

Ontology of Designing

ISSN 2223-9537 (P)

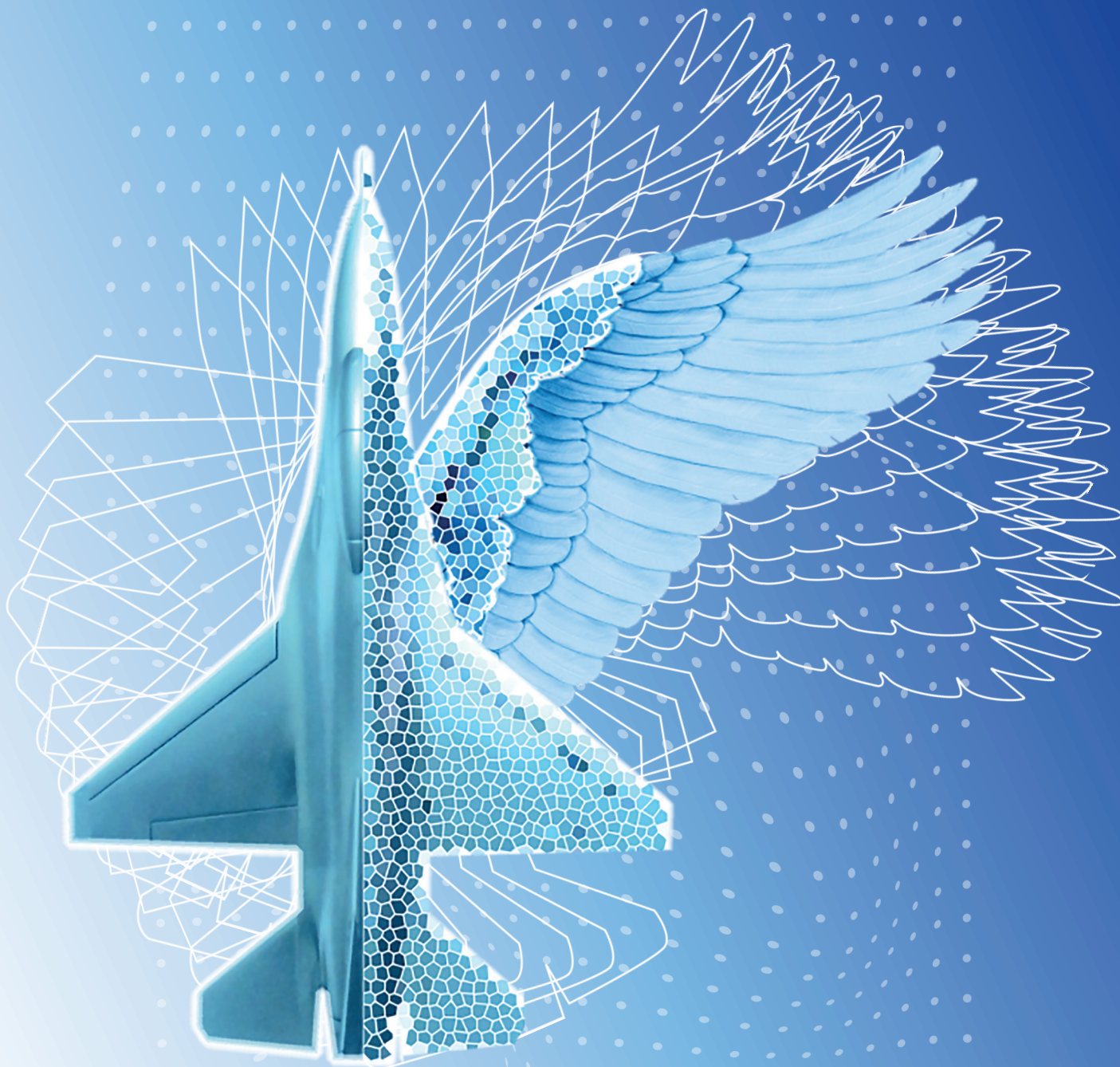
ISSN 2313-1039 (E)

ОНТОЛОГИЯ

Vol 15
2025
№1

Научный журнал -
Scientific journal

ПРОЕКТИРОВАНИЯ



Передовые
инженерные
школы

Scientific journal

Volume 15

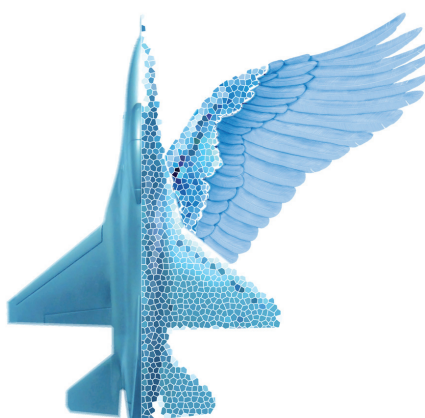
N 1

ОНТОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Научный журнал

Том 15

№ 1



Editorial Board - Редакционная коллегия

Nikolay M. **Borgest***, Ph.D., Associate Professor, Samara University, Member of IAOA, AAAl. Samara, Russia
 Stanislav N. **Vasiliev***, Doctor of Phys. and Math. Sciences, Professor, Academician of RAS, ICS RAS, Moscow, Russia
 Tatiana A. **Gavrilova***, Doctor of Technical Sciences, Professor, GSOM SPbU, St.-Petersburg, Russia
 Vladimir G. **Gainutdinov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, KNITU-KAI, Kazan, Russia
 Vladimir V. **Golenkov***, Doctor of Technical Sciences, Professor, BSUIR, Minsk, Belarus
 Vladimir I. **Gorodetsky***, Doctor of Technical Sciences, Professor, JSC «EVRKA», St. Petersburg, Russia
 Valeriya V. **Gribova***, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of RAS, Senior Researcher, IAPU of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, Russia
 Yury A. **Zagorulko***, Ph.D., Senior Researcher, ISI of the Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia
 Valery A. **Komarov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Samara University, Samara, Russia
 Vladik **Kreinovich**, Ph.D., Professor, University of Texas at El Paso, El Paso, USA
 Venedikt S. **Kuzmichev**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Samara University, Samara, Russia
 Dmitry V. **Lande***, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, IPRI NASU, Kiev, Ukraine
 Paulo **Leitao**, Professor at Polytechnic Institute of Bragança, Bragança, Portugal
 Vladimir **Marik**, Professor, Scientific Director of the CIIRC of the Czech Technical University in Prague, Prague, Czech Republic
 Lyudmila V. **Massel***, Doctor of Technical Sciences, Professor, ISEM of the Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia
 Aleksandr Yu. **Nesterov**, Doctor of Philosophy, Professor, Samara University, Samara, Russia
 Dmitry A. **Novikov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of RAS, ICS RAS, Moscow, Russia
 Alexander V. **Palagin**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the NASU, Ins. of Cybernetics, Kiev, Ukraine
 Yury M. **Reznik**, Doctor of Philosophy, Professor, Institute of Philosophy of RAS, Moscow
 George **Rzevski**, Professor, Open University, London, UK
 Peter O. **Skobelev***, Doctor of Technical Sciences, SamSC of RAS, Samara, Russia
 Sergey V. **Smirnov***, Doctor of Technical Sciences, ICCS RAS, member of IAOA, Samara, Russia
 Dzhavdet S. **Suleymanov***, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the AS of the RT, Kazan, Russia
 Boris E. **Fedunov***, Doctor of Technical Sciences, Professor, State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, Russia
 Andrei A. **Cherepashkov***, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Samara State Technical University, Samara, Russia
 Altynbek **Sharipbay***, Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Artificial Intelligence, Astana, Kazakhstan

