1}{1 - \mu(t, 0)} \int_0^{\tau} [1 - \mu(t, \xi)] \{ \varepsilon(t, \xi) [\bar{w}(t) f_w(t, \xi) - \bar{g}(t) f_g(t, \xi)] - q(t, \xi) \} d\xi. \quad (2)$$

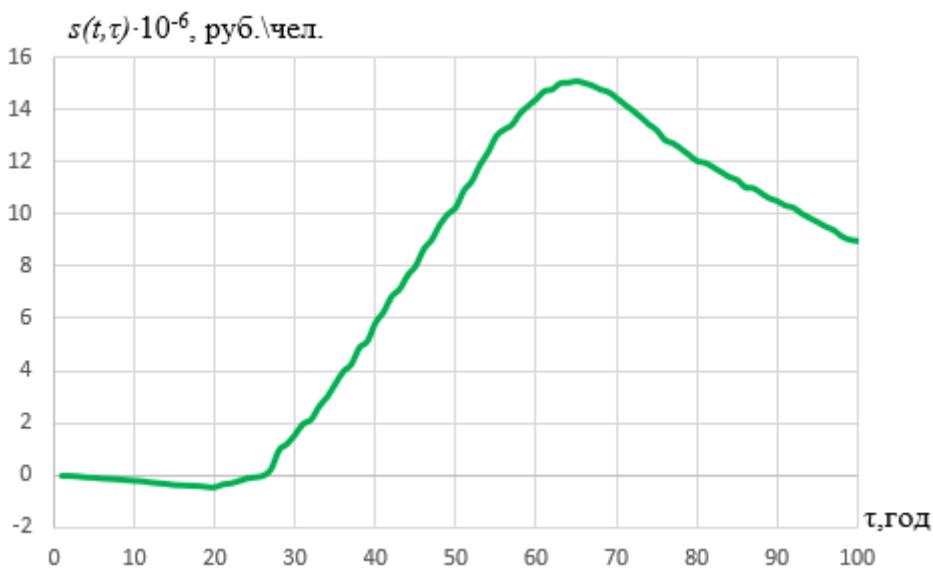


Рис. 7. Выгода, полученная экономикой УР от трудовой деятельности среднестатистического человека к возрасту  $\tau$  на момент времени  $t = 2019$  год

Особый интерес на графике (рис. 7) представляет точка, соответствующая возрасту  $\tau = 26$  лет. Она отражает момент, когда человек уже «расплатился» с государством и начинает формироваться положительное сальдо между затратами и трудовой отдачей. Отрезок графика после  $\tau = 65$  лет отражает период сокращения экономической активности населения. Однако резкого скачка на кривой не наблюдается, поскольку учитывается, что определенная доля  $\varepsilon(t, \tau)$  людей и после выхода на пенсию продолжает работать и производить прибавочный продукт. В итоге же получается, что в эти годы среднестатистический человек «забирает» часть стоимости, созданной им в «рабочий» период жизни. Тем самым накопленное сальдо снижается.

Поскольку в 26 лет человек «расплачивается» с государством за затраченные на него расходы, то все случаи выбытия демографической единицы до этого возраста есть прямой экономической урон для региона. Выбытие трудовой единицы означает потерю определенного дохода в будущем в результате того, что ожидавшееся превышение трудовой отдачи над затратами теряется.

Расчеты, представленные на рис. 7, показывают также, что максимальная трудовая отдача в размере 15 млн руб. достигается к возрасту  $\tau = 64$ –65 лет.

### **Заключение**

Проведен анализ состояния демографических процессов, происходящих в социально-экономической системе на примере Удмуртской Республики с использованием первичных современных данных за период 2000–2019 гг. Получено, что численность населения в регионе снижается, а смертность к 2019 году превышает рождаемость. Рассчитана максимальная упущенная выгода при потере демографической единицы. Также рассчитана выгода, полученная экономикой УР от трудовой деятельности среднестатистического человека.

### **Список использованных источников и литературы**

1. Павлов, К. В. Неопределенность в социально-экономической сфере // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2011. – № 29 (122). – С. 67–75.
2. Левина, Е. И. История демографии как науки и ее роль в современной макроэкономической ситуации в России // Вестник ТГУ. – 2008. – № 11. – С. 409–413.
3. Русяк, И. Г. Математическое моделирование демографических показателей Удмуртской Республики / И. Г. Русяк, К. В. Кетова // Высокие технологии в механике : материалы научно-практической конференции. – Ижевск : Ижевский государственный технический университета, 2002. – С. 89.
4. Кетова, К. В. Оптимальное распределение капиталовложений с учетом демографического прогноза : дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Ижевск : Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, 2004.
5. Естественное движение населения в Удмуртской Республике: Статистический бюллетень Госкомстата УР. – Ижевск, 1995, 2017.
6. Численность населения по полу и по возрасту – 2019 : стат. сб. // Федеральная служба государственной статистики. 2019. – URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13284>.



7. Регионы России. Социально-демографические показатели – 2020: стат. сб. // Федеральная служба гос. статистики. 2020. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204>.
8. Послание Президента Федеральному собранию. 21 апреля 2021 года. – URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/messages/65418>.
9. Бушмелева, Н. Н. Репродуктивные потери и пути их снижения в регионе (на примере Удмуртской Республики) // Электронный научный журнал «Социальные аспекты здоровья населения», 01.09.2014. – URL: [reproduktivnyye-poteri-i-puti-ih-snizheniya-v-regione-na-primere-udmurtskoj-respubliki.pdf](http://reproduktivnyye-poteri-i-puti-ih-snizheniya-v-regione-na-primere-udmurtskoj-respubliki.pdf).
10. Бушмелева, Н. Н. Репродуктивные потери в удмуртской республике и поиск резервов их снижения с внедрением новых диагностических технологий // Вестник Удмуртского университета. – 2014. – № 3. – С. 91–101.
11. Кетова, К. В. Об одной задаче управления демоэкономическим состоянием региона / К. В. Кетова, И. Г. Русяк // Интеллектуальные системы в производстве. – 2003. – № 2 (2). – С. 151–160.
12. Кетова, К. В. Моделирование взаимосвязи демографических и макроэкономических процессов (на примере Удмуртской Республики) // Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО. – 2009. – № 3. – С. 55–58.
13. Русяк, И. Г. Анализ экономических характеристик демографических потерь / И. Г. Русяк, К. В. Кетова // Вестник Томского государственного университета. – 2008. – № 310. – С. 153–160.
14. Кетова, К. В. Экономико-математическая модель потенциала трудовых ресурсов и стоимостных характеристик демографических потерь // Прикладная эконометрика. – 2007. – № 3 (7). – С. 80–94.

## Технический анализ финансовых рынков с помощью рыночных индикаторов на примере акций компании Honor

*А. В. Шишова*

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*В статье рассмотрены вопросы, связанные с принятием управленческих решений по купле-продаже акций компании с использованием статистических данных фондового рынка. Проведенный технический анализ с помощью рыночных индикаторов на примере акций компании Honor в период 01.03.2021–26.03.2021 позволил определить периоды, благоприятные для покупки акций компании и для продажи акций с целью максимизации прибыли компании.*

**Ключевые слова:** технический анализ, финансовый рынок, акции, методы анализа цен, рыночные индикаторы, торговые стратегии.

### **Введение**

Honor – это отдельный бренд китайской компании Huawei, которая является крупным мировым производителем информационных технологий и умных устройств. Производит широкий ассортимент устройств: смартфоны, ноутбуки, планшеты и др. Бренд Honor появился в 2013 году [1].

Технический анализ – это способ прогнозирования цены на актив с помощью статистических данных по изменению ценового поведения на рынке. Для его проведения не нужно анализировать экономическое состояние страны – эмитента валюты (или предприятия, выпускающего акции для фондового рынка), политическую составляющую и другие глобальные факторы [2, 3]. Все что нужно для проведения технического анализа – это чистый график цен, на основании которого можно анализировать прошлое и предполагать будущее [4]. Технический анализ разделяется на виды: анализ японских свечей, индикаторный анализ, поиск графических паттернов. Некоторые вопросы, связанные с методами анализа финансового состояния компаний, представлены в работах [5–8].

### **Основная часть**

Рассмотрим вопросы, связанные с принятием управленческих решений по купле-продаже акций компании. В качестве примера используем статистический материал по акциям компании Honor. На основе проведенного анализа на базе индикаторов разработаем торговые стратегии. Воспользуемся результатами, представленными в работах [4, 9].

В таблице по данным сайта InvestFunds [10] приведены значения (в тыс. юаней) цены открытия, максимальной и минимальной цен, а также цены закрытия акций компании Nonog за период 01.03.2021–26.03.2021. По состоянию на 06.06.2020 курс юаня по отношению к доллару составлял 1 USD = 6,387 CNY, курс юаня по отношению к рублю – 1 RUB = 0,087 CNY.

**Цена открытия, максимальная и минимальная цена, цена закрытия акций компании Nonog за период 01.03.2021–26.03.2021, тыс. юаней**

Дата	Цена, тыс. юаней			
	открытия	мин	макс	закрытия
01.03.2021	56,67	56,66	60,60	59,61
02.03.2021	60,30	57,65	60,70	58,30
03.03.2021	58,49	57,52	58,78	58,57
04.03.2021	58,15	57,32	58,80	57,50
05.03.2021	57,28	56,86	58,25	57,88
08.03.2021	58,04	57,51	59,18	57,75
09.03.2021	57,36	54,91	58,91	55,90
10.03.2021	56,50	54,77	56,57	54,94
11.03.2021	54,97	54,45	57,25	56,98
12.03.2021	57,08	54,90	57,35	55,32
15.03.2021	55,60	53,00	55,60	53,39
16.03.2021	53,45	53,21	54,60	53,95
17.03.2021	53,61	53,45	58,58	58,28
18.03.2021	58,53	57,77	60,20	58,88
19.03.2021	58,01	57,85	61,33	60,25
22.03.2021	61,03	59,60	61,44	60,65
23.03.2021	60,10	59,73	61,19	60,55
24.03.2021	60,01	58,58	60,70	58,86
25.03.2021	59,50	58,23	59,88	58,29
26.03.2021	58,80	57,81	59,30	59,05

На рис. 1 приведена свечная диаграмма (японские свечи), на которой дополнительно изображены линии поддержки и сопротивления. Линии поддержки и сопротивления проводятся через локальные минимумы (поддержка) и локальные максимумы (сопротивление).

Японские свечи – один из самых популярных ценовых графиков на финансовом рынке. Цена валютной пары или акции представлена в виде вертикального прямоугольника с верхней или нижней тенью или без. Свечи могут быть восходящими или нисходящими.

В рассматриваемом примере для акций компании Nonog за период 01.03.2021–26.03.2021 линии поддержки и сопротивления почти параллельны и представляют собой нисходящий канал, что предполагает анализ вариантов входа для продажи (работы по тенденции), например, от линии поддержки или продажи при ее пробое вниз.

Для анализа динамики акций компании Nonog рассмотрим некоторые наиболее распространенные рыночные индексы.



Рис. 1. Японские свечи: прямая котировка акций компании Honor и линии поддержки и сопротивления для периода 01.03.2021–26.03.2021, тыс. юаней

В качестве трендовых индексов рассмотрим скользящие средние: простую и экспоненциальную. Обозначим простую скользящую среднюю  $SMA$  (*Simple Moving Average*), экспоненциальную скользящую среднюю  $EMA$  (*Exponential Moving Average*). Формулы расчета имеют, соответственно, вид:

$$SMA_t = \frac{\sum_{i=t-n}^n C_i}{n}, \quad EMA_t = kC_t + (1-t)EMA_{t-1}, \quad k = \frac{2}{n+1}. \quad (1)$$

В формулах (1)  $C_t$  – цена закрытия текущего дня,  $C_{t-n}$  – цена закрытия  $n$  дней тому назад,  $n$  – интервал усреднения (сглаживания),  $EMA_t$  – значение  $EMA$  текущего дня  $t$ .

На рис. 2 представлены графики цены закрытия акций компании Honor, простая и экспоненциальная скользящие средние, рассчитанные в период 01.03.2021–26.03.2021. Интервал сглаживания в расчетах принят равным пяти дням ( $n = 5$ ).

Важным моментом являются точки пересечения графиков цены и скользящих средних. В данной задаче показательными днями являлись 17.03.2021 (цена становится выше средних – сигнал к покупке акций компании) и 23.02.2021 (цена опускается ниже средних – следует рассматривать продажи).

Одним из осцилляторов, характеризующих процессы на финансовых рынках, является момент  $MOM$  (*momentum*), рассчитываемый по формуле:

$$MOM_t = C_t - C_{t-n}. \quad (2)$$

Положительные значения  $MOM$  свидетельствуют об относительном росте цен акций, отрицательные – об их снижении. Движение графика момента вверх из зоны отрицательных значений является слабым сигналом к покупке до пересечения с нулевой линией, дальнейшее же движение вверх считается достаточно мощным сигналом к покупке. Результаты расчетов  $MOM$  показаны на рис. 3.



Рис. 2. Цены закрытия и скользящие средние акций компании NoNor для периода 01.03.2021–26.03.2021, тыс. юаней

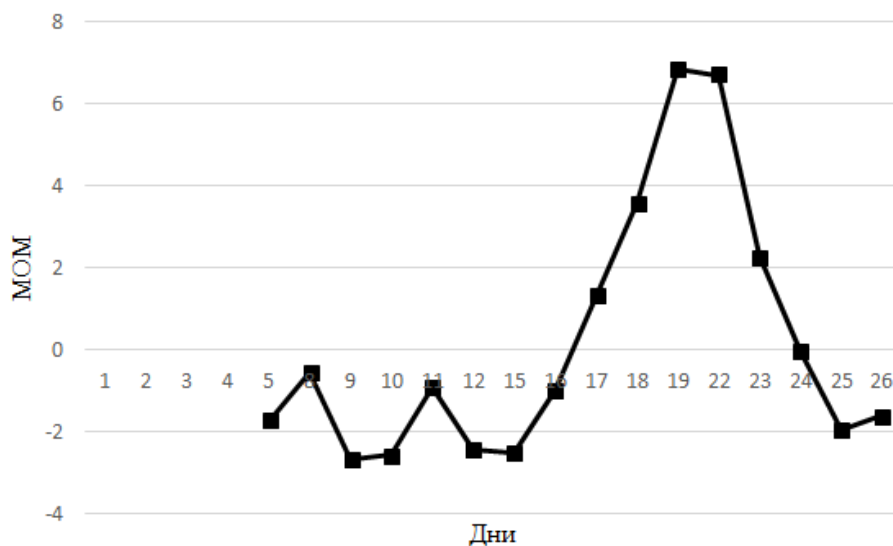


Рис. 3. Момент при пятидневном интервале сдвига, рассчитанный для акций компании NoNor в период 01.03.2021–26.03.2021

Согласно расчетам, индикатор *MOM* пересекает нулевую линию вверх 17.03.2021, до этого момента предполагается нахождение в области продаж акций компании. С 17.03.2021 следует переходить к покупке ( $MOM > 0$ ) данного актива по 23.03.2021 включительно. Далее, с 23.03.2021, следует переходить к продаже акций компании.

Индикатор *ROC* (*Rate of Change*) применяется для анализа скорости изменения цен. Он рассчитывается по формуле

$$ROC_t = \frac{C_t}{C_{t-n}} - 100\% \quad (3)$$

*ROC* отражает скорость изменения цены, а также указывает направление этого изменения. Графическое отображение и правила работы с индикатором *ROC* аналогичны графическому отображению и правилам работы с индикатором *MOM*. В качестве линии, пересечение которой дает сигнал о покупке или продаже активов, используется уровень 100 %.

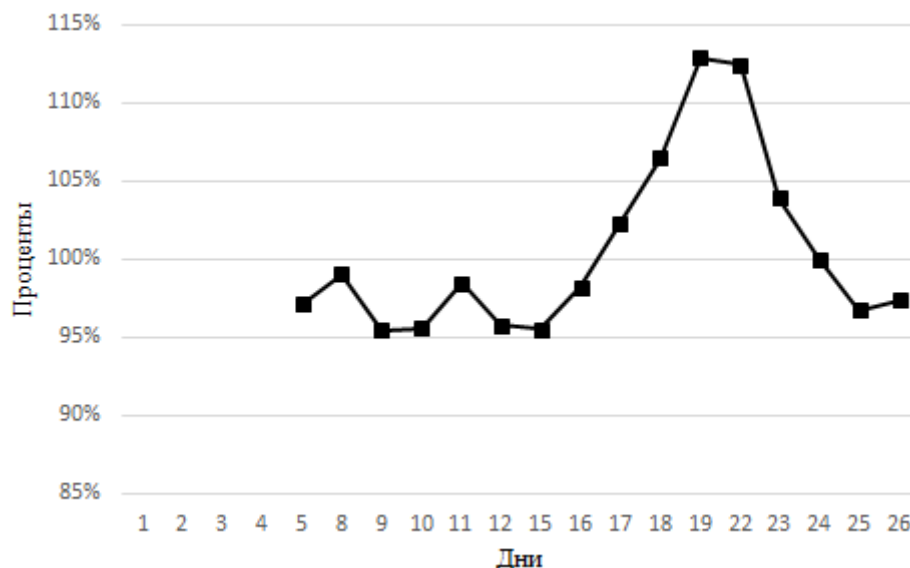


Рис. 4. Скорость изменения цен, рассчитанная для акций компании HONOR в период 01.03.2021–26.03.2021

Стохастический осциллятор – это индикатор темпов изменений или импульса цены. Стохастик оценивает скорость рынка путем определения относительного положения цен закрытия в диапазоне между максимумом и минимумом за определенное число дней. При расчетах используют следующие кривые: быстрая %*K*, медленные %*D* и %*R*, которые рассчитываются по формулам:

$$\%K = 100(C_t - L_n) / (H_n - L_n), \quad (4)$$

$$\%R = 100(H_n - C_t) / (H_n - L_n), \quad (5)$$

$$\%D = \frac{\sum_{i=t-2}^t (C_i - L_n)}{\sum_{i=t-2}^t (H_n - L_n)} 100 \%, \quad (6)$$

где  $C_t$  – цена закрытия текущего дня;  $L_n$  – минимальная цена за  $n$  предшествующих дней, включая текущий;  $H_n$  – максимальная цена за  $n$  предшествующих дней, включая текущий. Для случая  $n = 5$  в формуле будут стоять максимальная и минимальная цены за пять дней.

Смысл индексов %*K* и %*R* состоит в том, что при росте цен цена закрытия бывает ближе к максимальной цене, а при падении цен наоборот – ближе к минимальной.

Кривые  $%K$  и  $%D$  известны как стохастические Лейна, а кривая  $%R$  носит имя Ларри Уильямса. Есть и еще один вариант происхождения названий линий индикатора стохастик:  $%D$  происходит от слова отклонение (*deviation*),  $%K$  – от имени Келли (второе имя Джорджа Лейна).

Индексы  $%K$  и  $%R$  рассчитывают, чтобы понять, куда больше тяготеет цена закрытия. При расчете  $%K$  разность между ценой закрытия текущего дня и минимальной ценой за пять дней сравнивают с размахом цен за эти же пять дней. В случае расчета  $%R$  с размахом сравнивают разность между максимальной ценой за пять дней и ценой закрытия.

Индекс  $%D$  рассчитывается аналогично индексу  $%K$  с той лишь разницей, что при его построении величины  $(C_t - L_n)$  и  $(H_n - L_n)$  сглаживают, беря их трехдневную сумму.

На рис. 5 приведены быстрая  $%K$  и медленная  $%D$  стохастики, рассчитанные с шагом 5 дней для нашей задачи.

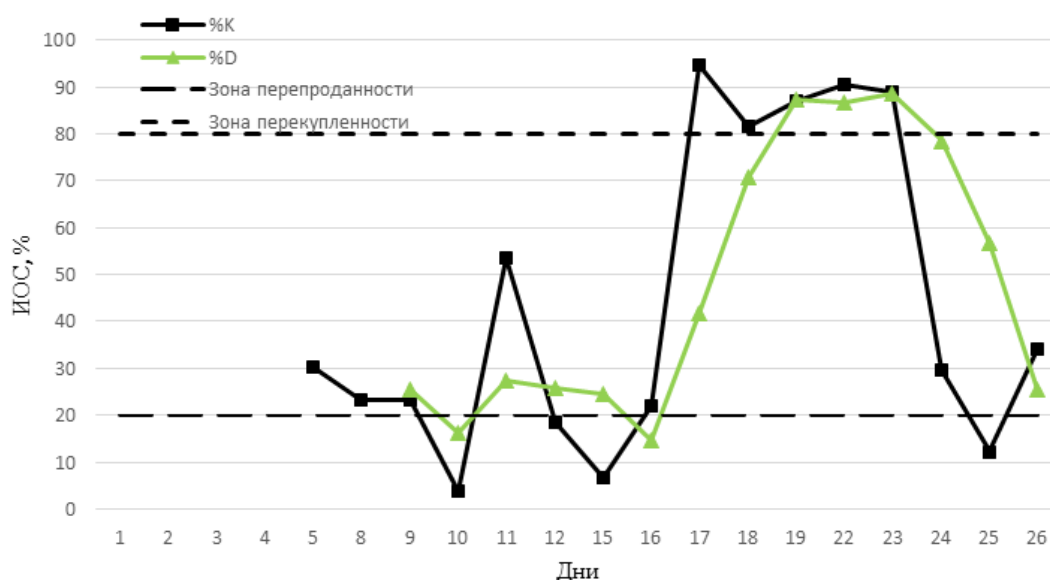


Рис. 5. Стохастики, рассчитанные для акций компании Nonog в период 01.03.2021–26.03.2021

Анализ стохастических линий, представленных на рис. 5, указывает на то, что покупки акций рекомендованы после 10.03.2021, продажи – после 23.03.2021.

### Заключение

Таким образом, проведенный технический анализ финансовых рынков с помощью рыночных индикаторов на примере акций компании Nonog в период с 01.03.2021–26.03.2021 позволил определить периоды, благоприятные для покупки акций компании и для продажи акций с целью максимизации прибыли компании. Получены следующие рекомендации:

- Осуществление сделок по продажам с начала периода и до 10 марта.
- С 10 по 23 марта рекомендованы покупки актива.
- С 23 марта рекомендованы продажи актива.

## Список использованных источников и литературы

1. *Маркова, В. Д.* Маркетинговые стратегии производителей на рынке смартфонов / В. Д. Маркова, Мэн Цинлин, Чжао Гэ // Мир экономики и управления. – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 158–167. – DOI 10.25205/2542-0429-2017-17-4-158-167.
2. *Третьякова, О. В.* Сравнительный анализ методов прогнозирования финансовых результатов / О. В. Третьякова, Ю. В. Буданова // Journal of Economy and Business, vol. 5-1. – С. 205–209. – DOI: 10.24411/2411-0450-2019-10709.
3. *Файзуллин, Р. В.* Классификация систем помощи принятия решений на бирже // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2009. – № 1. – С. 56–58.
4. *Кетова, К. В.* Технический анализ финансовых рынков с помощью рыночных индикаторов на примере акций компании Samsung / К. В. Кетова, А. В. Шишова, С. Р. Дорофеева // Вектор экономики. – 2021. – № 2 (56). – С. 34. – DOI 10.51691/2500-3666\_2021\_2\_5.
5. *Кетова, К. В.* Модель управления финансовыми потоками в строительной отрасли при использовании эскроу-счетов / К. В. Кетова, Д. Д. Вавилова // Интеллектуальные системы в производстве. – 2020. – Т. 18, № 2. – С. 85–95. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-2-85-95.
6. *Ketova, K. V.* Russian oil company productive and economic activity optimal control mathematical modeling // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. - С. 62023. - DOI:10.1088/1757-899X/919/6/062023.
7. *Ketova K. V., Vavilova D. D.* Optimization of financial flows in a building company using an escrow account in the Russian Federation // Recent Research in Control Engineering and Decision Making. Сер. " Studies in Systems, Decision and Control (SSDC), volume 337" Gewerbestrasse, 2021. - С. 427–442. - DOI:10.1007/978-3-030-65283-8\_35.
8. *Кетова, К. В.* Построение оптимальной стратегии производственно-экономической деятельности нефтяной компании в Российской Федерации // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2020. – № 7 (65). – С. 95–102. – DOI: 10.24411/2411-0450-2020-10600.
9. *Снежко, Ю. С.* Построение торговых стратегий с использованием технического анализа на российском фондовом рынке // Инновации и инвестиции. – 2015. – № 10. – С. 56–60.
10. InvestFunds сайт про инвестиции и фондовые рынки. – URL: <https://investfunds.ru> (дата обращения 31.05.2021).



## **Анализ статистической информации по показателям численности населения, рождаемости и смертности (на примере Российской Федерации)**

*А. А. Щекалева*

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*Работа посвящена изучению вопросов анализа статистической информации по основным демографическим показателям на примере социально-экономической системы Российской Федерации. Были проанализированы первичные статистические данные за период 1995–2019 гг. Установлено, что численность населения снижается, а смертность к 2018 году превышает рождаемость. Проанализированы основные классы причин смертности населения в Российской Федерации.*

**Ключевые слова:** социально-экономическая система, статистическая информация, демографические показатели, численность населения, рождаемость, смертность.

### **Введение**

Демографические показатели относятся к числу наиболее доступных для непосредственного измерения социальных показателей. Основными индикаторами в демографии являются численность населения, рождаемость (как входной поток в демографическую систему) и смертность (как выходной поток, уменьшающий значение основного показателя – численности населения).

История демографии как науки и ее роль в современной макроэкономической ситуации в России достаточно полно представлена в работе Е. Левиной [1].

Большой вклад в изучение демографических процессов математическими методами внесли российские ученые В. Буняковский, С. Новосельский, О. Староверов, М. Птуха, К. Герман, В. Паевский [1, 2]. А. Боярский систематизировал демографические знания [3, 4]. Большой вклад в систематизацию демографии внесли А. Вишневецкий [5, 16] и И. Венецкий [7, 8].

Изучение демографических показателей используется при построении оптимальных стратегий экономического развития региональных систем [9–12]. Также выстраиваются и сами демографические стратегии России [13, 14].

В настоящей работе рассмотрим динамику основных демографических показателей: численности населения, рождаемости и смертности. Их анализ проведем на примере статистических данных по демографическим показателям в Российской Федерации.

## Тенденции изменения численности населения Российской Федерации

Динамика численности населения Российской Федерации, по данным [15, 16], начинается с 1990 года, приведена на рис. 1.

Так, рост численности жителей РФ продолжался до 1993 года и достиг максимального значения за весь период – 148 561 694 тыс. человек. С 1993 года наблюдается спад общей численности населения, который продолжается по настоящее время. Снижение общей численности населения региона к 2019 году составило 1,2 % от максимального количества населения на начало 1993 года. Численность жителей городского населения превышает численность сельского. В 2019 году городское население по численности превышает сельское почти в 2 раза.

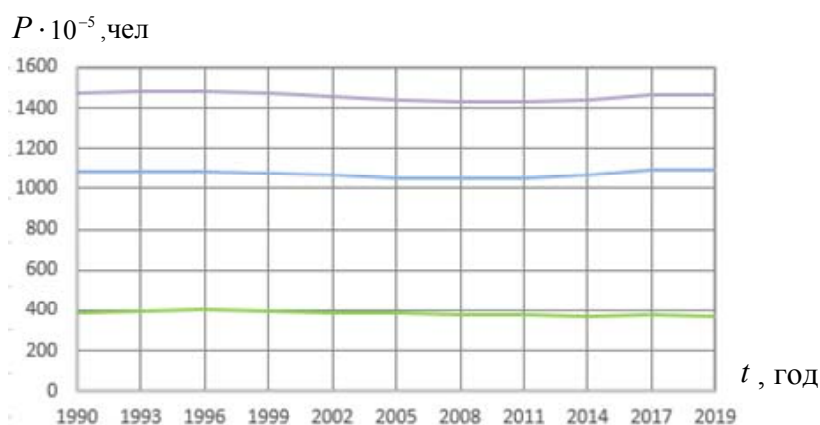


Рис. 1. Изменение численности населения РФ в период 1990–2019 годы:  
1 – все население; 2 – городское население; 3 – сельское население

Важной характеристикой при анализе демографической структуры населения является его распределение  $\rho(t, \tau)$  по возрастам  $\tau$ . На рис. 2 и 3 представлен график распределения населения РФ для 2019 года по данным [16] и распределение численности населения РФ для 2019 года в делении по полу.