Боргест Николай Михайлович*, к.т.н., доцент, Самарский университет, член ИАОА, АААИ. Самара, Россия
Васильев Станислав Николаевич*, д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, ИПУ РАН, Москва, Россия
Гаврилова Татьяна Альбертовна*, д.т.н., профессор, ВШМ СПбУ, Санкт-Петербург, Россия
Гайнутдинов Владимир Григорьевич, д.т.н., профессор, КНИТУ-КАИ, Казань, Россия
Голенков Владимир Васильевич*, д.т.н., профессор, БГУИР, Минск, Беларусь
Городецкий Владимир Иванович*, д.т.н., профессор, АО «Эврика», Санкт-Петербург, Россия
Грибова Валерия Викторовна*, д.т.н., член-корреспондент РАН, г.н.с., ИАПУ ДВО РАН, Владивосток, Россия
Загорюлько Юрий Алексеевич*, к.т.н., с.н.с., ИСИ СО РАН, Новосибирск, Россия
Комаров Валерий Андреевич, д.т.н., профессор, Самарский университет, Самара, Россия
Крейнвич Владик, профессор, Техасский университет Эль Пасо, Эль Пасо, США
Кузьмичев Венедикт Степанович, д.т.н., профессор, Самарский университет, Самара, Россия
Ландэ Дмитрий Владимирович*, д.т.н., с.н.с., ИПРИ НАН Украины, Киев, Украина
Лейтао Пауло, профессор, Политехнический институт Браганса, Браганса, Португалия
Марик Владимир, профессор, научный директор ЧИИРК Чешского технического университета, Прага, Республика Чехия
Массель Людмила Васильевна*, д.т.н., профессор, ИСЭМ СО РАН, Иркутск, Россия
Нестеров Александр Юрьевич, д.филос.н., профессор, Самарский университет, Самара, Россия
Новиков Дмитрий Александрович, д.т.н., профессор, академик РАН, ИПУ РАН, Москва, Россия
Палагин Александр Васильевич, д.т.н., профессор, академик НАН Украины, Ин-т кибернетики, Киев, Украина
Резник Юрий Михайлович, д.филос.н., профессор, Институт философии РАН, Москва, Россия
Ржевский Георгий, профессор, Открытый университет, Лондон, Великобритания
Скобелев Петр Олегович*, д.т.н., СамНЦ РАН, Самара, Россия
Смирнов Сергей Викторович*, д.т.н., ИПУСС РАН – СамНЦ РАН, член ИАОА, Самара, Россия
Сулейманов Джавдет Шевкетович*, д.т.н., профессор, академик АН РТ, Казань, Россия
Федунов Борис Евгеньевич*, д.т.н., профессор, ГосНИИ авиационных систем, Москва, Россия
Черепашков Андрей Александрович*, д.т.н., доцент, СамГТУ, Самара, Россия
Шарипбай Алтынбек*, д.т.н., профессор, Ин-т искусственного интеллекта, Астана, Казахстан

* - members of the Russian Association of Artificial Intelligence - члены Российской ассоциации искусственного интеллекта - http://www.raai.org/about/about.shtml?raai_list

Executive Editorial Board - Исполнительная редакция

Chief Editor **P.O. Skobelev** Samara, Russia
 Deputy Chief Editor **S.V. Smirnov** Samara, Russia
 Executive Editor **N.M. Borgest** Samara, Russia
 Editor **D.M. Kozlov** Samara, Russia
 Technical Editor **D.N. Borgest** Samara, Russia
 Executive Secretary **S.A. Vlasov** Samara, Russia

Главный редактор Скобелев П.О. СамНЦ РАН, Самара, Россия
 Зам. главного редактора Смирнов С.В. ИПУСС РАН – СамНЦ РАН, Самара, Россия
 Выпускающий редактор Боргест Н.М. Самарский университет, Самара, Россия
 Редактор Козлов Д.М. Самарский университет, Самара, Россия
 Технический редактор Боргест Д.Н. Самарский университет, Самара, Россия
 Ответственный секретарь Власов С.А. Самарский университет, Самара, Россия

The journal has entered into an electronic licensing relationship with EBSCO Publishing, the world's leading aggregator of full text journals, magazines and eBooks. The full text of JOURNAL can be found in the **EBSCOhost™** databases. The journal has been successfully evaluated in the evaluation procedure for the **ICI Journals Master List** 2014-2019 and journal received the ICV (Index Copernicus Value).

Журнал размещен в коллекции «Издания по естественным наукам» на платформе **EastView**.

Журнал включён в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней кандидата и доктора наук (Перечень ВАК с 01.12.2015) по научным специальностям 1.2.2., 2.3.1., 2.3.4., 2.3.5., 2.3.7., 2.3.8., 2.5.1., 2.5.13., 2.5.15., 5.12.4.

Журнал включен в список журналов, входящих в базу данных **Russian Science Citation Index (RSCI)** на платформе **Web of Science**. Пятилетний импакт-фактор РИНЦ **1.280** (2015), **1.083** (2016), **0.993** (2017), **1.205** (2018), **0.835** (2019), **1.060** (2020), **0.977** (2021), **0.895** (2022).

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство ПИ № ФС 77-70157 от 16.06.2017 г. (ранее выданное свидетельство ПИ № ФС 77-46447 от 07.09.2011 г.)

СОДЕРЖАНИЕ

ОТ РЕДАКЦИИ

Путь в науку	5-10
--------------	------

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Б.А. Кулик	11-23
О заблуждениях в современной логике	
Е.В. Конопацкий, С.И. Ротков, М.В. Лагунова, М.В. Безсолюнов	24-33
Подход к твёрдотельному моделированию геометрических объектов в точечном исчислении	
В.С. Выхованец	34-44
Концептуальный и понятийный анализы: общий подход	

ПРИКЛАДНЫЕ ОНТОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

А.А. Головин, Н.А. Жукова	45-54
Построение графа знаний по телекоммуникационным данным	
И.Е. Калабихина, В.С. Мошкин, А.В. Колотуша, М.И. Кашин, Г.А. Клименко, З.Г. Казбекова	55-66
Анализ отзывов пациентов с использованием машинного обучения и лингвистических методов	
О.А. Сычёв, Н.А. Пенской, Г.В. Терехов	67-81
Метод разработки интеллектуальных тренажёров на основе онтологии предметной области	
А.С. Гвоздев, В.С. Мелентьев, И.Ф. Лейковский	82-95
Сравнительная оценка подходов к подготовке бакалавров по авиационным двигателям	

ИНЖИНИРИНГ ОНТОЛОГИЙ

Д.А. Левшун, Д.С. Левшун, И.В. Котенко	96-113
Обнаружение и объяснение аномалий в индустриальных системах Интернета вещей на основе автокодировщика	
Е.А. Сидорова, А.И. Иванов, К.А. Овчинникова	114-129
Извлечение информации из текстов на основе онтологии и больших языковых моделей	

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

В.Е. Гвоздев, Р.Р. Галимов, О.Я. Бежаева, К.Ю. Тимофеева	130-141
Оценка согласованности мнений неоднородных акторов на предпроектной стадии	
Е.А. Кишов	142-151
Математическое моделирование нестационарного теплопереноса в селективном лазерном плавлении на основе машинного обучения	

Саммит по онтологиям 2025

152

Журнал ориентирован на учёных и специалистов, работающих по научным направлениям: онтологические аспекты общих вопросов формализации проектирования, прикладные онтологии проектирования, инжиниринг онтологий, методы и технологии принятия решений.

Правила подготовки рукописей статей размещены на сайте журнала «Онтология проектирования»:

http://agora.guru.ru/scientific_journal/, а также на <https://www.ontology-of-designing.ru/>.

Контент журнала распространяется по лицензии CC-BY 4.0 (Creative Commons Attribution 4.0 International License).



Контакты соучредителей

Самарский университет: 443086, Самара, Московское шоссе 34, корп. 10, тел.: +7 (846) 267 46 47, Боргест Н.М., borgest@yandex.ru.