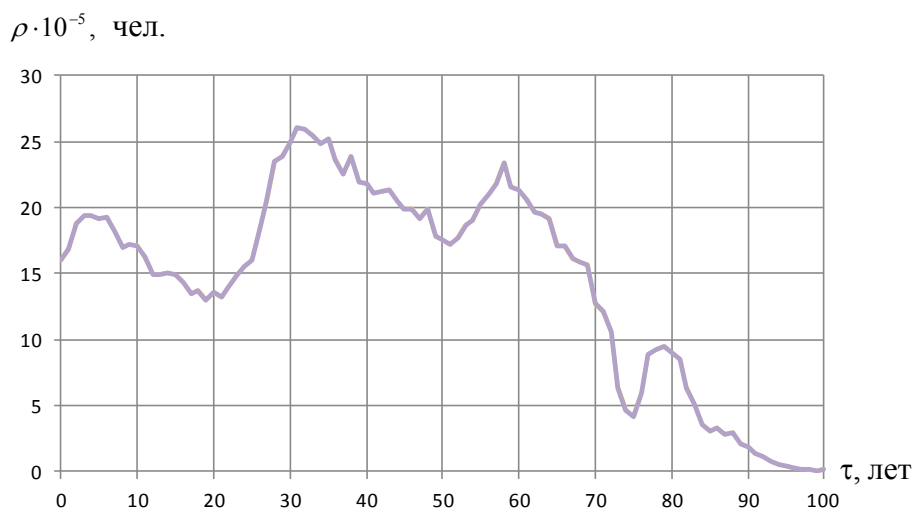


Рис. 2. Распределение численности населения РФ по возрастам в 2019 году

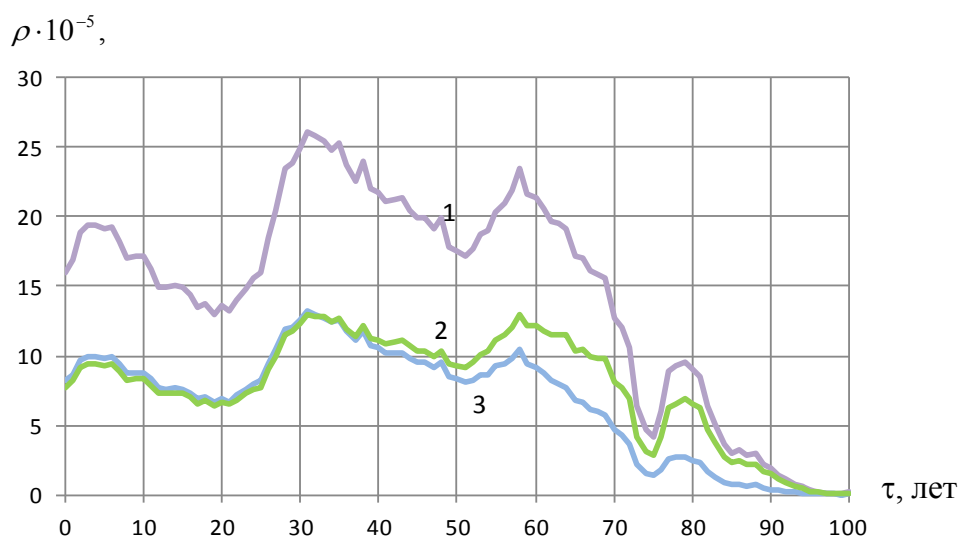


Рис. 3. Распределение численности населения РФ для 2019 года в зависимости от возраста в делении по полу: 1 – все население; 2 – женщины; 3 – мужчины

Наблюдаем три «провала». Первый ( $\tau \approx 75$  лет) обусловлен низкой рождаемостью в годы Второй мировой войны. Вторым и третьим ( $\tau \approx 51$  год и 23 года соответственно) повторяются через 25–28 лет и являются частично следствием первого. Распределение населения в разрезе «мужчины/женщины» для 2019 года (рис. 3) видно, что в каждой возрастной группе численность женщин после 35 лет превосходит численность мужского населения. В старших возрастах разрыв увеличивается.

### Показатели рождаемости и смертности. Основные причины смертности населения

На рис. 4 и 5 представлены динамика рождаемости и смертности в РФ за период 1995–2018 годы соответственно.

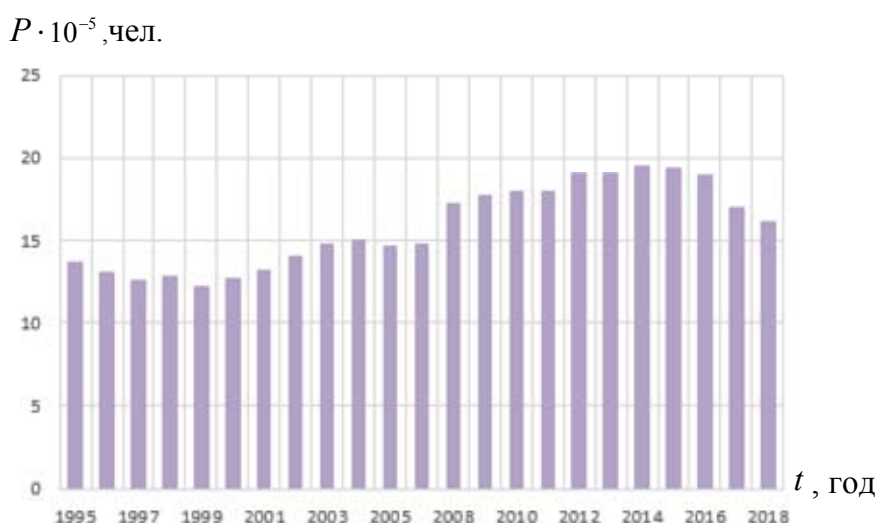


Рис. 4. Рождаемость в РФ в период 1995–2018 гг.

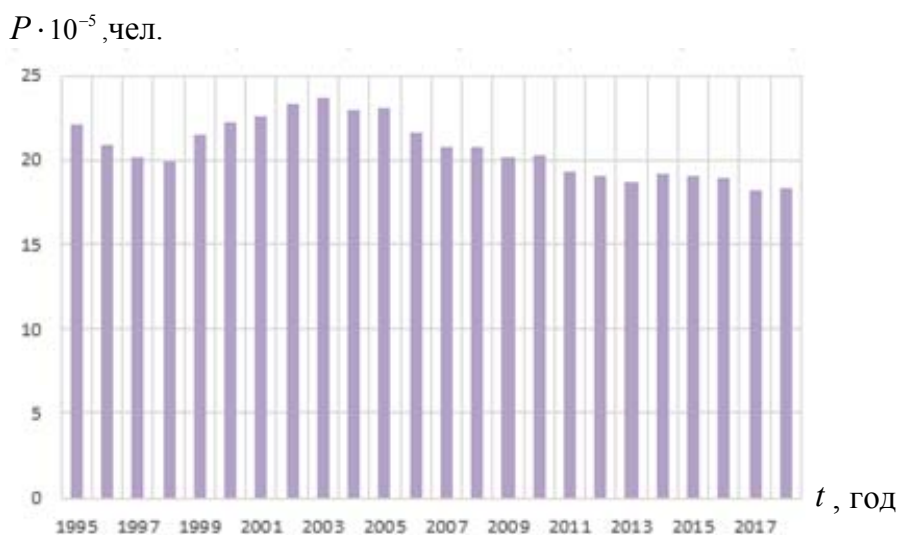


Рис. 5. Смертность в РФ в период 1995–2018 гг.

В период с 2006 по 2014 год рождаемость увеличивается, а смертность уменьшается, хотя и остается на достаточно высоком уровне. Максимум рождаемости по РФ приходился на 2014 год, затем наблюдается спад этого показателя. Так, по отношению к 2014 году в 2018 году рождаемость уменьшилась на 19 %. Уровень смертности населения РФ за рассматриваемый период снижается. Наибольший уровень наблюдался в 2003 году, самый низкий – в 2017 году. По отношению к 2003 году снижение составило 23 %. В 2012 и 2016 годах кривые рождаемости и смертности пересеклись и находились на уровне 1950 тыс. чел. и 1850 тыс. чел. соответственно (рис. 6).

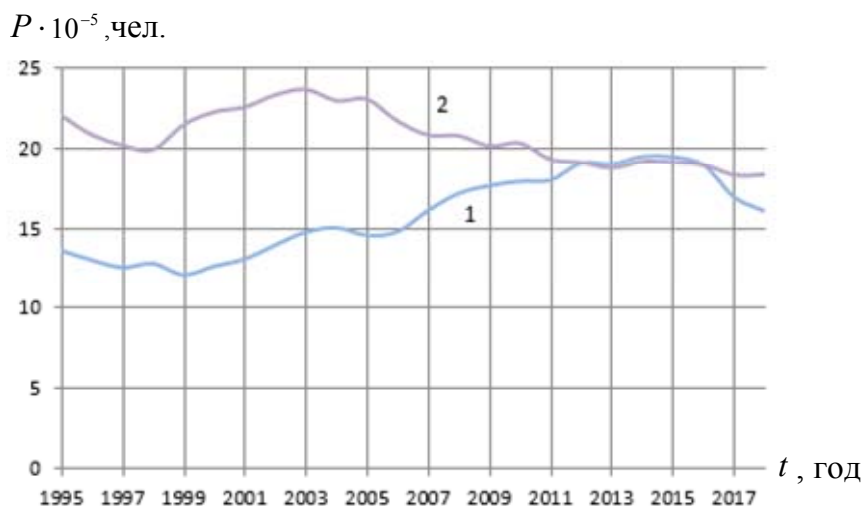
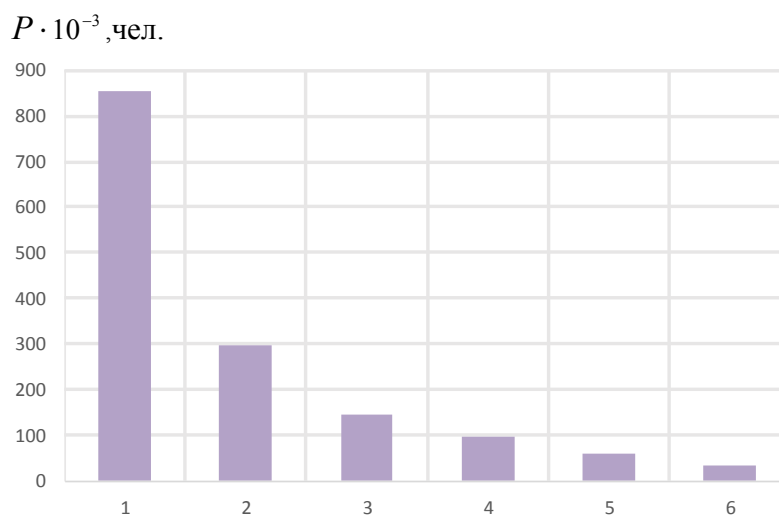


Рис. 6. Динамика рождаемости и смертности населения РФ в период 1995-2018 годы: 1 – рождаемость; 2 – смертность

За последние 10 лет сложилась определенная структура причин смертности [17, 18]. В 2018 году первое место занимают болезни кровообращения (57 %), на втором месте – новообразования (19 %), на третьем – внешние причины (11 %) (рис. 7).



*Рис. 7.* Количество умерших РФ в 2018 г. по основным классам причин смерти: 1 – болезни системы кровообращения; 2 – новообразования; 3 – внешние причины; 4 – болезни органов пищеварения; 5 – болезни органов дыхания; 6 – инфекционные и паразитные заболевания

### Заключение

Проведен анализ состояния демографических процессов, происходящих в социально-экономической системе Российской Федерации, с использованием первичных современных данных за период 1995–2018 годы. Получено, что численность населения в регионе снижается, а смертность к 2018 году превышает рождаемость. Проанализированы основные классы причин смертности населения в Российской Федерации.

### Список использованных источников и литературы

1. Левина, Е. И. История демографии как науки и ее роль в современной макроэкономической ситуации в России // Вестник ТГУ. – 2008. – № 11. – С. 409–413.
2. Кетова, К. В. Математические модели экономической динамики : монография. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2013. – 284 с.
3. Боярский, А. Я. Модели демографических связей. – Москва : Статистика, 1972.
4. Боярский, А. Я. Население и методы его изучения // Сб. научных трудов. – Москва : Статистика, 1975. – 264 с.
5. Вишневский, А. Г. Воспроизводство населения и общество. – Москва : Финансы и статистика, 1982. – 287 с.
6. Вишневский, А. Г. Демографический потенциал России // Вопросы экономики. – 1998. – № 5. – С. 103–122.
7. Венецкий, И. Г. Статистические методы в демографии. – Москва : Статистика, 1977. – 208 с.
8. Венецкий, И. Г. Математические методы в демографии. – Москва : Статистика, 1971. – 296 с.
9. Кетова, К. В. Оптимальное распределение капиталовложений с учетом демографического прогноза : дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Ижевск : Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, 2004.

10. *Беленький, В. З.* Полное аналитическое решение макро модели развития региона при экзогенном демографическом прогнозе / В. З. Беленький, К. В. Кетова // Экономика и математические методы. – 2006. – Т. 42, № 4. – С. 85–95.
11. *Кетова, К. В.* Об одной задаче макроэкономической динамики региона с учетом факторов экономического развития // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2007. – № 3. – С. 33–40.
12. *Кетова, К. В.* Об одной задаче управления демоэкономическим состоянием региона / К. В. Кетова, И. Г. Русяк // Интеллектуальные системы в производстве. – 2003. – № 2 (2). – С. 151–160.
13. *Рыбаковский, Л. Л.* Стратегия демографического развития России, понятие и содержание / Л. Л. Рыбаковский, Г. Р. Хасаев // Народонаселение. – 2005. – № 2. – С. 52–63.
14. *Рыбаковский, О. Л.* К вопросу о стратегии демографического развития и концепции демографической политики России / О. Л. Рыбаковский, О. А. Таюнова, Н. И. Кожевникова // Наука. Культура. Общество. – 2018. – № 2-3. – С. 57–65.
15. Естественное движение населения в Удмуртской Республике: Статистический бюллетень Госкомстата УР. – Ижевск, 1995, 2017.
16. Численность населения по полу и по возрасту – 2019: стат. сб. // Федеральная служба государственной статистики. 2019. – URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13284>.
17. *Кетова, К. В.* Социально-экономическое исследование основных причин смертности населения (на примере Удмуртской Республики) / К. В. Кетова, Е. Д. Давыдова // Дневник науки. – 2020. – № 4 (40). – С. 51.
18. *Кашепов, А. В.* Социально-экономические факторы смертности в период с 2000 по 2020 г. // Социально-трудовые исследования. – 2020. – № 3. – С. 18–30. – DOI: 10.34022/2658-3712-2020-40-3-18-30.

Секция 3  
**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В ПЕДАГОГИКЕ, ИСТОРИИ, ФИЛОСОФИИ**

УДК [510.649+519.862.6+004.94]:378.14

**К вопросу моделирования процесса подготовки специалиста**

*А. А. Айзикович<sup>1</sup>, С. А. Бородина<sup>2</sup>, Н. А. Рычина<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова  
<sup>2</sup>ЗАО «Ижевский нефтяной научный центр»

*Приведено описание построения нечеткой модели системы образовательного процесса. Для определения весов выделенных признаков использованы экспертные оценки. Моделирование осуществлено в среде Matlab\_R2009b.*

**Ключевые слова:** экспертные оценки, нечеткое моделирование, качество обучения.

**Введение**

Работа основана на трех этапах исследования. Изначально был выявлен ряд признаков, существенно влияющих на подготовку специалистов, и проведен их анализ. Далее с использованием экспертных оценок [1-5] были получены веса изучаемых признаков и, наконец, на основе теории нечетких множеств [6, 7] построена модель системы образовательного процесса и получены заключительные результаты, характеризующие успеваемость студента, компетентность и трудоустройство выпускника. При построении базы правил модели были разработаны сорок нечетких продукций, что свидетельствует о достаточной ее полноте.

**Нечеткие высказывания**

На основе экспертных оценок формируется набор правил  $R_j, j = \overline{1, N}$ . Каждому правилу соответствуют функции принадлежности условия и следствия. Правила, содержащие одинаковые следствия и относящиеся к одному и тому же взаимодействию, объединяются в одно с помощью логического суммирова-

ния. Количественный результат взаимодействия между элементами определяется на основе нечеткого вывода. Представим нечеткое правило в виде  $A \Rightarrow B$ . Условие  $A$  в общем случае представлено в виде

$$\text{if } (x_1 \in A) \text{ and } \dots \text{ and } (x_j \in A) \text{ and } \dots \text{ and } (x_M \in A_M) \text{ then } (y \in B_i).$$

Для определения результирующего уровня активации применяется оператор логического умножения для отдельных составляющих условия в правиле

$$\mu_A(x) = \min_i(\mu_A(x_i)).$$

Точечная оценка результата определяется относительно центра области:

$$y_c = \frac{\int \mu_B(y) y dy}{\int \mu_B(y) dy}.$$

Если обозначить вектор входных воздействий через  $U = (u_k), k = \overline{1, K}$ , а результирующий вектор – через  $Y = (y_l), l = \overline{1, L}$ , то функционирование системы в направлении от входа к выходу определится зависимостью  $Y = F(U, W)$ , где  $W$  – параметры системы, включая внешние факторы. При наличии обратной связи в системе функциональная зависимость принимает рекуррентный вид:

$$Y(t) = F(U(t-1), Y(t-1), W),$$

где  $t$  – период развития системы. Данная модель позволяет имитировать поведение системы при варьировании величин вектора  $U$ . В результате нечеткого моделирования в режиме экспертной системы либо в режиме обучения строится модель вида  $Y(t) = F(U(t-1), Y(t-1), W)$ .

Пусть имеется нечеткая система факторов, влияющих на «готовность» студента к обучению

$$\bar{Y} = F(x_i, b_j) = \{y_k\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}, \quad k = \overline{1, l},$$

где  $n$  – количество входных параметров системы;  $m$  – количество мероприятий (управлений);  $l$  – количество выходных параметров, а в качестве входных данных  $x_i$  служат показания проведенного теста у студентов 1-го курса, в качестве  $b_j$  в этой системе рассматриваются всевозможные мероприятия для повышения компетентности выпускника вуза и качества высшего образования в целом. При помощи метода нечеткого моделирования, соответствующего подбора коэффициентов и многокритериальной оптимизации необходимо получить набор выходных данных  $y_k$  учебного и социального характера, отражающий степень влияния входных параметров  $x_i$  и рассмотренных мероприятий по повышению успеваемости и компетентности  $b_j$ . Действие формализовано в виде нечеткого



условия: «Если  $A...$ , то происходит  $B$ » и определяется на лингвистическом множестве.

### **Описание входных и выходных переменных**

Содержательная интерпретация нечеткой модели предполагает выбор и спецификацию входных и выходных переменных соответствующей системы нечеткого вывода. При этом в нечеткой модели предполагается использовать 10 входных переменных и 3 выходные. Были проанализированы и исследованы факторы, влияющие на успеваемость студента, на компетентность выпускника вуза и его трудоустройство. В итоге выбраны наиболее значимые факторы и представлены в построенной модели.

*Входные (1–10) и выходные (11–13) параметры:* 1) адекватность выбора специальности; 2) профессионализм преподавателей; 3) новые технологии; 4) навыки самоорганизации; 5) развитие умения мыслить; 6) здоровье; 7) контроль за усвоением материала; 8) техническое и методическое обеспечение; 9) реализация проектов; 10) коммуникабельность; 11) компетентность; 12) успеваемость; 13) трудоустройство.

*Влияние входных факторов на компетентность:* 1) влияние адекватности выбора специальности на компетентность специалиста (1–11); 2) влияние профессионализма преподавателей на компетентность специалиста (2–11); 3) влияние новых технологий на компетентность специалиста (3–11); 4) влияние навыков самоорганизации на компетентность специалиста (4–11); 5) влияние развития умения мыслить на компетентность специалиста (5–11).

*Влияние входных факторов на успеваемость:* 1) влияние адекватности выбора специальности на успеваемость (1–12); 2) влияние навыков самоорганизации на успеваемость (4–12); 3) влияние здоровья на успеваемость (6–12); 4) влияние контроля усвоения материала на успеваемость (7–12); 5) влияние технического и методического обеспечения на успеваемость (8–12).

*Влияние входных факторов на трудоустройство:* 1) влияние адекватности выбора специальности на трудоустройство (1–13); 2) влияние развития умения мыслить на трудоустройство (5–13); 3) влияние здоровья на трудоустройство (6–13); 4) влияние реализации проектов на трудоустройство (9–13); 5) влияние коммуникабельности на трудоустройство (10–13).

### **Нечеткий вывод**

Результатом нечеткого вывода является четкое значение переменной  $y^*$  на основе заданных четких значений  $x_k, k = \overline{1, n}$ .

В качестве схемы нечеткого вывода использован метод Мамдани. Далее определяются методы агрегирования подусловий. Поскольку во всех правилах в качестве логической связки для подусловий применяется только нечеткая конъюнкция (операция «И»), то в качестве метода агрегирования использована операция  $\min$ -конъюнкции. В качестве метода дефаззификации – метод центра тяжести. Агрегирование представляет собой процедуру определения степени истинности условий по каждому из правил системы нечеткого вывода. Конъюн-

юнкцией  $A \wedge B$  нечетких высказываний  $A$  и  $B$  называется бинарная логическая операция, результат которой является нечетким высказыванием, истинность которого определяется по формуле:  $T(A \wedge B) = \min\{T(A), T(B)\}$ .

Аккумуляция или аккумулярование в системах нечеткого вывода представляет собой процедуру или процесс нахождения функции принадлежности для каждой из выходных лингвистических переменных. Цель аккумуляции заключается в том, чтобы объединить или аккумуляровать все степени истинности заключений (подзаключений) для получения функции принадлежности каждой из выходных переменных.

Дефаззификация в системах нечеткого вывода представляет собой процедуру или процесс нахождения обычного (не нечеткого) значения для каждого из выходных лингвистических переменных. Цель дефаззификации заключается в том, чтобы, используя результаты аккумуляции всех выходных лингвистических переменных, получить обычное количественное значение каждого из выходных переменных, которое может быть использовано специальными устройствами, внешними по отношению к системе нечеткого вывода. При дефаззификации методом центра тяжести обычное (не нечеткое) значение выходной переменной равно абсциссе центра тяжести площади, ограниченной графиком кривой функции принадлежности соответствующей выходной переменной.

Формально алгоритм Мамдани может быть определен следующим образом:

- 1) формирование базы правил систем нечеткого вывода;
- 2) фаззификация входных переменных;
- 3) агрегирование подусловий в нечетких правилах продукций; для нахождения степени истинности условий каждого из правил нечетких продукций используются парные нечеткие логические операции; правила, степень истинности условий которых отлична от нуля, считаются активными и используются для дальнейших расчетов;
- 4) активизация подключений в нечетких правилах продукций; учитываются только активные правила нечетких продукций;
- 5) аккумуляция заключений нечетких правил продукций; осуществляется для объединения нечетких множеств, соответствующих термам подзаключений, относящихся к одним и тем же выходным лингвистическим переменным;
- 6) дефаззификация выходных переменных; традиционно используется метод центра тяжести.

### **Функции принадлежности**

При построении нечеткой модели подготовки специалиста было сделано предположение о том, что все рассматриваемые переменные измеряются в баллах в интервале действительных чисел от 0 до 3, от минимальной 0 до максимальной 3.

*Фаззификация входных и выходных переменных.* В контексте нечеткой логики под фаззификацией понимается не только отдельный этап выполнения нечеткого вывода, но и собственно процесс или процедура нахождения значений функции принадлежности нечетких множеств (термов) на основе обычных

(не нечетких) исходных данных. Фаззификацию еще называют введением нечеткости.

Целью этапа фаззификации является установление соответствия между конкретным (обычно численным) значением отдельной входной переменной системы нечеткого вывода и значением функции принадлежности соответствующего ей терма входной лингвистической переменной. После завершения этого этапа для всех входных переменных должны быть определены конкретные значения функций принадлежности по каждому из лингвистических термов, которые используются в подусловиях базы правил системы нечеткого вывода.

Для построения функций принадлежности была проведена экспертиза и установлены веса каждого фактора методом непосредственной оценки.

Итак, пусть группа экспертов оценила какой-либо объект, тогда  $x_j$  – оценка  $j$ -го эксперта,  $j = \overline{1, m}$ , где  $m$  – число экспертов. Для формирования обобщенной оценки группы экспертов чаще всего используются средние величины. Например, медиана, за которую принимается такая оценка, по отношению к которой число больших оценок равняется числу меньших. Требуется определить, насколько тот или иной фактор (объект) важен (существенен) с точки зрения какого-либо критерия, т. е. нужно определить вес каждого фактора. Один из методов определения весов состоит в следующем. Пусть  $x_j$  – оценка фактора  $i$ , данная  $j$ -м экспертом;  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, m}$ ,  $n$  – число сравниваемых объектов;  $m$  – число экспертов. Тогда вес  $j$ -го объекта, подсчитанный по оценкам всех экспертов, равен:

$$w_i = \left( \sum_{j=1}^m w_{ij} \right) m^{-1}, \quad w_{ij} = w_{ij} \left( \sum_{i=1}^n x_{ij} \right)^{-1},$$

$$i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}, \quad n = 10, \quad m = 14.$$

В качестве терм-множества первой входной переменной «Адекватность выбора специальности» будем использовать множество {«низкая», «средняя», «высокая»} с определенными функциями принадлежности термов.

Так как вес фактора «Адекватность выбора специальности», полученный после экспертизы, равен 2,02, то берем его как среднее значение для терма «средний». Затем рассчитаем разброс этого значения как погрешность в виде суммы разности полученного значения и значений, данных каждым экспертом:

$$p_i = \sum_{j=1}^m (w_i - w_{ij}).$$

Так получаем крайнее левое и крайнее правое значение терма «средний»:  $w - p = 1,67$  и  $w + p = 2,37$ . Числа 1,8 и 2,2 выбраны из анализа экспертизы как крайние значения термов «низкий» и «высокий» соответственно.

Таким же образом получены значения термов остальных лингвистических переменных: второй - «Профессионализм преподавателей», третьей - «Но-

вые технологии», четвертой - «Навыки самоорганизации», пятой - «Развитие умения мыслить», шестой - «Здоровье», седьмой - «Контроль за усвоением материала», восьмой - «Техническое и методическое обеспечение», девятой - «Реализация проектов», десятой - «Коммуникабельность».

### **Формирование базы правил систем нечеткого вывода**

Следующим этапом построения модели является построение базы правил. Имеется 3 группы факторов: первая группа на выходе дает уровень компетентности, вторая – успеваемость, третья - трудоустройство. Необходимо учесть, что в каждой из этих трех групп факторов наибольший интерес имеют те факторы, вес которых больше. Взяв 5 факторов, получаем 243 правила, но, выделив по 3 наиболее значимых фактора в группе, получаем минимальное число правил 27. К ним добавлено еще 13 правил для более полного описания модели.

Таким образом, можно уменьшить количество правил. Будем рассматривать множество  $T = \{\text{«низкие»}, \text{«средние»}, \text{«высокие»}\}$ .

Как было сказано ранее, при помощи метода нечеткого моделирования и соответствующего подбора весов необходимо получить набор выходных данных  $y_k$  учебного и социального характера, отражающий степень влияния входных параметров  $x_i$  и рассмотренных мероприятий по повышению успеваемости и компетентности  $b_j$ .

### **Анализ построенной системы**

Так, при низком показателе «Адекватности выбора специальности» (1-й входной параметр), среднем «Профессионализме преподавателей» (2-й), среднем уровне «Навыков самоорганизации» (4-й), высоком показателе «Развития умения мыслить» (5-й), высоком уровне «Здоровья» (6-й), высоком «Контроле за усвоением материала» (7-й) и низкой «Коммуникабельности» получаем средний показатель «Компетентности», высокий показатель «Успеваемости» и средний «Трудоустройства».

При среднем показателе 1-го входного параметра, низком 2-го, низком уровне 4-го, низком показателе 5-го, среднем уровне 6-го, высоком 7-го и высокой «Коммуникабельности» получаем низкий уровень «Компетентности», средний показатель «Успеваемости» и средний «Трудоустройства», что связано с расставленными весами факторов.

### **Заключение**

Работа посвящена решению проблемы процесса подготовки специалиста на основе теории нечетких множеств. Нечеткая логика дает возможность наиболее полно описать исследуемую модель, представимую нечетким графом. Выделено 10 факторов, влияющих в большей или меньшей степени на 3 выходных параметра: успеваемость студента, компетентность и трудоустройство выпускника. Взвешенные дуги графа между факторами и выходными данными задают взаимосвязи между ними. На выходе получаем коррелированные между собой данные. Программная реализация описанного моделирования осуществ-

лена в среде Matlab\_R2009b. Полученная разработка позволяет анализировать успеваемость студентов, указывать оптимальные условия для повышения компетентности выпускников вуза и снижать риски, связанные с трудоустройством неквалифицированных специалистов.

### **Список использованных источников и литературы**

1. *Бешелев, С. Д.* Математико-статистические методы экспертных оценок / С. Д. Бешелев, Ф. Г. Гурвич. – Москва : Наука, 1980. – 263 с.
2. *Гуляшинов, А. Н.* Теория принятия решений в сложных социотехнических системах / А. Н. Гуляшинов, В. А. Тененев, Б. А. Якимович. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2005. – 280 с.
3. *Орлов, А. И.* Допустимые средние в некоторых задачах экспертных оценок и агрегирования показателей качества // Многомерный статистический анализ в социально-экономических исследованиях. – Москва : Наука, 1974. – С. 388–393.
4. *Панкова, Л. А.* Организация экспертиз и анализ экспертной информации / Л. А. Панкова, А. М. Петровский, М. В. Шнейдерман. – Москва : Наука, 1984. – 120 с.
5. *Райхман, Э. П.* Экспертные методы в оценке качества товаров / Э. П. Райхман, Г. Г. Азгальдов. – Москва : Экономика, 1974. – 151 с.
6. *Заде, Л.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – Москва : Мир, 1976. – 165 с.
7. *Круглов, В. В.* Интеллектуальные информационные системы: компьютерная поддержка систем нечеткой логики и нечеткого вывода / В. В. Круглов, М. И. Дли. – Москва : Физматлит, 2002. – 252 с.

## Особенности использования мультимедиа технологий в образовательном процессе вуза

Т. В. Бушмакина

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*В статье рассмотрено понятие и характеристики мультимедиа технологий. Описаны основные мультимедиа технологии, применяемые в образовательном процессе вуза. Приведены преимущества и недостатки использования мультимедиа технологий в процессе обучения.*

**Ключевые слова:** мультимедиа технологии, мультимедиа средства, информационные технологии, интерактивные презентации.

В настоящее время одним из перспективных направлений совершенствования образовательного процесса является применение мультимедиа технологий. Мультимедийные средства, используя современные технологии программирования, позволяют эффективно осуществлять проектирование и реализацию содержания, методов и форм обучения в учебном процессе с применением технических и программных средств.

Термин «мультимедиа» буквально означает «более чем один носитель информации». Поэтому под мультимедиа сегодня понимают возможность использовать в выполняющихся программах информацию из различных источников (музыка, речь, видео и т. п.). Оперативную обработку информации от всех этих источников осуществляет персональный компьютер.

Понятие мультимедиа многогранно и охватывает как идею, технологию и продукт, сделанный на ее основе, так и компьютерное аппаратное и программное обеспечение, а также особый вид информации. Рассмотрим некоторые содержательные определения:

Мультимедиа – это особый обобщающий вид информации, которая объединяет в себе как традиционную статистическую визуальную информацию (текст и графику), так и динамическую информацию разных типов (речь, музыку, видеофрагменты, анимацию и т. п.) [1].

Мультимедиа – это современные компьютерные технологии, позволяющие объединить в программно-аппаратной системе различные типы мультимедиа данных (изображения, звук, видео, тактильные и другие ощущения) для создания единой информационной среды в целях воздействия через органы чувств на восприятие человека [2].