СамНЦ РАН: 443020, Самара, ул. Садовая, 61, тел./факс.: +7 (846) 333 27 70, Смирнов С.В., smirnov@iccs.ru.

ООО «Новая техника» (издатель, редакция): 443010, Самара, ул. Фрунзе, 145, тел.: +7 (846) 332 67 84, факс: +7 (846) 332 67 81.

Отпечатано в ООО «Новая техника» (типография), 443013, г. Самара, пр. К. Маркса, 24-76. Дата выхода 22.01.2025. Тираж 100 экз. Свободная цена. (6+).

CONTENTS

EDITORIAL

The path to science	5-10
---------------------	------

GENERAL ISSUES OF FORMALIZATION IN THE DESIGNING: ONTOLOGICAL ASPECTS AND COGNITIVE MODELING

B.A. Kulik On misconceptions in modern logic	11-23
E.V. Konopatskiy, S.I. Rotkov, M.V. Lagunova, M.V. Bezsolnov An approach to solid modeling of geometric objects in point calculus	24-33
V.S. Vykhovanets Conceptual and notional analysis: a general approach	34-44

APPLIED ONTOLOGIES OF DESIGNING

A.A. Golovin, N.A. Zhukova Building a knowledge graph from telecommunication data	45-54
I.E. Kalabikhina, V.S. Moshkin, A.V. Kolotusha, M.I. Kashin, G.A. Klimenko, Z.G. Kazbekova Analysis of patient reviews using machine learning and linguistic methods	55-66
O.A. Sychev, N.A. Pensko, G.V. Terekhov A method for developing intelligent simulators based on ontology of the subject domain	67-81
A.S. Gvozdev, V.S. Melentjev, I.F. Leykovskyy Comparative assessment of approaches to training bachelor's students in aircraft engine design	82-95

ONTOLOGY ENGINEERING

D.A. Levshun, D.S. Levshun, I.V. Kotenko Detecting and explaining anomalies in industrial Internet of things systems using an autoencoder	96-113
E.A. Sidorova, A.I. Ivanov, K.A. Ovchinnikova Information extraction from texts based on ontology and large language models	114-129

METHODS AND TECHNOLOGIES OF DECISION MAKING

V.E. Gvozdev, R.R. Galimov, O.Ya. Bezhaeva, K.Yu. Timofeeva Assessment of opinion consistency of heterogeneous actors at the pre-project stage	130-141
E.A. Kishov Mathematical modeling of non-stationary heat transfer in selective laser melting based on machine learning	142-151

Ontology Summit 2025	152
-----------------------------	-----

The journal is aimed at scientists and specialists working in the following research areas: ontological aspects of general issues of design formalization, applied design ontologies, ontology engineering, methods and technologies of decision making.

The current version of the Rules for the preparation of manuscripts of articles for the journal «Ontology of Designing» is on the journal website:



http://agora.guru.ru/scientific_journal/, and <https://www.ontology-of-designing.ru/>.

The content of the scientific journal is distributed under a license **CC-BY 4.0**

(Creative Commons Attribution 4.0 International License)

Contacts of the co-founders

Samara University: 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russia. Tel.: +7 (846) 267 46 47, N.M. Borgest, borgest@yandex.ru

Samara Scientific Center of the RAS: 61, Sadovaya st., Samara, 443020, Russia. Tel.: +7 (846) 333 27 70, S.V. Smirnov, smirnov@iccs.ru

New Engineering LLC (publishing house, editorial office): 145, Frunze st., Samara, 443010, Russia. Tel.: +7 (846) 332 67 84, +7 (846) 332 67 81



ОТ РЕДАКЦИИ

Путь в науку The path to science

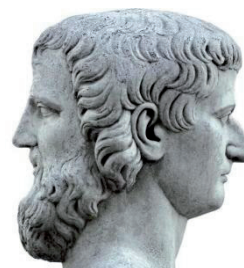
«... путь в науку, да и в философию, только один: встретить проблему, увидеть, как она красива, и влюбиться в неё; обвенчаться с нею и жить счастливо, пока смерть не разлучит вас — если только вам не суждено будет увлечься другой, более красивой проблемой или отыскать решение первой. Но и такое решение, будучи найденным, может породить, к вашему же удовольствию, целое семейство очаровательных, хотя, вполне вероятно, и непростых, юных проблем...»

Карл Поппер¹

Дорогой наш читатель, уважаемые авторы и члены редакционной коллегии!

Перед Вами первый номер 15-го тома нашего с Вами журнала. Это уже 55-ый выпуск, который с любовью и трепетом готовят все названные в обращении действующие лица. Редакция лишь стремится помочь авторам максимально лучше представить результаты своих исследований, при этом, в первую очередь, ориентируясь на интересы нашего читателя, на ту аудиторию, которая ищет и ждёт ответы на свои непростые вопросы построения модели мира, концептуального и когнитивного моделирования. Все эти модели и формализмы, ставшие основой онтологизации предметных областей, могут и должны помочь в дальнейшей цифровизации нашей жизни в надежде на гармонизацию её со средой обитания. Любые масштабные проблемы, будь то полёт в космос или открытие законов мироздания, всегда влекут и вовлекают новых смелых исследователей, желающих найти своё место в грандиозных проектах. Это интуитивное стремление, заложенное и проявляющееся в тех, кто ориентирован на созидание, позволяет нам всем иметь до некоторой поры позитивный путь развития цивилизации. Именно на них, жаждущих новых знаний и открытий, возложены надежды цивилизации на дальнейшее существование, на них же и лежит историческая ответственность за её сохранение².

Этот номер редакция выпускает в январе - первом месяце года, названном в честь двуликого бога в древнеримской мифологии Януса (лат. *Ianus*). Этот мифический герой изначально считался богом-демиургом, почитался как божество всех начинаний. Древнеримская коллегия жрецов в своей песне называла Януса «богом богов» и «добрым создателем». Его отождествляли и с первобытным хаосом, из которого возник упорядоченный космос, а Янус, превратившись в бога, стал хранителем порядка³. «Он всё создаёт и им же управляет»⁴. Его двуликий образ незримо характеризует движение от прошлого в будущее и очень близок процессу создания нового с опорой на прошлый опыт. Наряду с богиней плодородия Опа⁵ эти придуманные людьми в те далёкие времена образы



Двуликий Янус.
Из прошлого в будущее

¹ Karl R. Popper. Realism and the Aim of Science. Edited by W.W. Bartley, III. Totowa, New Jersey: Rowman and Littlefield (1983). *Philosophy of Science*. 1983; 50(4):669-671. DOI:10.1086/289156.

² Боргест Н.М. Историческая ответственность инженера: [учеб. пособие]; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Самар. нац. исслед. ун-т им. С.П. Королева (Самар. ун-т). Самара : Изд-во Самар. ун-та, 2018.

³ Штаерман Е.М. Янус / Мифы народов мира / Гл. редактор С.А. Токарев. М.: Советская энциклопедия, 1990. С.1138-1139.

⁴ Carpeville Gérard. Les épithètes cultuelles de Janus (фр.) // *Mélanges de l'école française de Rome*. 1973. Vol.85, no 2. P.395-436.

⁵ От редакции. У науки женское лицо. *Онтология проектирования*, том 9, №3(33)/2019. С.305-306. [https://www.ontology-of-designing.ru/article/2019_3\(33\)/1_Editors.pdf](https://www.ontology-of-designing.ru/article/2019_3(33)/1_Editors.pdf).

явились важным философским обобщением и осмыслением процессов созидания и проектирования будущего. Поэтому наряду с реальными героями: многочисленными философами, учёными, архитекторами, инженерами, проектантами и их достижениями, эти образы служат опорой и маяком для дальнейшего научного поиска.

Образ Януса наглядно демонстрирует неразрывность прошлого, настоящего и будущего, показывая важность обращения к опыту прошлого, без которого невозможно заглянуть в будущее, если мы хотим его проектировать, развивать и жить в нём.