Таким образом, в широком смысле мультимедиа обозначает спектр информационных технологий, использующих специальные программные и технические средства с целью наиболее эффективного воздействия на пользователя [3].

Применение новых информационных технологий является необходимым условием развития более эффективных подходов к обучению и совершенствованию методики преподавания. На сегодняшний день можно выделить следующие мультимедиа технологии, используемые в образовательном процессе вуза:

– *Линейная мультимедиа презентация.* Представляет собой динамичный ролик со сложной графикой, видеовставками, звуковым сопровождением и отсутствием системы навигации.

– *Интерактивная мультимедиа презентация.* Представляет собой совокупность мультимедийных компонентов, структурированных по иерархическому принципу и управляемых через специальный пользовательский интерфейс.

– *Мультимедийные обучающие игры.* Это программы, позволяющие пользователю повысить уровень своих знаний в той или иной области, представленные в легкой игровой форме.

– *Интерактивная доска.* Это сенсорный экран, подсоединенный к компьютеру, изображение с которого передает на доску проектор. Достаточно только прикоснуться к поверхности доски, чтобы начать работу на компьютере. Она реализует один из важнейших принципов обучения – наглядность. Интерактивная доска работает вместе с компьютером и видеопроектором, представляя собой единый комплекс.

– *Интерактивный опрос.* Такой опрос предусматривает во время проведения занятий наличие на столах студентов специальных беспроводных пультов, с помощью которых они могут отвечать на предложенные им тесты и вопросы. А преподаватель может мгновенно получить информацию в виде результатов тестов о сформированности у студентов знаний по данной теме.

– *Специальные образовательные программы.* Это специально разработанные программы для организации занятий, которые позволяют студентам изучать на персональных компьютерах конкретную дисциплину.

– *Мультимедийный экран.* Позволяет при проведении занятий наглядно демонстрировать презентации, обучающие видеофильмы, а также схемы, чертежи, графики и т. д.

– *Диагностический комплекс.* Данная технология позволяет выявить у студентов уровень текущих знаний.

Организация аудиторных занятий с помощью мультимедиа технологий позволяет экономить время, тем самым интенсифицируется процесс изложения материала. При выборе мультимедийного средства обучения преподавателю необходимо учитывать особенности и специфику учебного предмета. Мультимедийные технологии должны соответствовать целям и задачам курса обучения и органически вписываться в учебный процесс.

Использование в обучении средств мультимедиа и мультимедиа технологий позволяет задействовать наибольшее количество каналов восприятия: зрительный, слуховой, все сенсорные каналы. Это должно усилить интерес обучающихся к изучаемой дисциплине и, как следствие, повысить качество знаний [4].

Презентация является наиболее распространенной формой мультимедийных педагогических технологий, применяемых в вузе. Презентации эффектив-

ны как для гуманитарных, так и для технических направлений подготовки. Широкий круг пользователей (студенты, преподаватели, аспиранты) в процессе разработки сталкиваются с необходимостью готовить или контролировать создание мультимедиапрезентаций.

Мультимедиапрезентация будет эффективной, если реализован целенаправленный информационный процесс. Он начинается с этапа планирования и заканчивается разработкой слайдов презентации. Современные презентации могут включать в себя анимированный ролик, видеофрагменты, интерактивную графику, диаграммы и звуковое сопровождение. Программы по созданию интерактивных презентаций очень разнообразны: ФотоШоу Pro, Microsoft Office PowerPoint, Impress, Kingsoft Presentation, ProShow Producer, SmartDraw, LibreOffice, GoogleDocs. При создании мультимедиапрезентаций к учебным занятиям все перечисленные программы не могут составить реальную конкуренцию Microsoft PowerPoint. Так как PowerPoint сочетает в себе ряд значительных преимуществ: большие возможности (работа с текстом и изображением, возможность вставки видео- и аудиофрагментов, анимации); простой и понятный интерфейс; универсальность (возможность проиграть презентацию на любом компьютере).

Но при всей эффективности включения в образовательный процесс лекций мультимедийных технологий и средств необходимо помнить, что ни одна компьютерная презентация не сможет заменить педагога [5]. Презентации отводится всего лишь второстепенная роль вспомогательного дидактического средства.

Мультимедиа являются важной частью при создании студенческих проектов, подготовке рефератов, отчетов по практике, выполнении курсовых работ, обработке результатов исследований. Использование таких технологий позволяет развить навыки анализа, обобщения и структурирования информации, подбора и логического выстраивания материала, визуализации его для улучшения восприятия.

Наиболее интересный вариант использования в самостоятельной работе обучающимися мультимедиа технологий – это разработка проектов. Для студентов проект представляет собой возможность:

- самостоятельной индивидуальной работы или работы в группах;
- решить интересную проблему;
- публично показать достигнутый результат в виде презентации;

Это позволяет студентам самостоятельно приобретать знания в процессе решения поставленной проблемы.

Таким образом, использование мультимедийных технологий в учебном процессе позволяет перейти от пассивного к активному способу реализации образовательной деятельности, при котором студент является главным участником процесса обучения.

Применение мультимедиа технологий в образовательном процессе обладает следующими достоинствами:

- наглядность – возможность использования разноцветной графики, анимированных изображений, звукового сопровождения, гипертекста;



- актуальность – возможность своевременного обновления учебного материала;
- экономичность – позволяет сократить время на организацию учебного процесса;
- гибкость – позволяет заниматься в удобное время и в удобном темпе;
- технологии гипертекста – использование гиперсвязей с дополнительной литературой в электронных библиотеках или образовательных интернет-ресурсах.

Но также видно, что использование в учебном процессе мультимедиа технологий сталкивается с рядом недостатков, а именно:

- чрезмерное использование компьютерных технологий негативно отражается на здоровье всех участников образовательного процесса;
- сокращение социальных контактов участников образовательного процесса;
- незнание информационных технологий самими преподавателями, отсутствие навыков работы с ними;
- сложность некоторых программ и оборудования;
- отсутствие стабильной сети Интернет;
- доступность не для всех обучаемых;
- сложность при моделировании обратной связи;
- с вязы с большим потоком обучающихся проведение лекционных занятий в аудитории с компьютерами невозможно.

Мультимедийные технологии обогащают процесс обучения, позволяют сделать обучение более эффективным, вовлекая в процесс восприятия учебной информации большинство обучающихся. В современных условиях обучающиеся в высшей школе должны в совершенстве владеть основами компьютерных технологий, проектированием и моделированием, согласно выбранному направлению подготовки, а также применять полученные знания в сфере своей профессиональной деятельности [6].

Таким образом, мультимедиа является одним из наиболее перспективных направлений использования информационных технологий в сфере образования. Технологии мультимедиа позволяют повысить: качество теоретической подготовки студентов, наглядность изучаемых материалов и как следствие их запоминаемость. Применение мультимедиа делает занятие более насыщенным, запоминающимся и интересным.

### **Список использованных источников и литературы**

1. *Григорьев, С. Г.* Мультимедиа в образовании / С. Г. Григорьев, В. В. Гриншкун. – URL: <http://www.idu.ru/open/mm>.
2. *Крапивенко, А. В.* Технологии мультимедиа и восприятие ощущений: учеб. пособие. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 271 с.
3. *Нужнов, Е. В.* Мультимедиа технологии. Основы мультимедиа технологий : учеб. пособие / Е. В. Нужнов. – 2-е изд. – Ростов-на-Дону, Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2017. – 198 с.

4. *Шилягина, А. М.* Мультимедиа-технологии в образовании // Системы компьютерной математики и их приложения. – 2015. – № 16. – С. 269–273.

5. *Артюшкина, Т. А.* Мультимедиа-презентации в повышении эффективности вузовской лекции / Т. А. Артюшкина, П. Н. Земляникин // Непрерывное профессиональное образование: теория и практика. – Абакан, 2018. – С. 189–193.

6. *Соболева, Н. В.* Использование мультимедиа технологий в высшей школе / Н. В. Соболева, Т. А. Ляшенко // Тенденции развития науки и образования. – Самара, 2018. – С. 85–87.

## Психологические барьеры в учебной деятельности слабоуспевающих студентов технических вузов

*И. В. Васильева, А. В. Корепанова*

Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова

*В статье рассматриваются сложности, с которыми сталкиваются преподаватели высшей школы при работе со слабоуспевающими студентами технического вуза при дистанционном и онлайн-режимах обучения. Формулируются особенности проявления и структура психологических барьеров у слабоуспевающих студентов технического вуза, разработана модель преодоления ими психологических барьеров в учебной деятельности. Пример рассматривается на базе одного из ведущих вузов РФ – Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова.*

**Ключевые слова:** психологические барьеры, слабоуспевающий студент, модель преодоления психологических барьеров.

### **Введение**

Обучение в высшем учебном заведении является стрессом для многих обучающихся, а для слабоуспевающих студентов – психологическим барьером. Из-за высокой тревожности, страха предмета и педагога, боязни неудачи, низкой самооценки, неуверенности и чрезмерной самокритичности слабоуспевающие студенты не в состоянии самостоятельно принимать решения, чаще всего болезненно реагируют на различного рода стрессовые ситуации, не умеют общаться и идти на контакт как друг с другом, так и с преподавателем. Преодоление психологических барьеров у слабоуспевающих студентов в учебной деятельности представляет собой одну из важнейших проблем современной науки и практики.

Особенно эти проблемы актуальны для технических вузов, так как в преподавательской среде таких вузов зачастую преобладает технократическое мышление, профессиональное предметное знание доминирует над отношением к студенту как к субъекту и развивающейся личности.

### **Основная часть**

Анализ научной литературы показал, что в настоящее время проблема психологических барьеров значима для многих отечественных и зарубежных ученых. Впервые описывается воздействие психологического барьера на развитие личности человека в трудах зарубежных авторов К. Левина, З. Фрейда, в отечественной педагогике и психологии – в трудах К. Д. Ушинского, позже в работах Б. М. Кедрова. Психологический барьер является объектом исследо-

ваний таких ученых, как: Г. М. Андреева, Е. В. Андриенко, И. А. Зимняя, Ю. С. Крижанская, В. А. Лабунская, Г. Лозанов, А. К. Маркова, Б. Д. Парыгин [2], С. С. Назметдинова, В. А. Попков, Р. Х. Шакуров [3] и др. [1, 4].

Полезность этих научных идей и выводов весома, но остается ряд сложностей, которые следует разрешить: раскрытие содержания понятия «психологические барьеры слабоуспевающего студента», выделение подходов к выявлению особенностей психологических барьеров и педагогических условий для их преодоления или снижения.

Психологический барьер в учебной деятельности студента – психическое состояние и свойство личности студента, а также педагогическое явление, описываемое затруднениями студента, возникающими при решении им учебных задач.

В результате анализа литературы и педагогического опыта нами были выявлены противоречия между наличием психологических барьеров в обучении у значительного количества студентов технического вуза и слабой проработанностью моделей, практических рекомендаций и технологий преодоления или снижения психологических барьеров в учебной деятельности студентов [5].

Вытекающей из этого проблемой исследуемой работы становится структура и особенности проявления психологических барьеров в учебной деятельности слабоуспевающих студентов технического вуза и на чем должна основываться модель преодоления слабоуспевающими студентами психологических барьеров в обучении?

Эксперимент проводится на базе одного из ведущих вузов РФ – Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова. Выборка состоит из 95 респондентов начальных курсов очной формы обучения машиностроительного факультета, которые были отнесены к группе слабоуспевающих на основании анализа аттестационных ведомостей, результатов балльно-рейтинговой системы, бесед со студентами и кураторами групп.

Нами установлено, что содержательной характеристикой психологического барьера являются эмоциональные переживания, а динамические характеристики выражаются в степени психической напряженности, силе и глубине ее переживания личностью, длительности протекания во времени.

Классификаций барьеров в психолого-педагогической литературе представляет собой несчетное число. В данной работе была сделана попытка самостоятельно структурировать понятие «психологический барьер» и представить обобщенную модель психологических барьеров личности в виде блок-схемы (рисунок).

Через организацию развития и саморазвития психических сфер слабоуспевающего студента можно обеспечить преодоление у него психологических барьеров. Этот вывод находит свое отражение в следующих положениях и результатах диагностики.

Исследование отразило наличие и характер психологических барьеров у слабоуспевающих студентов технического вуза (табл. 1). В нашем исследовании отмечен умеренный уровень выраженности по большинству исследуе-

мых барьеров. Наиболее ярко выраженным барьером у слабоуспевающих студентов является барьер напряженных психических состояний (42 %), это связано с тем, что студенты (особенно первых курсов) перегружены новыми наукоёмкими знаниями, поступающими через различные источники информации, но ограничены временем для ее переработки и осмысления.



Модель структуры психологических барьеров личности

Таблица 1. Уровень выраженности психологических барьеров у слабоуспевающих студентов (автор методики Н. А. Подымов)

Психологический барьер	Уровень выраженности барьера, %		
	Высокий	Умеренный	Низкий
Социальный барьер	31	64	5
Барьер напряженных психических состояний	42	58	–
Фрустрационный барьер	33	67	–
Барьер стресса	33	66	1
Барьер кризиса	27	73	–
Барьер творчества	24	69	7

Второе ранговое место занимают – барьер стресса, фрустрационный барьер и барьер социальных отношений. На последнем месте по выраженности оказался барьер творчества. Но все же он присутствует почти у каждого четвертого студента, говоря о том, что из-за нехватки времени на внеучебную деятельность творческая деятельность блокируется во многих ее проявлениях.

Исследование самооценки психических состояний студентов по тесту Айзенка показало высокий уровень состояний тревожности и фрустрации. Это свидетельствует о чрезмерном нервно-психическом напряжении слабоуспевающих студентов технических вузов, их низкой самооценке.

Отмечен умеренный уровень самореализации слабоуспевающих студентов. Тенденция к увеличению способностей к саморазвитию и самореализации

в динамике: чем выше курс, тем значимее процент самореализации. Мы это связываем с активной ролью управления внеучебной работы вуза, особенно в работе с первым курсом.

С помощью теста-опросника Н. А. Подымова «Выраженность психологических барьеров», были изучены стратегии, которые выбирают слабоуспевающие студенты (табл. 2).

**Таблица 2. Выбор стратегии преодоления психологических барьеров слабоуспевающими студентами технического вуза**

Стратегия	Студенты	
	Кол-во участников, чел	% участников
Фиксация	20	21
Самоактуализация	35	37
Психологическая защита	16	17
Адаптация	24	25

Стратегию самоактуализации выбирают наибольшее количество респондентов – 37 % всех студентов, стратегию психологической защиты – наименьшее количество (17 %). Таким образом, более половины опрошенных слабоуспевающих студентов (58 %) испытывают те или иные психологические барьеры в обучении, связанные с негативным переживанием ситуации учебной деятельности. Психологический барьер у данных студентов выражается в пассивности и отсутствии мотивации на занятиях, стремлении уклониться от выполнения заданий, откладывании их выполнения на последний момент.

Очевидно, что значительная часть слабоуспевающих студентов технического вуза испытывают психологические барьеры в обучении, обусловленные негативными переживаниями различных ситуаций учебной деятельности.

В ходе исследования была разработана модель формирования конструктивной стратегии преодоления психологических барьеров у слабоуспевающих студентов. Модель носит комплексный характер и опирается на трехкомпонентную структуру психологического барьера, предполагает реализацию педагогических условий преодоления студентами барьеров, направлена на результативное обучение студентов навыкам саморегуляции, самоконтроля, способам учебной деятельности, принятию трудных ситуаций и осознанию собственных позитивных возможностей, что и составляет суть конструктивной стратегии преодоления барьеров.

Кураторы групп, специалисты деканата, заместитель декана по внеучебной и воспитательной работе, преподаватели, тьюторы, специалисты по работе со студентами, педагоги-психологи – основные субъекты, которые должны участвовать в поддержке слабоуспевающих студентов и формировании у них конструктивной стратегии преодоления психологических барьеров. Основные направления деятельности участников по осуществлению психологической поддержки студентов: психологическое просвещение и консультирование, совместные бесе-

ды преподавателя и обучающихся с психологом-педагогом, разнообразные формы работ: элективные курсы; консультации; тренинги, создание индивидуальных образовательных программ для обучающихся в рамках очной и дистанционной локации, помощь в выполнении самостоятельных работ.

На основании модели преодоления слабоуспевающими студентами психологических барьеров в учебной деятельности проработаны рекомендации в виде дерева решений, которые содержат основные принципы работы со слабоуспевающими студентами.

### **Заключение**

Важную роль в процессе усвоения знаний человеком отводится периоду его обучения в высшем учебном заведении. Субъект «студент» во время обучения находится в очень благоприятном возрасте для овладения социально значимым опытом в виде знаний, умений, творчества и ценностного отношения к миру, а также перестройки личности, осознания психологических барьеров и их преодоления.

Хочется отметить, что основной задачей вузовских преподавателей, а также педагогов-психологов, кураторов, специалистов в области воспитания является не упустить, а поддержать и начать активно работать со слабоуспевающими студентами, выводя их на новый уровень личностного и профессионального развития. Это важный шаг в понимании преподавания как ценности.

### **Список использованных источников и литературы**

1. *Мязина, М. Б.* Особенности психологического барьера, возникающего в процессе профессиональной подготовки у студентов технического вуза : дисс. ... канд. психол. наук. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет, 2003. – 146 с.
2. *Парыгин, Б. Д.* Психологический барьер и его природа. Социальная психология и философия. – Ленинград : Изд-во ЛГПИ им. Герцена, 1975. – 176 с.
3. *Шакуров, Р. Х.* Барьер как категория и его роль в деятельности // Вопросы психологии. – 2001. – № 1. – С. 3–18.
4. *Дроздова, Н. В.* Формирование конструктивной стратегии преодоления психологических барьеров в образовательном процессе у студентов-психологов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – Т. 11, № 4 (3). – С. 669–673.
5. *Васильева, И. В.* Психологические барьеры слабоуспевающих студентов в учебной деятельности // Электронный научный журнал. – 2020. – № 7 (36). – С. 222–224.

## **Проектирование элементов электронного курса на основе таксономической модели математических компетенций для студентов технического вуза**

*А. Б. Искандерова*

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*В статье представлен подход для разработки адаптивных заданий для наполнения элементов ЭУК, способствующих поэтапному и эффективно формированию компетенций студентов бакалавриата в техническом вузе на примере изучения дисциплин математического цикла.*

**Ключевые слова:** электронный учебный курс, общепрофессиональные компетенции, адаптивный тест, таксономическая модель формирования математических компетенций.

Электронный учебный курс (ЭУК) является одной из форм организации учебной деятельности студентов технических вузов. В период пандемии *COVID-2019* в системах электронного обучения различных учебных заведений были размещены курсы, которые используются в учебном процессе очной или дистанционной форм.

Стратегическое планирование учебного курса по конкретной дисциплине – это, как правило, прерогатива педагога, который преподает данный предмет студентам вуза. На этом этапе определяются цель и задачи ЭУК, а также технические возможности электронной платформы, на которой размещается курс [3].

В научно-педагогической литературе [2] выделены следующие критерии правильно поставленной цели, которые, на наш взгляд, применимы и для разработки ЭУК:

- постановка цели должна вытекать из существующих условий обучения;
- цель должна быть гибкой (ее можно корректировать при возникновении неблагоприятных условий);
- реально достижимой;
- диагностичной;
- полной без избыточности.

Реальная достижимость цели определяется условиями обучения, материальной базой вуза, техническими возможностями платформы, на которой размещен ЭУК. Если по какой-либо причине условия не удовлетворены, то цели придется снижать до реальных (гибкость педагогической цели).

Диагностичность цели означает, что степень ее достижение поддается прямому или косвенному измерению, а его результаты могут быть представлены в единицах измерения какой-либо оценочной шкалой.



Полнота целей без избыточности определяется принципом минимальной достаточности [7], который связан с целостностью учебной дисциплины и с ее определенным местом в учебном плане подготовки студента бакалавриата (дисциплины (модули) обязательной части; части, формируемой участниками образовательных отношений) [5].

На стадии планирования ЭУК производится отбор учебного материала в соответствие с рабочей программой дисциплины. Формы представления учебного материала, заданий для контроля текущего уровня подготовки студентов, для рефлексии собственной учебной деятельности обучающихся зависят от технических особенностей электронной платформы, на которой находится курс.

Структура популярной системы электронного обучения (СЭО) *Moodle* представлена «ресурсами» и «элементами курса». При реализации обучения будущих бакалавров дисциплинам математического цикла используются следующие элементы курса:

- «Лекция» (обеспечивает возможность преподавателя размещать контент в гибкой форме);
- «Задание» (позволяет разработчику ЭУК добавлять коммуникативные задания, собирать студенческие работы, оценивать их и предоставлять отзывы);
- «Форум» (дает возможность участникам учебного процесса общаться в асинхронном режиме);
- «Тест» (позволяет преподавателю создавать тесты, состоящие из тестовых заданий различных типов и различного уровня трудности).

Преподаватель наполняет элементы ЭУК учебным материалом, заданиями для контроля текущего уровня подготовки студентов, заданиями для рефлексии учебной деятельности.

Эффективность реализации электронного курса в учебном процессе вуза определяется в том числе адаптивностью обучающихся и контрольных материалов к текущему уровню сформированности компетенций студентов [5]. Адаптивность содержания элементов ЭУК содействует раскрытию потенциальных возможностей обучающихся, непрерывному увеличению объема учебного тезауруса, развитию творческих способностей будущих бакалавров. В отечественной педагогике актуальной считается концепция опережающего обучения, опирающаяся на учение Л. С. Выготского [1], согласно которому развитие в процессе обучения достигается путем постоянного преодоления границы между зонами актуального и ближайшего развития обучающегося, при предъявлении заданий, заставляющих его работать на максимальном уровне своих когнитивных возможностей.

Однако в научно-педагогической литературе не в полной мере раскрыт вопрос об обосновании отбора и составления учебных, контрольных и рефлексивных материалов для наполнения элементов ЭУК с целью поэтапного и эффективного формирования компетенций студентов, изучающих математические дисциплины в техническом вузе.

Для обоснования отбора учебного материала для наполнения элементов ЭУК нами была использована обобщенная таксономическая модель формирования математических компетенций [4].

Модель предусматривает формирование и контроль степени сформированности трех групп компетенций: базовых, методологических, креативных.

Базовые математические компетенции объединяют минимальные универсальные знания, умения, способности, которые должны быть сформированы у всех студентов бакалавриата по данной дисциплине, они необходимы для дальнейшего продолжения обучения.

Методологические математические компетенции трактуются нами как совокупность обобщенных знаний, умений, способностей, обеспечивающих владение способами, принципами, методами организации теоретической и практической деятельности в рамках дисциплин математического цикла на уровне, достаточном для формирования общепрофессиональных и профессиональных компетенций.

Креативные компетенции предполагают наличие творческих способностей студента, характеризуются готовностью к созданию новых идей, отклоняющихся от традиционных или принятых схем мышления, способностью решения проблемы оригинальным способом, комбинирования различных алгоритмов.

Каждая группа естественно-научных компетенций представлена когнитивными и деятельностными уровнями.

Когнитивный уровень компетенций – это идентификатор результата обучения, характеризующий знаниевую, теоретическую составляющую компетенций.

Деятельностные уровни компетенции – это идентификатор результата обучения, отражающий практическую, прикладную составляющую.

Таксономическая модель формирования математических компетенций содержит мотивационный компонент обучающей функции, который, как показывает опыт, в полной мере не поддается диагностике. Формированию мотивации к обучению способствует рефлексия своей учебной деятельности студентом вуза. Будущий бакалавр берет на себя ответственность за степень сформированности уровней компетенций при изучении дисциплины. Рефлексия является механизмом понимания природы затруднений, которые могут возникнуть в процессе изучения дисциплины [6].

В качестве примера рассмотрим систематизацию учебного материала элемента ЭУК «Тест».

На основе анализа рабочей программы необходимо разработать учебно-таксономический тезаурус раздела дисциплины и классифицировать дескрипторы тезауруса.

В табл. 1 представлен пример фрагмента учебного тезауруса темы «Аналитическая геометрия на плоскости». Выделены классы дескрипторов: первичные понятия, базовые понятия и т. д.

Далее преподаватель разрабатывает банк тестовых заданий (ТЗ) различных форм. Формы ТЗ ограничены техническими возможностями СЭО *Moodle*.

В табл. 2 приведены примеры форм ТЗ.

Для реализации свойства адаптивности проектируемых тестов к текущему уровню сформированности математических компетенций студентов бакалавриата разработана технологическая карта, в которой отражены адаптивный

тезаурус, периоды обучения, виды математических компетенций, формируемых в рамках изучаемой темы. Структура технологической карты (фрагмент) представлена в табл. 3.

**Таблица 1. Учебный таксономический тезаурус по теме «Аналитическая геометрия на плоскости» (фрагмент)**

№	Класс дескриптора	Название дескриптора
I	Первичные понятия	1. Точка 2. Координаты точки 3. Тело отчета 4. Ось координат
II	Базовые понятия	5. Прямоугольная (декартова) система координат 6. Полярная система координат 7. Радиус-вектор

**Таблица 2. Примеры тестовых заданий различных форм**

№	Формы ТЗ	ТЗ										
1	ТЗ закрытой формы с выбором одного правильного ответа	Система координат, которая задается двумя взаимно перпендикулярными осями, называется: 1 декартовой 2 полярной 3 пространственной 4 сферической										
2	Задания открытой формы (дополнение)	Кривые второго порядка, имеющие единственный центр, называются .										
3	Задания на установление соответствия между элементами двух множеств	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Координаты в декартовой системе</th> <th>Координаты в полярной системе</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1) <math>x</math></td> <td>А) <math>r</math>      Б) <math>r \cdot \cos \varphi</math></td> </tr> <tr> <td>2) <math>y</math></td> <td>В) <math>\tan \varphi</math>      Г) <math>r \cdot \sin \varphi</math></td> </tr> <tr> <td>3) <math>\sqrt{x^2 + y^2}</math></td> <td>Д) <math>r \cdot \cot \varphi</math>      Е) <math>r \cdot \tan \varphi</math></td> </tr> <tr> <td>4) <math>\frac{y}{x}</math></td> <td>Ж) <math>x</math>      З) <math>\varphi</math></td> </tr> </tbody> </table>	Координаты в декартовой системе	Координаты в полярной системе	1) $x$	А) $r$ Б) $r \cdot \cos \varphi$	2) $y$	В) $\tan \varphi$ Г) $r \cdot \sin \varphi$	3) $\sqrt{x^2 + y^2}$	Д) $r \cdot \cot \varphi$ Е) $r \cdot \tan \varphi$	4) $\frac{y}{x}$	Ж) $x$ З) $\varphi$
Координаты в декартовой системе	Координаты в полярной системе											
1) $x$	А) $r$ Б) $r \cdot \cos \varphi$											
2) $y$	В) $\tan \varphi$ Г) $r \cdot \sin \varphi$											
3) $\sqrt{x^2 + y^2}$	Д) $r \cdot \cot \varphi$ Е) $r \cdot \tan \varphi$											
4) $\frac{y}{x}$	Ж) $x$ З) $\varphi$											
4	Задания с принципом со-звучности.	Оси координат делят плоскость на четыре области, которые называются: 1 квадратами 2 квартетами 3 квадрантами * 4 кварталами										
5	Цепные задания	<p>1. _____ – называется геометрическое место всех точек <math>M(x, y)</math>, для которых сумма расстояний до двух заданных точек <math>F_1(+c, 0)</math> и <math>F_2(-c, 0)</math> (называемых фокусами) постоянна и равна <math>2a</math>.</p> <p>2. Его каноническое уравнение принимает вид</p> <p>А) <math>(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 - (z - z_0)^2 = R^2</math>      В) <math>\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1</math></p> <p>Б) <math>Ax + By + C = R</math>      Г) <math>x^2 + y^2 + z^2 = R^2</math></p>										



3. *Зайцева, Л. В.* Технология разработки адаптивных электронных учебных курсов для компьютерных систем обучения // Образовательные технологии и общество. – 2008. – № 11 (1). – С. 400–412. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_9914168\\_81953256.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_9914168_81953256.pdf) (дата обращения: 07.06.2021).

4. *Искандерова, А. Б.* Таксономическая модель математических компетенций студентов бакалавриата технического вуза / А. Б. Искандерова, Е. Г. Булатова // Вестник ИжГТУ. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 123–128.

5. *Искандерова, А. Б.* Проектирование адаптивных контрольно-обучающих тестов для студентов бакалавриата в техническом вузе : монография / А. Б. Искандерова. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2013. – 128 с.

6. *Искандерова, А. Б.* Рефлексия учебной деятельности студентов в условиях цифровизации образования // Цифровизация инженерного образования : сборник материалов международной онлайн-конференции, Ижевск, 30 марта – 1 апреля 2021 г. – Ижевск : Изд-во УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2021. С. 265-270. – URL: <http://distant.istu.ru/conf/digest2021.pdf> (дата обращения: 08.06.2021).

7. *Соколов, В. М.* Начала элементарной теории управления образовательными системами : учеб. пособие. – Нижний Новгород : Нижегород. гуманитар. центр, 1999. – 33 с.

## Практика применения дистанционных технологий обучения при возникновении непредвиденных ситуаций

*К. В. Кетова, М. С. Кузьмин, А. В. Корепанова, И. В. Васильева*

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*В статье рассматриваются сложности, с которыми пришлось столкнуться преподавателям высшей школы в момент массового перехода на дистанционное обучение при возникновении непредвиденной ситуации, вызванной пандемией 2019 года. Рассматривается краткая история появления и развития дистанционного обучения, а также информационно-цифровые ресурсы, которые оказались наиболее востребованными в данной ситуации. Формулируются выявленные проблемы, которые проявились в процессе обучения при возникновении ситуации срочного перехода на обучение онлайн. Пример рассматривается на базе одного из ведущих вузов РФ – Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова.*

**Ключевые слова:** дистанционное обучение, режим онлайн, информационно-цифровые ресурсы, качество обучения.

### Введение

Как в отечественной, так и в зарубежной научной литературе имеется достаточно исследований, посвященных проблеме внедрения автоматизированных технологий при обучении [1–3]. Помимо возможности использования автоматизированных технологий непосредственно при изложении учебного материала лектором, при выполнении практических заданий и лабораторных работ в рамках преподаваемых дисциплин учебных заведений, автоматизированные технологии открывают широкие перспективы для дистанционного и самостоятельного обучения.