Жизнь не стоит на месте, и те идеалы, которые ещё недавно были незыблемы, становятся, в угоду тех или иных обстоятельств, уже полной противоположностью прежних воззрений.



Двуличный Янус.
Единство добра и зла

С тех пор, как рухнула Римская империя, сменились религии, идеалы и оценки. Янус перестал быть богом добрых начал и предвидения будущего, превратился из «двуликого» в «двуличного», стал воплощением неискренности и лживости. Произошли изменения и в изображениях Януса на скульптурах и картинах, которые стали носителями самых разных символов: красоты и безобразия, молодости и старости, дружбы и вражды, веселья и печали, добра и зла. Истоки всех изображений такого рода уходят к языческому Янусу, но толчок к такому пониманию был дан давным-давно, и параллели Янусу можно найти в самых разных культурах. Значит, это отражает глубинные структуры человеческой природы⁶. Здесь, в

двуличном Янусе, явно проявляет себя «вторая сторона» его «медали» – это основной закон диалектики – закон единства и борьбы противоположностей. Проектирование, как деятельность, в своей основе предполагает создавать и вносить новое в нашу жизнь, изменять нашу среду, в которой если и есть место старому, то в подавляющем большинстве уже с другим функционалом. Сейчас ресурс или жизненный цикл новых строений, машин и механизмов в лучшем случае исчисляется десятилетиями. Новое безжалостно вытесняет старое. С ростом знаний и технологий эта борьба усиливается, что, с одной стороны, делает нашу жизнь комфортней и безопасней, но, с другой стороны, ограниченность земных ресурсов и неадекватное управление с точки зрения устойчивого развития человеческой цивилизации может привести к новым вызовам, с которыми человечеству будет трудно справиться⁷.

В связи с этим одна из сложнейших проблем для учёных – донести добытые знания до механизма принятия цивилизационных решений таким образом, чтобы они стали действенным инструментом в достижении устойчивого развития общества. Пока это удавалось лишь философам-утопистам, строившим свои города Солнца⁸ и благостные теории⁹ на бумаге.

На пути в науку можно встретить немало и других, возможно не столь значимых и не столь часто встречающихся проблем, которые имеют место в коллективных работах, где вклад авторов чётко не обозначен, и в ряде публикаций с уважаемыми коллегами-руководителями. Вопросы заимствования идей и результатов работ не всегда решаются системами, построенными на основе синтаксического совпадения.

«Свинтусы грандиозусы» разводятся в любую эпоху¹⁰. Сатирическая комедия по пьесе «Кто смеется последним» Кондрата Крапивы в 1941 году была удостоена Сталинской премии. Пьеса Крапивы для своего вре-

⁶ Калинин А. Двуликий Янус. *Наука и жизнь*. 2007. №5. <https://www.nkj.ru/archive/articles/10240/>.

⁷ От редакции. COME ON! Вперёд, в будущее! *Онтология проектирования*. 2018, том 8, №1(27). С.5-7. https://ontology-of-designing.ru/article/2018_1%2827%29/1_Editors.pdf.

От редакции. Бесконечность... В ожидании 'чёрных лебедей'. *Онтология проектирования*. 2021, том 11. №1(39). С.5-7. [https://www.ontology-of-designing.ru/article/2021_1\(39\)/Ontology_Of_Designing_1_2021_1_Editorial.pdf](https://www.ontology-of-designing.ru/article/2021_1(39)/Ontology_Of_Designing_1_2021_1_Editorial.pdf).

⁸ Штекли А.Э. «Город Солнца»: утопия и наука. - М.: Наука, 1978. 367 с.

⁹ Виттих В.А. Понятие интересубъективности в эвергетике. *Онтология проектирования*, 4(14)/2014. С.90-97.

¹⁰ Павлов О. Свинтусы грандиозусы разводятся в любую эпоху. Рецензия на фильм «Кто смеется последним» (1954). 5 мая 2018. <https://www.kinopoisk.ru/user/7170258/comment/2676828/>.

мени считалась смелой и даже злой. Её герои – учёные Института геологии, но в их среде далеко не всё решает талант и образованность. И чтобы вывести на чистую воду сановного проходимца, пришлось придумать хитроумную научную аферу с «исполинской мамонтовой свиньей». С той поры прошло немало времени и событий, но пьеса актуальна и сегодня. А в фильме она нашла достойное отражение¹⁰.

Этика науки – область философской и внутринаучной рефлексии о моральных аспектах как собственно научной деятельности, включая взаимоотношения внутри научного сообщества, так и взаимоотношений науки и научного сообщества с обществом в целом¹¹. Этические нормы в современной науке – это совокупность правил, которым должен следовать учёный. Если речь идёт о научных доказательствах, то перед лицом истины все исследователи равны, никакие прошлые заслуги не принимаются во внимание. Важным принципом научной этики является требование научной честности при изложении результатов исследования. Учёный может ошибаться, но не имеет права подтасовывать результаты, он независимо может повторить уже сделанное открытие, но не имеет права на плагиат.

В нашем журнале уже с этого номера статьи, подготовленные коллективами авторов, содержат информацию о конкретном вкладе каждого автора¹². В качестве примера редакция ориентирует авторов на правила, которые разработаны в Гарвардском колледже¹³, для соавторов научной статьи.

- Каждый, кто указан в качестве автора, должен внести существенный, прямой интеллектуальный вклад в работу. Например, они должны внести свой вклад в концепцию, планирование, анализ и/или интерпретацию данных. Почётное или гостевое авторство недопустимо. Получение финансирования и предоставление технических услуг или материалов, хотя и могут быть важны для работы, сами по себе не являются достаточным вкладом, чтобы претендовать на авторство.
- Каждый, кто внёс существенный интеллектуальный вклад в работу, должен быть указан в качестве автора. Каждый, кто внёс другой существенный вклад, должен быть упомянут (в разделе благодарности).
- Все авторы должны участвовать в написании рукописи, просматривая черновики и утверждая окончательную версию.
- Один из авторов должен взять на себя основную ответственность за работу в целом, даже если он или она не обладает глубоким пониманием каждой части работы. Этот автор должен убедиться, что все авторы соответствуют базовым стандартам авторства, и подготовить краткое письменное описание их вклада в работу, которое будет одобрено всеми авторами.
- Порядок указания авторства авторы должны определять сообща.

Лаконично вклад авторов (*Author Contributions*) в конце каждой статьи уже используют во многих журналах (например, *Systems*¹⁴ – «Системы» – международный рецензируемый журнал с открытым доступом, посвящённый применению теории систем на практике). См. например, близкую по тематике нашему журналу статью «Единая онтология миссии, основанная на систематической интеграции междисциплинарных концепций»¹⁵.

Другой серьёзной проблемой сегодняшнего дня для поиска пути в науку является проблема информационного цунами, которое обрушивается ежедневно на каждого. Что порождает новое явление – **Brain rot** («гниение мозга» или «мозговая гниль»). Именно это слово (словосочетание) стало словом ушедшего 2024 года по версии Оксфордского словаря¹⁶.

«Мозговая гниль» определяется как «предполагаемое ухудшение психического или интеллектуального состояния человека, особенно рассматриваемое как результат чрезмерного потребления информации (в настоящее время особенно онлайн-контента), которые считаются тривиальными или не требующими усилий...». Впервые выражение «гниение мозга» использовано в книге Генри Торо «Уолден, или Жизнь в лесу» (1854 г.). Торо кри-

¹¹ Электронная библиотека ИФ РАН » Новая философская энциклопедия » ЭТИКА НАУКИ.