В современных условиях быстро меняющегося мира существует высокая потребность человека в получении актуальных знаний, соответствующих окружающим реалиям. Для реализации возможности их получения в практику обучения широко вошли формы дистанционного и самостоятельного обучения. Помимо этой функции, форма дистанционного обучения нашла применение при возникновении непредвиденной ситуации, вызванной пандемией 2019 года. Вопросы, связанные со всеобщим переходом на дистанционную форму обучения в этот период, стали актуальны для всех стран. Эта проблема потребовала анализа, результаты исследований по ряду разных стран представлены, например, в работах [4–7]. Интересно сопоставление подходов к оценке проблемы в Индии [4], Испании [5], Канаде [6], России [7].

## **Информационно-цифровые ресурсы, используемые для реализации технологий дистанционного обучения**

При дистанционном обучении коммуникации осуществляются через каналы интернет-связи и базируются на следующих информационных технологиях: электронная почта, форумы, чаты, аудио- и видеоконференции. Анализ некоторых из этих каналов связи представлен в работе С. В. Ильина [8] и в работе О. М. Перминовой и Р. В. Файзуллина [9].

Рассмотрим некоторые информационно-цифровые ресурсы, применяемые для реализации формы дистанционного обучения.

Одним из элементов интернет-общения является мессенджер от Майкрософт Skype. Он позволяет общаться пользователям между собой в реальном времени с помощью текстовых сообщений, по аудиосвязи и видеосвязи. Также здесь возможна передача файлов и организация видеоконференций.

Наибольшую популярность среди пользователей при реализации дистанционной формы обучения в период пандемии приобрела облачная платформа Zoom. Она активно использовалась и продолжает использоваться для проведения видеоконференций, вебинаров и других подобных онлайн-мероприятий. Для работы пользователь получает идентификатор и использует его для своего участия в онлайн-обучении. Платформа Zoom – наиболее эффективный инструмент взаимодействия преподавателя и студентов в режиме онлайн. Так, эта платформа активно используется в Ижевском государственном техническом университете имени М. Т. Калашникова [10].

Также в рамках обучения в высших учебных заведениях используется видеохостинг YouTube, который предоставляет пользователям возможность хранения и просмотра в любое удобное время видео. Эта форма предоставления информации приобрела популярность при помещении на видеохостинг лекционного материала преподавателями высших учебных заведений при удаленной системе обучения.

Безусловным лидером современного программного обеспечения, позволяющего преподавателю и обучающемуся эффективно взаимодействовать, является система Moodle. Широкое применение система Moodle нашла и в Ижевском государственном техническом университете имени М. Т. Калашникова. Это популярная среда дистанционного обучения, позволяющая разрабатывать и вести электронные курсы как в дистанционном режиме, так и в качестве поддержки очного обучения. Гибкая, с обширным инструментарием, дружественным веб-интерфейсом, масштабируемая. Не требует установки на компьютер конечных пользователей. Предназначение цифрового образовательного ресурса – организация удаленного обучения. Это инновационная модель получения образования в режиме онлайн из любого удобного обучающемуся места, снабженного интернет-сетью, веб-камерой и необходимыми средствами, такими как наушники, принтер, сканер и др. [11].

Существуют и менее популярные в России продукты, которые могут быть использованы для реализации технологий дистанционного обучения. Так, например, платформа iSpring разрабатывает инструменты для создания электрон-

ных курсов (ее разработчики предлагают использовать для корпоративного обучения). Для работы в iSpring достаточно зарегистрироваться, создать свой аккаунт и загрузить учебные материалы. Далее, следует пригласить обучающихся и назначить им курсы, получать отчеты и контролировать результаты обучения.

Можно использовать еще одну систему обучения будущего Flora LMS, которая представляет собой онлайн-платформу для создания курсов и продажи их по всему интернету. После приобретения этой платформы покупателю выдается документация с детальными настройками, возможностями использования и рекомендациями по продаже.

Также для обучения студентов стали применять не только известные и вышеперечисленные системы дистанционного обучения, но и различные порталы.

Тем не менее в условиях возникновения непредвиденной ситуации и необходимости всеобщего перехода на дистанционное обучение в российских вузах, в частности в Ижевском государственном техническом университете имени М. Т. Калашникова, были использованы наиболее дружественные, удобные программные продукты:

1) платформа Zoom для проведения в режиме онлайн лекций, практических занятий, лабораторных работ, а также приема зачетов и экзаменов;

2) система Moodle для предоставления студентам доступа в любое время к лекциям, практическим заданиям, а также для предоставления студентами преподавателю своих отчетных работ по изучаемым курсам (типовые расчеты, контрольные расчеты, расчетно-графические работы). В системе Moodle преподавателями проставляются оценки по выполненным заданиям и изучаемым дисциплинам в целом;

3) видеохостинг YouTube используется для предоставления студентам доступа к видеоматериалам (лекциям, практическим занятиям).

### **Проблемы, возникшие при необходимости реализации технологий дистанционного обучения в ускоренном режиме**

При переходе на дистанционную форму обучения в ускоренном режиме возник ряд задач, которые необходимо было оперативно решить. Так, преподавателям пришлось детально познакомиться и освоить, согласно плану определенного курса, как работать в режиме онлайн. Освоить методы и способы работы в этом режиме.

Но следует отметить, что такое обучение, помимо возникших сложностей, открыло и ряд возможностей как для преподавателей, так и для студентов. Во-первых, это организационные преимущества, т. е. независимость субъектов образовательной деятельности от местонахождения. В любом месте при правильной организации своей деятельности человек может участвовать в образовательном процессе. Во-вторых, это стимул активно изучать возможности существующих программных продуктов, осваивать современные технические устройства, повышать свою квалификацию в соответствии с требованиями, которые выдвигает современное развитие цивилизации. Это актуально и полезно



также для участников образовательного процесса, принадлежащих к более старшим возрастным группам.

Важной проблемой при реализации дистанционной формы обучения стала психологическая проблема обезличивания отношений [12]. Они воспринимаются как эмоционально выхолощенные, непостоянные, а зачастую как обманчивые и даже враждебные [13, 14]. Эта реальность входит в противоречие с установившейся системой «преподаватель – обучающийся». Преподавателю в таком режиме весьма трудно определить подлинное отношение к процессу и к результату учебной деятельности, выявить установки обучающегося. Такая форма обучения не позволяет преподавателю применить в учебной деятельности индивидуальный дифференцированный подход.

В то же время следует отметить, что появилась возможность проводить не только традиционное обучение в аудитории, а применять электронное обучение для изучения и повышения квалификации, проводить электронное и смешанное обучение в сети Интернет со стационарных компьютеров, ноутбуков или мобильных устройств, используя сопутствующие мультимедийные интерактивные электронные учебные курсы и практико-ориентированные учебные и контрольные задачи и тесты.

Конфигурация используемых программных продуктов позволяет вести списки пользователей (преподавателей и студентов), гибко настраивать их права с разбивкой по группам или индивидуально. Интернет предоставляет большие возможности для получения новых знаний. Количество образовательных ресурсов поистине велико. Остается только выбрать тот ресурс, который наиболее соответствует запросам будущего студента.

Преподаватель имеет возможность все занятие записать и сохранить на видео, а затем загрузить для просмотра учащихся конкретной группы по существующему расписанию занятий. Этот факт неоднократно получал положительные отзывы студентов, особенно при неожиданном отключении связи, сбоя интернета, заболевании студента.

Образовательная программа при дистанционном обучении не изменилась, но теперь ее приходится подавать по-новому, сильно перестраивая образовательный процесс [15].

Поэтому сегодня, в условиях все чаще применяющегося дистанционного обучения, вузы пытаются находить более эффективные способы диалога с обучающимися. Одним из инструментов диалоговой коммуникации является edutainment-подкастинг [16]. Эта технология предполагает освоение нового материала в игровой форме. Особенностью является связь теории с практикой, последовательность и доступность изложения материала [17].

Очевидно, что формат видеоконференций отличается от аудиторной работы. Объем работы для преподавателя в настоящем значительно увеличился. Процесс подготовки к удаленным занятиям теперь занимает больше времени на подготовку методических материалов. Дистанционное обучение требует больше усилий на этапе подготовки учебных материалов, детальной проверки информационной базы каждого студента и отражения обнаруженных ошибок в соответствующих файлах.

При переходе на дистанционный формат преподаватели видят потенциал для освоения тех практик онлайн-обучения, которые можно использовать в дальнейшем. Преподавателю и в будущем вся проведенная работа при дистанционной форме обучения оказывается полезной. Это связано с тем, что преподаватель совершенствует методический материал, настроенный не только на работу в аудитории, но и на работу по новым технологиям, в режиме онлайн.

Одна ситуация, когда преподаватель в аудитории должен изложить студентам материал изучаемой темы, говорить со студентами, лично обсуждать непонятные моменты, организовать дискуссию, обсудить все возникшие в ходе изучения вопросы. Совсем другое дело записать видеолекцию, «наложив» на нее текст и иллюстрации, особенно при проведении лабораторной и практической работы. Это просто совершенно другой формат работы.

### **Заключение**

Стремительное развитие цифровых технологий, связанное с широким внедрением в нашу жизнь технологии виртуального общения, влияет на все сферы жизнедеятельности современного человека и заставляет по-новому смотреть на уже известные средства получения знаний. Дистанционное или электронное образование становится все большей альтернативой традиционного образования и в перспективе может стать формой обучения в будущем. Многие эксперты в области дидактики как в России, так и за рубежом, видят в этой форме получения образования огромный потенциал.

### **Список использованных источников и литературы**

1. *Крук, Б. И.* Избранные главы теории и практики дистанционного обучения: монография / Б. И. Крук, О. Б. Журавлева, Е. Г. Стругова. – Москва : Издательские решения, 2017. – 182 с.
2. *Морданов, М. А.* Анализ состояния и развития электронного высшего образования и направления его совершенствования в современных условиях // Новые импульсы развития: вопросы научных исследований : сборник статей VIII Международной научно-практической конференции. – Москва : Цифровая наука, 2021. – С. 212–225.
3. *Surma T., Kirschner P.A.* Technology enhanced distance learning should not forget how learning happens // *Computers in Human Behavior*, vol. 110, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106390>.
4. *Mishraa L., Guptab T., Shreeb A.* Online teaching-learning in higher education during lockdown period of COVID-19 pandemic // *International Journal of Educational Research*, Volume 1, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijedro.2020.100012>.
5. *Aguilera-Hermida A. P.* College students' use and acceptance of emergency online learning due to COVID-19 // *International Journal of Educational Research*, Volume 1, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijedro.2020.100011>.
6. *Sokal L., Trudel L. E., Babb J.* Canadian teachers' attitudes toward change, efficacy, and burnout during the COVID-19 pandemic // *International Journal of Educational Research*, Volume 1, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijedro.2020.100016>.
7. Изучение проблемы адаптации студентов вуза в условиях самоизоляции к on-line обучению с применением дистанционных образовательных технологий /

Е. В. Олейник, Д. А. Муталова, Т. А. Безенкова, А. В. Мананникова // Современное педагогическое образование. – 2020. – № 5. – С. 69–72.

8. Ильин, С. В. Что такое цифровое благополучие и почему оно важно? // Новые импульсы развития: вопросы научных исследований : сборник статей VIII Международной научно-практической конференции. – Москва : Цифровая наука, 2021. – С. 248–254.

9. Перминова, О. М. Механизм интеграционного взаимодействия при формировании профессиональных компетенций региональной информационно-коммуникационной системы / О. М. Перминова, Р. В. Файзуллин // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2014. – № 1. – С. 75–77.

10. Гумерова, Л. Д. Пути повышения спроса на образовательные услуги ИжГТУ / Л. Д. Гумерова, Д. С. Камалетдинов, Р. В. Файзуллин // Сборник «Восточно-Европейский научный вестник». – Ижевск, 2020. – С. 46–49.

11. Парфенов, А. В. Оболочка дистанционного обучения moodle как средство реализации системно-деятельностного подхода // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Информатизация образования. – 2013. – № 1. – С. 40–45.

12. Литвинчук, И. Н. Лингвистическая диагностика паттернов неискренности в контексте дистанционного обучения // Новые импульсы развития: вопросы научных исследований : сборник статей VIII Международной научно-практической конференции. – Москва : Цифровая наука, 2021. – С. 156–159.

13. Fuchs C., Snyder B. It's not just the tool: pedagogy for promoting collaboration and community // Social Networking for language education. 2013. Palgrave Macmillan UK. Pp. 117-134.

14. Tong S. T., Walther J. V. The confirmation and disconfirmation of expectancies in computer mediated communication // Communication research, 42(2). 2015. Pp. 186-212.

15. Кувшинова, Е. Е. Дистанционное обучение в условиях кризиса 2020 (на примере Финансового университета при Правительстве РФ) // Современное педагогическое образование. – 2020. – № 4. – С. 8–15.

16. Сидорова, А. Ю. Edutainment-подкастинг как инструмент диалоговой коммуникации университетов с абитуриентами / А. Ю. Сидорова, Н. Ву Тхи Хонг // Научные исследования и инновации : сборник статей IV Международной научно-практической конференции. Научная общественная организация «Цифровая наука». – Москва : КДУ, Добросвет, 2021. – С. 231–242.

17. Хангельдиева, И. Г. Эдьютейнмент как философия и интегрированно-креативная технология современного образования // Aktuální pedagogika. – 2016. – С. 13–16.

## Особенности дистанционного обучения студентов СПО на примере специальности 09.02.05 «Прикладная информатика» (по отраслям)

*П. С. Шевнина*

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*В статье дан анализ дистанционного обучения на специальности «Прикладная информатика» среднего профессионального образования.*

**Ключевые слова:** дистанционное обучение, специальность «Прикладная информатика», среднее профессиональное образование.

В данной статье представлен анализ дистанционного обучения студентов среднего профессионального образования на примере дисциплин «Пакеты прикладных программ» и «Математические методы обработки информации».

Весной 2020 года мы все оказались перед необходимостью дистанционного обучения студентов. Для студентов среднего профессионального образования по каждой дисциплине на платформе ee.istu.ru был создан электронный курс, который позволил организовать дифференцированное обучение студентов [1]. Первый раздел в нем – информационный. В нем указаны название предмета, семестр и учебный год, полное Ф. И. О. преподавателя, критерии итоговой оценки. Затем следует раздел с отметками посещаемости студентов по всем видам занятий. Информация в нем обновляется после каждого занятия. Следом для каждой недели записаны темы лекций, дополнительные материалы, ссылки на занятия в Zoom. Также отдельными разделами записаны лабораторные работы с указанием сроков сдачи. Завершает курс итоговый блок с контрольными работами и оценками.

Учебный год 2020/21 был проведен в очном формате. Но самые удобные формы дистанционного обучения применялись и в этом году. Также по каждой дисциплине был создан электронный курс. Единственное его отличие от весны 2020 года – отсутствие ссылок на занятия в Zoom. При наличии такого курса студенты, пропустившие лекционные занятия, могли узнать тему лекции, запустить программный код, изученный на лекции. Студенты, ориентированные на продолжение обучения на более высоком уровне, могли изучить дополнительные материалы для углубленного изучения темы [1]. Те, кто пропустил лабораторные занятия или не успел сдать лабораторные работы, могли загрузить программу в соответствующий раздел электронного курса для проверки преподавателем. Если программа не была принята, то автоматически открывалась новая попытка для сдачи с комментариями преподавателя.

Рассмотрим подробнее некоторые разделы электронного курса.

Информационный раздел важно заполнить в самом начале семестра. Особую роль здесь играют критерии итоговой оценки (рис. 1). Студенты часто на протяжении семестра задают вопросы о том, сколько будет контрольных и лабораторных работ, нужны ли отчеты и в каком виде, как получить хорошую оценку, можно ли сдать зачет или экзамен досрочно. Спрашивают почти на каждом занятии, несмотря на то, что на первой и третьей лекции все эти вопросы подробно рассматриваются. Теперь при заполненном электронном курсе они могут узнать ответы на многие вопросы самостоятельно в любое время; если забыли – всегда можно посмотреть еще раз, что очень удобно.

При реализации дистанционного обучения стоит уделить особое внимание организации лекций. При очном обучении каждая лекция начинается с небольшого опроса по предыдущей теме [2]. В дистанционном формате пришлось применять другие инструменты, чтобы разнообразить образовательный процесс. Для таких небольших опросов применялся цифровой онлайн-сервис Mentimeter. После лекции в соответствующий раздел электронного курса загружался документ в формате Jupyter Notebook [3], который содержал не только программный код, но и подробные комментарии (рис. 2).

## Описание курса

Курс **"Математические методы обработки информации"**, 6 семестр, для студентов СПО "Прикладная информатика".

**Автор ЭУК:** Шевнина Полина Сергеевна, старший преподаватель кафедры "Прикладная математика и информационные технологии".

**Оценка** выставляется по итогам выполнения ЛР и по посещаемости.

Оценка лабораторной работы складывается из срока сдачи и полноты документации. 100 баллов из 100 выставляется в случае сдачи в срок, 50 баллов из 100 - если после срока.

Документация по ЛР:

- 1) отчет с заданиями, программами и скриншотами результатов;
- 2) файл .ipynb (или .py, .txt).

Критерии оценки:

"отлично" - все ЛР в срок ИЛИ 1 ЛР не в срок и все в порядке с посещаемостью;

"хорошо" - 1-2 ЛР не в срок ИЛИ 3 ЛР не в срок и все в порядке с посещаемостью;

"удовлетворительно" - все ЛР не в срок ИЛИ 3 ЛР не в срок, больше 3 пропусков без уважительной причины.

*Рис. 1.* Пример информационного раздела в электронном курсе

## Лекция 1. Загрузка, подготовка и предварительная обработка данных.

 Инструкция по установке Anaconda

 Файл с кодом, рассмотренным на лекции

 Рашка С. - Python и машинное обучение - 2017

*Рис. 2.* Пример оформления лекции в электронном курсе

Контрольные работы в электронном курсе были реализованы по-разному. Если для проверяемой темы достаточно ответов, то контрольная работа была реализована в виде теста. Для многих тем нужно проверять и ход решения. В таких случаях контрольная работа оформлялась в виде задания, куда нужно было прикрепить фотографии решений. Время каждой контрольной работы было ограничено. Ко времени, которое выделяется на проверяемую тему в очном формате, прибавлялось 15 минут, необходимых для отправки и возможного фотографирования работ. Варианты сообщались заранее, чтобы не нужно было тратить время на выяснение этой информации. Критерии оценок сообщались в задании. При переписывании контрольных работ должниками или для повышения итоговой оценки каждый раз создавалось новое задание для того, чтобы оценки предыдущих попыток были сохранены (рис. 3).

### Контрольная работа

[Вернуться в раздел Итоговое задани... ➔](#)

Пишем не просто ответы, но и решения. На каждой странице работы пишем ФИО, группу и вариант.

Решаем и фотографируем 1 час 40 минут. В 14-00 сдача КР закрывается.

1 вариант решают те, кто еще ни разу не решал. Максимальный балл 4.

2 вариант решают те, кто хочет повысить оценку. Для этого надо было сдать все ЛР, список высылала вчера, он не изменился.

Напоминаю, что у каждого варианта по 2 страницы - на первой 7 задач, на второй одна. 4 правильных задачи на 3, 6 правильных на 4, 7,5 (с небольшой ошибкой) - на 5.





-  1 вариант 1 часть.jpg
-  1 вариант 2 часть.jpg
-  2 вариант 1 часть.jpg
-  2 вариант 2 часть.jpg

Рис. 3. Пример оформления повторной контрольной работы в электронном курсе

Общение с преподавателем было организовано в разных системах. Вопросы можно было задавать по электронной почте, в личные сообщения в социальной сети «ВКонтакте», в личные сообщения на платформе ee.istu.ru. При необходимости назначались дополнительные личные или групповые консультации в Zoom.

Также связь со студентами осуществлялась через кураторов. Кураторы – важный элемент в организации среднего профессионального образования. Фактически кураторы выполняют обязанности классного руководителя в школе. Если коммуникация со студентами через старосту не сложилась, то куратор – тот человек, через которого можно решить многие вопросы. Большинство студентов приходит в СПО после 9-го класса. При работе с несовершеннолетними без кураторов не обойтись. Они помогают в адаптации студентов, в социализации, при необходимости работают с родителями.

Во время дистанционного обучения работу кураторов трудно переоценить. Любые сообщения студентам передавались быстро и без искажений. Кураторы знали, где географически учится студент, есть ли технические сложно-

сти, недостаток оборудования, низкая скорость интернета. Иногда при неполадках с доступом в интернет отдельным студентам продлялось время для выполнения контрольной или лабораторной работы. Без куратора такой индивидуальный подход было бы трудно реализовать.

Итак, при правильной организации дистанционное обучение можно реализовать эффективно. При очном обучении многие элементы дистанционного обучения помогают в обучении отстающих студентов.

### **Список использованных источников и литературы**

1. *Айзикович, А. А.* Обучение студентов техникума, ориентированных на получение высшего образования / А. А. Айзикович, Н. А. Рычина // Технические университеты: интеграция с европейскими и мировыми системами образования : матер. VI Междунар. конф., Ижевск, 22–23 апреля 2014 года. – Ижевск : ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2014. – С. 306–307.

2. *Шевнина, П. С.* Особенности преподавания дисциплины «Основы теории информации» // Технические университеты: интеграция с европейскими и мировыми системами образования : матер. VI Междунар. конф., Ижевск, 22–23 апреля 2014 года. – Ижевск : ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2014. – С. 395–396.

3. *Рашка, С.* Python и машинное обучение / пер. с англ. А. В. Логунова. – Москва : ДМК Пресс, 2017. – 418 с.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*Аверкиев Игорь Кронидович*, аспирант, младший научный сотрудник Удмуртского федерального исследовательского центра Уральского отделения РАН (г. Ижевск), averkiev1997@mail.ru

*Айзикович Александр Аркадьевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), rmi@istu.ru

*Ананьев Вячеслав Игоревич*, студент кафедры СМ-3 «Ракетные и импульсные системы» Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана (г. Москва), Vyachi.S@yandex.ru

*Бакиева Ольга Ринатовна*, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Удмуртского федерального исследовательского центра Уральского отделения РАН (г. Ижевск)

*Басов Иван Вадимович*, студент направления «Прикладная математика» кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск)

*Бендер Сергей Анатольевич*, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), sergb@istu.ru

*Бородина Софья Аркадьевна*, главный специалист ЗАО «Ижевский нефтяной научный центр» (г. Ижевск), komsofi@mail.ru

*Бушмакина Татьяна Вячеславовна*, кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Инженерная графика, профессиональная педагогика и технология рекламы» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), bushmakina@istu.ru

*Быков Никита Валерьевич*, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры СМ-6 «Ракетные и импульсные системы» Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана (г. Москва), bykov@bmtu.ru

*Вавилова Дайана Дамировна*, аспирант кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), daiana1604@yandex.ru

*Васильева Ирина Васильевна*, старший преподаватель кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), irina-udm@yandex.ru

*Ватолкин Михаил Юрьевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), vmyu6886@gmail.com

*Виссарионова Елена Константиновна*, студент Воткинского филиала Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Воткинск), pusik-visna@rambler.ru



*Горбов Григорий Владиславович*, студент кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), grishagorbov@yandex.ru

*Дементьев Вячеслав Борисович*, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор Института механики Удмуртского федерального исследовательского центра Уральского отделения РАН (г. Ижевск), заведующий кафедрой «Технологии производства систем вооружения» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), demen@udman.ru

*Дорофеева Светлана Рудольфовна*, студент кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), svetamien2018@gmail.com

*Заводова Татьяна Евгеньевна*, аспирант, старший преподаватель кафедры «Специальное машиностроение» Нижнетагильского технологического института (филиал) Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (г. Нижний Тагил)

*Игонина Елена Ивановна*, студент кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), igoninaelena04@gmail.com

*Ильин Семен Сергеевич*, Нижнетагильский институт испытания металлов (филиал) ФКП «НИО «ГБИП России» (г. Нижний Тагил)

*Илюхин Степан Николаевич*, старший преподаватель кафедры СМ-3 «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана (г. Москва), iljuchin.stepan@bmstu.ru

*Искандерова Алла Борисовна*, кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры «Высшая математика» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), iskander.alla@mail.ru

*Карпов Александр Иванович*, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией Института механики Удмуртского федерального исследовательского центра Уральского отделения РАН (г. Ижевск)

*Карсканов Сергей Андреевич*, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института механики Удмуртского федерального исследовательского центра Уральского отделения РАН (г. Ижевск), ser@udman.ru

*Касаткина Екатерина Васильевна*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), e.v.trushkova@gmail.com

*Кетова Каролина Вячеславовна*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), ketova\_k@mail.ru

*Клюкин Даниил Анатольевич*, магистрант кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), anatoliikljukin@mail.ru

*Корепанова Алла Вячеславовна*, старший преподаватель кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), solnishko\_al@mail.ru

*Корепанова Дарья Алексеевна*, студент кафедры «Ракетная техника» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), darya.korepanova.99@mail.ru

*Королев Станислав Анатольевич*, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), stkj@mail.ru

*Костюшин Кирилл Владимирович*, младший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (г. Томск), kostushink@niipmm.tsu.ru

*Кудрина Марина Александровна*, магистрант кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), marinochka.kudrina@mail.ru

*Кузьмин Михаил Степанович*, старший преподаватель кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), kuzmin.mikhail68@mail.ru

*Липанов Алексей Матвеевич*, доктор технических наук, профессор, академик РАН, академик РАН, главный научный сотрудник Института прикладной математики имени М. В. Келдыша РАН (г. Москва), профессор кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова (г. Ижевск), aml35@yandex.ru

*Майков Дмитрий Владимирович*, преподаватель математики Ижевского торгово-экономического техникума (г. Ижевск), maykovd@yandex.ru

*Макаров Сергей Сергеевич*, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института механики Удмуртского федерального исследовательского центра Уральского отделения РАН (г. Ижевск), ssmak15@mail.ru

*Мансуров Рустам Ренатович*, студент кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск)

*Микрюков Дмитрий Владимирович*, студент кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск)

*Морар Габриела*, аспирант Института механики Удмуртского федерального исследовательского центра Уральского отделения РАН (г. Ижевск)

*Насридинов Тимур Дамирович*, магистрант кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), timur.nasridin1@yandex.ru

*Нефедов Денис Геннадьевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), Denisnefedov1@yandex.ru

*Никитина Юлия Андреевна*, студент кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск)

*Перевощикова Дина Александровна*, студент кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск)

*Попов Павел Сергеевич*, аспирант, старший преподаватель кафедры «Системный анализ и управление качеством» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), popov@18gkh.ru

*Прокопович Егор Александрович*, студент Нижнетагильского технологического института (филиал) Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (г. Нижний Тагил), prokopovich\_egor@mail.ru

*Раимова Дарья Юрьевна*, студент кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), darya.raimova@mail.ru

*Русяк Иван Григорьевич*, доктор технических наук, профессор, академик РАН, заведующий кафедрой «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), rprimat@istu.ru

*Рычина Наталья Александровна*, старший преподаватель кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), rytchina@yandex.ru

*Рязанов Данил Андреевич*, студент Нижнетагильского технологического института (филиал) Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (г. Нижний Тагил), danil1609@yandex.ru

*Седов Роман Александрович*, магистрант кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск)

*Семашко Марина Юрьевна*, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Двигатели летательных аппаратов» Южно-Уральского государственного университета (национальный исследовательский университет) (г. Челябинск)

*Смагин Константин Владимирович*, старший преподаватель Нижнетагильского технологического института (филиал) Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (г. Нижний Тагил)

*Соловьев Леонид Сергеевич*, аспирант кафедры «Ракетная техника» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), Solovev-lenya@mail.ru

*Суфиянов Вадим Гарайханович*, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), vsufiy@istu.ru

*Титова Анастасия Вячеславовна*, младший научный сотрудник Института механики Удмуртского федерального исследовательского центра Уральского отделения РАН, titovaspace@ua.ru

*Третьякова Яна Игоревна*, магистрант кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск)

*Хазияхметов Руслан Тахирович*, аспирант Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), khuslan@yandex.ru

*Хмельников Евгений Александрович*, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой «Специальное машиностроение» Нижнетагильского технологического института (филиал) Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (г. Нижний Тагил), khmelnikov7@gmail.com

*Хуссин Сулиман Муса*, аспирант кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск)

*Червакова Анастасия Владимировна*, инженер Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (г. Томск), ch-nastya1997@mail.ru

*Шадрин Иван Дмитриевич*, студент Нижнетагильского технологического института (филиал) Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (г. Нижний Тагил), ivan.shadrin12@gmail.com

*Шаклеин Артем Андреевич*, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института механики Удмуртского федерального исследовательского центра Уральского отделения РАН (г. Ижевск), shaklein@udman.ru

*Шевнина Полина Сергеевна*, старший преподаватель кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), mvpolina@mail.ru

*Шишова Анна Викторовна*, магистрант кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск)

*Щекалева Анна Александровна*, магистрант кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск)

*Юдинцев Дмитрий Владимирович*, кандидат технических наук, доцент кафедры «Специальное машиностроение» Нижнетагильского технологического института (филиал) Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (г. Нижний Тагил)

*Электронное научное издание*

## **I Липановские научные чтения**

Сборник материалов Региональной научной конференции  
«Высокопроизводительные вычисления, визуальные технологии  
и математическое моделирование сопряженных задач  
механики сплошных сред»

(Ижевск, 15–16 июня 2021 г.)

Адрес в информационно-телекоммуникационной сети:  
[http://lipanov2021.istu.ru/assets/docs/Липановские\\_чтения\\_2021.pdf](http://lipanov2021.istu.ru/assets/docs/Липановские_чтения_2021.pdf)

Дата размещения на сайте: 28.12.2021

Технический редактор *С. В. Звягинцова*  
Корректор *М. А. Ложкина*  
Верстка *Н. В. Паклиной*

Подписано к использованию 27.12.2021. Объем 13,1 МБ. Уч.-изд. л. 12,85. Заказ № 224  
Издательство управления информационных ресурсов  
Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова  
426069, Ижевск, Студенческая, 7