<https://iphlib.ru/library/collection/newphilenc/document/HASH13178ec3772ffc4d7f4613#:~:text=ЭТИКА%20НАУКИ%20-%20область%20философской%20и,сообщества%20и%20обществом%20и%20в%20целом.>

¹² Это также поможет тем авторам, которые готовят квалификационную работу, для подтверждения своего вклада в науку.

¹³ *Authorship Guidelines*. Adopted December 17, 1999 from the paper version of Faculty Policies on Integrity in Science, Harvard Medical School. <https://web.archive.org/web/20100701035226/http://www.hms.harvard.edu/integrity/authorship.html>.

¹⁴ *Systems* is an international, peer-reviewed, open access journal on systems theory in practice.

<https://www.mdpi.com/journal/systems>.

¹⁵ Belay ZM, Axelsson J. A Unified Mission Ontology Based on Systematic Integration of Interdisciplinary Concepts. *Systems*. 2024; 12(12):567. <https://doi.org/10.3390/systems12120567>.

¹⁶ «Brain rot» named Oxford Word of the Year 2024. 2 December 2024. <https://corp.oup.com/news/brain-rot-named-oxford-word-of-the-year-2024/>.

тикует склонность общества обесценивать сложные идеи в пользу простых и считает это признаком общего упадка умственных способностей. Этот термин приобрёл новое значение в эпоху цифровых технологий. Изначально набирая популярность в социальных сетях, «гниение мозга» получает широкое распространение на фоне обеспокоенности общества негативными последствиями чрезмерного потребления онлайн-контента.

С проблемой «мозговой гнили» тесно связана проблема сохранения и развитие языка¹⁷, в т.ч. как средства научной коммуникации и средства внедрения технологических достижений.



Объявленное Президентом России десятилетие науки и технологий в России (логотип присутствует на обложке журнала) обязывает нас вносить свою лепту в достижения фундаментальной и прикладной науки, повышая престиж научной деятельности, используя языковые конструкции, соответствующие языковым и законодательным нормам.

В нашем журнале редакция продолжает активно отстаивать чистоту русского языка и, по мере возможности, борется с неоправданным использованием англицизмов. К сожалению, имеет место тенденция к выхолащиванию языка даже там, где есть в русском языке устойчивые выражения и слова, которые вытесняются иностранными терминами в угоду псевдонаучному толкованию полученных результатов и демонстрации некой «научности» или «учёности». Удачно подобранные синонимы на разных языках со временем вытесняются и заменяются их иностранными аналогами.

Действительно, английский язык де-факто стал языком научного общения: практически все международные научные конференции и семинары проводятся на английском языке; научные журналы выпускаются либо целиком на английском, либо обязательно имеют титульные части публикуемых статей на английском языке; ведущие наукометрические базы, признаваемые мировой научной общественностью, также используют в основном лишь английский язык. С точки зрения научной коммуникации это может быть оправдано упрощением понимания контекста используемых слов и выражений коллегами из разных научных школ и стран. Однако за этим стоит потеря научного суверенитета и снижение престижа отечественной науки, особенно если это будет иметь место на страницах отечественных журналов, в аудиториях отечественных конференций.

В истории культур и связанной с ней историей языков наблюдается взаимное проникновение слов, которые по тем или иным обстоятельствам внедряются в оборот и употребляются наравне с другими словами. Чаще всего технологически более богатая культура (соответственно и поддерживающий её язык) внедряется естественным образом в язык менее цивилизационно развитой культуры. Т.е. новые и неизвестные для какой-либо культуры процессы и артефакты, разработанные более продвинутой культурой, познаются и впитываются другой культурой вместе с тем словарным запасом, который был выработан и используется теми, кто является авторами этих новых процессов и артефактов. Первый искусственный *спутник* Земли, который был запущен в СССР в 1957 году, долгие годы оставался на всех языках мира «спутником» в русскоязычном исполнении, пока технологически развитые страны не преуспели в космической гонке, и появился уже английский термин «сателлит» (который в свою очередь также был заимствован из языка Древнего Рима - от латинского *satelles* - телохранитель, сопровождающий своего хозяина).

С потерей доминирования русского языка на постсоветском пространстве, с внедрением заимствованных экономических отношений в русскоязычное поле хлынули англицизмы практически во все сферы общественной жизни, в т.ч. и в науку. Особенность русского языка состоит в том, что он легко вбирает и встраивает иностранные слова, делая их своими, но это оправдано лишь тогда, когда для них нет точного аналога новому слову или выражению. С необоснованным и нелепым смешением «французского с нижегородским»¹⁸ и пытается бороться законодатель и наша редакция.

Отрадно отметить, что наши авторы с пониманием и поддержкой относятся к бережному отношению редакции к русскому языку. Наверное читатели обратили внимание на то, что в журнале не забыт русский алфавит, а в нём и буква «ё», которая везде (где она есть) присутствует, хотя сложившиеся языковые нормы менее строгие.

¹⁷ 2 января 2025. Проект закона о защите русского языка Дума рассмотрит в приоритетном порядке. Интерфакс. <https://www.interfax.ru/russia/1001548>. Данная инициатива, получившая поддержку от президента России, предполагает значительное *ограничение использования иностранных слов, в том числе англицизмов, в публичном пространстве*. <https://realnoevremya.ru/news/325684-gosduma-uskorit-rassmotrenie-zakonoproekta-o-zaschite-russkogo-yazyka-v-2025>.

¹⁸ См. монолог Чацкого в комедии «Горе от ума» А.С. Грибоедова.

Современные средства информационных технологий на основе больших языковых моделей могут позволить помочь в обработке непрерывно генерируемой информации. Отечественные разработки, например, Нейро (<https://ya.ru/neuro-search/>) – широкого спектра действия, или ИИ-сервис Кибертида (<https://cybertida.ru/>) – специализированный ИИ-сервис по работе с научными текстами для научно-педагогических работников, аспирантов и студентов – уже активно используются для сокращения времени на первичную работу с научной литературой.

Другая важная разработка в области коммуникаций, поиска консенсуса и построения согласованных онтологий на основе тезаурусов – это «Объединяющий словарь»¹⁹.

«Объединяющий словарь» — интерактивный веб-прототип, разрабатываемый Центром конструктивной коммуникации Массачусетского технологического института²⁰, — позволяет определить, как по-разному слова и фразы используются разными группами людей, дать значения и (подобно традиционному словарю) предложить менее поляризованные (объединяющие) альтернативы. «Объединяющий словарь» выявляет слова и фразы, которые отражают резко противоположные взгляды в раздробленной общественной сфере, и способствует их применению. Большая языковая модель, лежащая в основе этого словаря, предлагает менее поляризованные альтернативы, что позволяет объединить или согласовать мнения (найти консенсус)²¹.

В быстро изменяющейся научной среде, когда вновь полученные знания становятся практически мгновенно доступными многим исследователям, появляются и трансформируются термины, понятия и их содержание (см., например, двуликий и двуличный Янус, или развитие содержания понятия онтология). Чему во многом способствует дифференциация научного знания, обусловленная углублённым проникновением в неизведанное. В этом случае важна роль объединяющих процедур и согласованных онтологий.

Путь в науку тернист и короток, как тот жизненный миг, за который каждый из нас успевает познать лишь малую часть бездны мироздания. Но этот миг открытий и новых знаний удивительно прекрасен, на что ещё в древности обратили внимание философы.

У Платона в описанных им диалогах Сократа есть диалог «Лисид» («Лисис»). Сократ, беседуя с юношами, подводит их к важному выводу, который заключается в том, что *знание есть источник счастья* [207d–210e]²². Хотя родители юноши (Лисида) желают ему счастья, они запрещают ему делать что-либо, в чём он недостаточно разбирается. Ему разрешают делать что-то только тогда, когда родители уверены, что он справится. Он может порадовать своих родителей и сделать их счастливыми, если будет делать что-то лучше других.

«— Прекрасно, — сказал я, — мой доблестный друг. Значит, отец твой дожидается не твоего взросления, чтобы доверить тебе все дела, а того дня, когда он сочтёт, что ты разумеешь всё лучше его: тогда он доверит тебе и себя самого и своё достояние...

— В том, в чём мы бываем разумны, все нам доверяют ...; Но в том, чего мы не умеем, никто не окажет нам доверия и не позволит делать всё, что нам покажется правильным; ...; мы в этих делах будем подчиняться другим, и дела эти будут чужим достоянием, ибо мы от них не получим никакой выгоды.

— Если же ты станешь более сведущим, мой мальчик, все будут тебя любить и станут тебе близкими друзьями: ведь ты окажешься человеком полезным и достойным.»²²

Путь в науку у большинства молодых людей начинается с университетской скамьи. В конце 2024 года в Самарском университете им. С.П. Королёва подвели итоги студенческой предметной олимпиады «Компьютерное моделирование в авиастроении». Организатором олимпиады выступила кафедра конструкции и проектирования летательных аппаратов²³.

¹⁹ BridgingDictionary BETA. <https://bridgingdictionary.org/info/>.

²⁰ Heyward Andrew. Introducing the Bridging Dictionary. 12.06.2024. <https://www.ccc.mit.edu/pressmedia/introducing-the-bridging-dictionary/>.

²¹ Verhulst Stefaan. The Bridging Dictionary. The Living Library. January 4, 2025. <https://thelivinglib.org/the-bridging-dictionary/>.

²² Лисид. В кн.: Платон. Диалоги. Перевод С.Я. Шейнман-Топштейн. М.: "Мысль", 1986. 607 с.

<https://plato.spbu.ru/TEXTS/PLATO/LosevH/0113.htm>.

²³ Результаты внутривузовской студенческой предметной олимпиады «Компьютерное моделирование в авиастроении». 10.01.2025. <https://ssau.ru/news/23787-rezultaty-vnutrivuzovskoy-studencheskoy-predmetnoy-olimpiady-kompyuternoe-modelirovanie-v-aviastroenii>.

В олимпиаде приняли участие более 50 студентов института авиационной и ракетно-космической техники и института двигателей и энергетических установок по направлениям подготовки/специальностям: «Самолёто- и вертолётостроение», «Авиастроение», «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», «Машиностроение», «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов», «Ракетные комплексы и космонавтика». Участникам олимпиады в качестве задания предлагалось за 4 часа разработать твёрдотельную геометрическую модель авиационной конструкции, состоящей из нескольких деталей.

На фото — участники и призёры олимпиады в классе конструкций самолётов. Редакция журнала пожелала всем участникам олимпиады найти свой путь в науке проектирования сложных изделий авиационной и ракетно-космической техники.



Наш журнал продолжает прокладывать свой путь в науке, вовлекая всё новых авторов и стремясь внести свою лепту в обсуждение проблем и методов, которые способны дать необходимые знания для построения интероперабельных информационных систем, решающих насущные задачи в различных предметных областях. **Онтологии нам всем в помощь!**

В номере

В разделе «Общие вопросы формализации проектирования: онтологические аспекты и когнитивное моделирование» рассмотрены: заблуждения в современной логике (**Санкт-Петербург**); подход к твёрдотельному моделированию геометрических объектов (**Нижний Новгород**); общий подход к концептуальному и понятийному анализу (**Долгопрудный**).

В разделе «Прикладные онтологии проектирования» рассмотрены: построение графа знаний по телекоммуникационным данным (**Санкт-Петербург**); анализ отзывов пациентов с использованием машинного обучения и лингвистических методов (**Москва - Ульяновск**); метод разработки интеллектуальных тренажёров на основе онтологии предметной области (**Волгоград**); сравнительная оценка концепций подготовки студентов авиадвигателестроительных специальностей (**Самара**).

В разделе «Инжиниринг онтологий» рассмотрены: обнаружение и объяснение аномалий в промышленных системах Интернета вещей на основе автокодировщика (**Санкт-Петербург**); извлечение информации из текстов на основе онтологии и больших языковых моделей (**Новосибирск**).

В разделе «Методы и технологии принятия решений» рассмотрены: оценка согласованности мнений неоднородных акторов на предпроектной стадии (**Уфа**); математическое моделирование нестационарного теплопереноса на основе машинного обучения (**Самара**).

Ontologists and designers of all countries and subject areas, join us!

各國各學科領域的本體論者與設計師，加入我們吧！

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 004.83+162.2

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-11-23



О заблуждениях в современной логике

© 2025, Б.А. Кулик

Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В статье обсуждается несостоятельность трёх «бесспорных» положений в современной логике: о противоречивости понятия «множество»; о безусловной необходимости аксиом в логике; о безошибочности силлогистики. *Первое заблуждение* преодолевается предложением использовать в основаниях логики алгебру множеств в том варианте, который изложен в книге Р. Куранта и Г. Роббинса «Что такое математика?». *Второе заблуждение* преодолевается с помощью вывода известных законов алгебры множеств, которые соответствуют законам классической логики, методом перебора вариантов. *Третье заблуждение* преодолевается построением математической модели полисиллогистики, в основе которой лежат законы алгебры множеств. Новизна предложенной модели рассуждений заключается в том, что в неё помимо посылок вводятся ограничения, нарушение которых свидетельствует о некорректности рассуждения. Данная модель позволяет расширить аналитические возможности логического анализа и выявлять некорректности традиционной силлогистики, к которым, в частности, относится признание «неправильными» модусами некоторых правильных рассуждений. Формулируются и обосновываются новые законы алгебры множеств: закон парадокса, условие непустого пересечения и закон существования.

Ключевые слова: силлогистика, полисиллогистика, логический анализ, алгебра множеств, аксиомы, граф включений, закон парадокса, закон существования, логические ошибки.

Цитирование: Кулик Б.А. О заблуждениях в современной логике. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №1(55). С.11-23. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-11-23.

Финансирование: работа поддержана Минобрнауки Российской Федерации (Регистрационный номер научно-исследовательской, опытно-конструкторской и технологической работы «Интеллектуальное управление, надёжность и безопасность сложных технических систем»: 124041500008-1).

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В утверждении о том, что логика лежит в основе всей математики, есть одно исключение. Об этом исключении написано в книге Р. Куранта и Г. Роббинса [1], первое издание которой вышло в 1941 году. Речь идёт о математической системе, которая авторами книги названа *алгеброй множеств*. Исключительность алгебры множеств выражается в том, что её законы, как считают авторы книги, можно обосновать без аксиом, на основе определения отношения включения и операций с множествами. Приведённые в этой книге 26 законов алгебры множеств полностью соответствуют законам классической логики. Это означает, что для обоснования законов классической логики нет необходимости в аксиомах.

В настоящей статье рассмотрены три заблуждения в современной логике: о противоречивости понятия «множество»; о безусловной необходимости аксиом в логике; о безошибочности силлогистики. Каждое из данных заблуждений преодолевается с использованием средств элементарной математики. В основе этих средств лежит обоснование законов алгеб-

ры множеств с помощью перебора вариантов и построение математической модели полисиллогистики на основе законов алгебры множеств.

1 О противоречивости понятия «множество»

О противоречивости понятия множества отмечено в книгах Э. Мендельсона [2, 3]. «Поскольку семантические понятия носят теоретико-множественный характер, а теория множеств, по причине парадоксов, представляется в известной степени *шаткой основой* для исследований в области математической логики, то многие логики считают более надёжным синтаксический подход, состоящий в изучении формальных аксиоматических теорий с применением лишь довольно слабых арифметических методов».

В учебниках логики такая явная негативная оценка понятия множества не встречается, а в некоторых учебниках [4-6] содержатся начальные сведения о множествах. При анализе свойств понятий во многих учебниках используются не множества, а «объёмы» и схемы в виде кругов Эйлера; для обоснования правильности модусов силлогистики используются модельные схемы [4, 6], семантические схемы [7] и диаграммы Венна [8], т.е. сущности, которые являются наглядными представлениями математических соотношений между множествами.

В аксиоматической теории множеств отношение принадлежности ($\in$) является основным. Одна из аксиом теории множеств (аксиома пары [9, 10]) предписывает использовать множества в качестве элементов. Это означает, что в теории множеств, если не вводить ограничения в виде других аксиом, допустимы такие выражения, как «множество всех множеств» и «множество, являющееся элементом самого себя» (самоприменимое множество), которые и вызывают парадоксы. В алгебре множеств отношение принадлежности – вспомогательное и служит лишь для описания конкретных множеств или для определения того, что данный элемент принадлежит определённому множеству. И в ней не предписано отождествлять элемент и множество.

Основным (системообразующим) в алгебре множеств является отношение включения. Это отношение используется в основных законах алгебры множеств. Его «самоприменимость» ($A \subseteq A$) является одним из законов алгебры множеств и не влечёт парадоксов.

Иногда алгебру множеств отождествляют с *наивной теорией множеств* [11]. Однако такое отождествление не вполне корректно. В этой книге излагается один из вариантов аксиоматической теории множеств. А в книге [1] алгебра множеств – это математическая система с определёнными операциями (пересечение, объединение, дополнение) и отношениями (принадлежность, включение, равенство).

В современной математике термину «алгебра множеств» часто придают смысл, существенно отличающийся от его значения, предложенного в [1]. С точки зрения разработанной значительно позже теории алгебраических систем [12] алгебра множеств – это система, в которой нет отношений. Такое понимание алгебры множеств изложено в [13] и во многих руководствах по дискретной математике. В результате такого подхода аналитические возможности алгебры множеств весьма ограничиваются. Чтобы расширить эти аналитические возможности, приходится выбирать не алгебру множеств, а такую «шаткую основу» (Э. Мендельсон) как аксиоматическая теория множеств [2, 3].

Выбирая в качестве средства для анализа повседневной жизни аксиоматическую теорию множеств, приходится действовать по правилам, которые для этой повседневности не предназначены. Речь идёт об *актуальной бесконечности* [9]. Помимо актуальной бесконечности в математических доказательствах часто используется *потенциальная бесконечность*, законы которой соответствуют законам конечных множеств, и с помощью которой доказаны многие теоремы математического анализа и многие законы физики и техники.

С точки зрения потенциальной бесконечности *натуральный ряд* чисел $1, 2, 3, 4, \dots$ – это

конечный ряд, о котором известно только, что он не имеет предела. Относительно любого числа M в этом ряду существует и может быть задано число, большее, чем M . Для этого достаточно увеличить M всего лишь на единицу.

Если речь идёт о линии (пусть это будет отрезок прямой линии), то с точки зрения потенциальной бесконечности этот отрезок состоит не из бесконечного количества точек, а из *конечного количества отрезков*, длина которых уменьшается так, что она может оказаться меньше любой заранее заданной величины. В соответствии с этим увеличивается и количество отрезков, покрывающих данный отрезок. Но при этом количество покрывающих отрезков остаётся конечным.

Что касается точек, то они присутствуют в потенциальной бесконечности как границы интервалов. При разбиении отрезка на конечное количество малых отрезков количество точек, определяющих границы интервалов, тоже конечно. Если же предположить, что интервал состоит только из точек, то тем самым можно перейти к актуальной бесконечности с её законами, не совместимыми с законами конечных множеств.

В качестве примера можно сравнить мощности множеств целых чисел с точки зрения разных бесконечностей. Пусть даны ряды целых (N) и чётных (N_2) чисел:

N : 1, 2, 3, 4, ..., M , ...

N_2 : 2, 4, 6, 8, ..., $2M$, ...

С точки зрения актуальной бесконечности при сравнении этих рядов соблюдается *принцип взаимно однозначного соответствия*: каждому числу ряда N соответствует определённое и единственное число из ряда N_2 . Отсюда следует вывод о равенстве мощностей множеств N_2 и N .

С точки зрения потенциальной бесконечности, в которой предполагается, что любое продолжение ряда представлено конечным множеством, видно, что не соблюдается соотношение строгого включения $N_2 \subset N$. Нетрудно убедиться, что в нижнем ряде при любой конечной фиксации ряда присутствуют числа, которые не содержатся в верхнем ряде. Например, если ряд N завершается числом M , то в ряде N_2 присутствует число $2M$ и некоторые другие числа ($2M - 2$, $2M - 4$ и т.д.), которые отсутствуют в ряде N . Отсюда ясно, что при таком сравнении соотношение $N_2 \subset N$ не выполняется.

Поэтому с точки зрения потенциальной бесконечности правильным является расчёт соотношения между количеством всех чисел ряда N и количеством всех чётных чисел этого ряда. Нетрудно убедиться, что если ряд N в какой-то момент времени завершается числом M , то количество содержащихся в нём чётных чисел K зависит от того, является ли число M чётным или нечётным. Если M чётное, то $K = M/2$, если же M нечётное, то $K = (M - 1)/2$.

Полученные соотношения позволяют рассчитать *относительную мощность* чётных чисел в ряде всех целых чисел: $k = K/M$. Для чётного M относительная мощность $k = 1/2$, для нечётного $k = (M - 1)/2M = 1/2 - 1/2M$.

Используя это равенство, можно доказать, что при неограниченном возрастании M число k в точности равно $1/2$ для чётного M и будет неограниченно приближаться к $1/2$ для нечётного M , так как число $1/2M$ уменьшается неограниченно по мере возрастания числа M .

Этот результат не соответствует утверждению о равномощности чисел натурального ряда и ряда чётных чисел, обоснованному с точки зрения актуальной бесконечности. Можно предположить, что многие «нестандартные» свойства актуальной бесконечности (теорема Банаха – Тарского о равновеликом удвоении шара, парадоксы теории вероятностей и математической статистики [14] и т.д.) обусловлены тем, что при обоснованиях «парадоксальных» результатов используются свойства и соответствия, которые не подтверждаются при рассмотрении этих свойств с точки зрения потенциальной бесконечности.

2 Обоснование законов алгебры множеств без аксиом

Основные понятия алгебры множеств подробно изложены в разделе «Алгебра множеств»¹ [1], где перечислено 26 законов алгебры множеств. Они приведены здесь для того, чтобы получить возможность оценить их соответствие с законами классической логики и сравнить с новыми законами, формулировки и обоснования которых приведены в разделе 4. Пусть A , B и C – произвольные множества, U – универсум рассуждения и $\emptyset$ – пустое множество. Тогда справедливы следующие законы.

- 1) $A \subseteq A$.
- 2) Если $A \subseteq B$ и $B \subseteq A$, то $A = B$.
- 3) Если $A \subseteq B$ и $B \subseteq C$, то $A \subseteq C$.
- 4) $\emptyset \subseteq A$.
- 5) $A \subseteq U$.
- 6) $A \cup B = B \cup A$.
- 7) $A \cap B = B \cap A$.
- 8) $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap C$.
- 9) $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup C$.
- 10) $A \cup A = A$.
- 11) $A \cap A = A$.
- 12) $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$.
- 13) $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$.
- 14) $A \cup \emptyset = A$.
- 15) $A \cap U = A$.
- 16) $A \cup U = U$.
- 17) $A \cap \emptyset = \emptyset$.
- 18) $A \subseteq B$ эквивалентно $A \cup B = B$ и эквивалентно $A \cap B = A$.
- 19) $A \cup \bar{A} = U$.
- 20) $A \cap \bar{A} = \emptyset$.
- 21) $\bar{\emptyset} = U$.
- 22) $\bar{U} = \emptyset$.
- 23) $\bar{\bar{A}} = A$.
- 24) $A \subseteq B$ эквивалентно $\bar{B} \subseteq \bar{A}$.
- 25) $\overline{A \cup B} = \bar{A} \cap \bar{B}$.
- 26) $\overline{A \cap B} = \bar{A} \cup \bar{B}$.

Закон 2 используется для доказательства равенства множеств [15]. В [3, 15] закон 3 называют *законом транзитивности* включения множеств, законы 12 и 13 – *законами дистрибутивности*, закон 23 – *законом двойного дополнения*, закон 24 – *законом контрапозиции*, а законы 25 и 26 – *законами де Моргана*; в [3, 5] закону 19 соответствует *закон исключенного третьего*, а закону 20 – *закон непротиворечия*.

Проверить справедливость этих законов можно с помощью перебора вариантов соотношений между множествами [1]. На рисунке 1 изображена диаграмма Венна, с помощью которой можно выразить все возможные соотношения между двумя множествами A и B с учётом их общего универсума U .

На рисунке области c , d , e и f не пересекаются друг с другом, а их объединение равно U . Тем самым они образуют *разбиение* универсума. Это позволяет использовать эти области в качестве элементов множеств U , A и B . Тогда для доказательства законов алгебры множеств можно взять за основу следующие исходные данные:

$$U = \{c, d, e, f\}; A = \{c, d\}; B = \{d, e\}.$$

Используя эти исходные данные, можно доказать закон 25: $\overline{A \cup B} = \bar{A} \cap \bar{B}$. Для этого в соответствии с определениями операций алгебры множеств [1] последовательно можно выполнить следующие вычисления.

$$1) A \cup B = \{c, d, e\}; 2) \overline{A \cup B} = \{f\}; 3) \bar{A} = \{e, f\}; 4) \bar{B} = \{c, f\}; 5) \bar{A} \cap \bar{B} = \{f\};$$

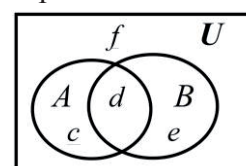


Рисунок 1 – Диаграмма Венна для двух множеств

¹ Некоторые обозначения в [1] устарели. Вместо $A \cap B$ (пересечение множеств) используется AB , вместо $A \cup B$ (объединение множеств) – $A+B$, а вместо $\bar{A}$ (дополнение множества A) – A' .

6) Сравнивая 2 и 5, можно получить: $\overline{A \cup B} = \overline{A} \cap \overline{B}$.

Вычисления подтверждают справедливость закона 25. Однако этого недостаточно, т.к. необходимо проверить этот закон для всех возможных вариантов соотношений между множествами A и B . Эти варианты можно получить, если последовательно исключать элементы c, d, e и f и их сочетания из универсума U . Нетрудно убедиться, что таких вариантов 16.

1) $U = \{c, d, e, f\}; A = \{c, d\}; B = \{d, e\}$.

2) $U = \{c, d, e\}; A = \{c, d\}; B = \{d, e\}$.

3) $U = \{c, d, f\}; A = \{c, d\}; B = \{d\}$.

4) $U = \{c, e, f\}; A = \{c\}; B = \{e\}$.

5) $U = \{d, e, f\}; A = \{d\}; B = \{d, e\}$.

6) $U = \{c, d\}; A = \{c, d\}; B = \{d\}$.

7) $U = \{c, e\}; A = \{c\}; B = \{e\}$.

8) $U = \{c, f\}; A = \{c\}; B = \emptyset$.

9) $U = \{d, e\}; A = \{d\}; B = \{d, e\}$.

10) $U = \{d, f\}; A = \{d\}; B = \{d\}$.

11) $U = \{e, f\}; A = \emptyset; B = \{e\}$.

12) $U = \{c\}; A = \{c\}; B = \emptyset$.

13) $U = \{d\}; A = \{d\}; B = \{d\}$.

14) $U = \{e\}; A = \emptyset; B = \{e\}$.

15) $U = \{f\}; A = \emptyset; B = \emptyset$.

16) $U = \emptyset; A = \emptyset; B = \emptyset$.

Например, можно доказать справедливость закона де Моргана для варианта 8.

1) $A \cup B = \{c\}$; 2) $\overline{A \cup B} = \{f\}$; 3) $\overline{A} = \{f\}$; 4) $\overline{B} = \{c, f\}$; 5) $\overline{A} \cap \overline{B} = \{f\}$;

6) Сравнивая 2 и 5, можно получить: $\overline{A \cup B} = \overline{A} \cap \overline{B}$.

Можно рассмотреть некоторые варианты доказательства закона контрапозиции. В этом законе соотношение $A \subseteq B$ является обязательным условием, поэтому необходимо учитывать те из 16 вариантов, в которых соблюдается это соотношение (5, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16).

В качестве примера этот закон можно доказать для варианта 5.

1) Проверяется, что $A \subseteq B$: $\{d\} \subseteq \{d, e\}$; 2) $\overline{A} = \{e, f\}$; 3) $\overline{B} = \{f\}$;

4) Проверка показывает, что $\overline{B} \subseteq \overline{A}$.

Закон контрапозиции подтверждается и для других семи вариантов. Если рассмотреть варианты соотношений между множествами, в которых не соблюдается $A \subseteq B$, то можно убедиться, что для множеств $\overline{B}$ и $\overline{A}$ соотношение $\overline{B} \subseteq \overline{A}$ также не соблюдается во всех этих вариантах. Тем самым подтверждается равносильность соотношений $A \subseteq B$ и $\overline{B} \subseteq \overline{A}$.

Предложенный метод доказательства, в котором используется простой перебор вариантов, может показаться трудоёмким. Например, чтобы доказать законы дистрибутивности, в которых участвуют три множества, потребуется рассмотреть 256 вариантов в каждом случае. Можно сократить число вариантов, если для доказательства этого закона воспользоваться другими, менее трудоёмкими при обосновании, законами алгебры множеств. Идею такого доказательства законов дистрибутивности с использованием закона 2 можно найти в [15]. Преимущество этого метода в том, что он позволяет показать возможность строгого доказательства законов алгебры множеств без аксиом. Тем самым можно получить непротиворечивую систему, в которой выводятся основные законы классической логики.

3 Математическая модель полисиллогистики

Полисиллогистика – это математическая система рассуждений, в которой задано произвольное число неструктурированных относительно друг друга суждений силлогистики [4, 5] в качестве посылок, а также сформулированные здесь ограничения. В задачи полисиллогистики входят вывод заключений и распознавание некорректностей в рассуждении.

В основе силлогистики, созданной Аристотелем, лежат четыре типа суждений [4, 5]:

A: Все *P* есть *Q*, пример: «Все крокодилы – рептилии».

I: Некоторые *P* есть *Q*, пример: «Некоторые студенты – спортсмены».

E: Все *P* не есть *Q*, пример: «Все жирафы – не земноводные».

O: Некоторые *P* не есть *Q*, пример: «Некоторые мои коллеги не любят критику».

A, *I*, *E*, *O* – общепринятые обозначения типов суждений, при этом типы *A* и *E* называются *общими* суждениями, а типы *I* и *O* – *частными*.

Пример силлогизма.

1-я посылка: Все кустарники – не животные. 2-я посылка: Все кустарники – растения.

Заключение: Некоторые растения не являются животными.

Это пример правильного силлогизма. Он состоит из двух общих посылок (типы *E* и *A*) и частного заключения (тип *O*). В силлогистике для распознавания правильных силлогизмов необходимо знать, из каких типов суждений они состоят и какова их структура. Структура силлогизма определена с помощью четырёх типов *фигур* с номерами 1, 2, 3, 4. Варианты силлогизмов с указанием типов содержащихся в них суждений и номеров соответствующих фигур называется *модусами силлогизма*. Например, приведённый силлогизм соответствует модусу *ЕАО* фигуры 3.

Всего можно построить 256 различных модусов, из них число правильных модусов невелико, причём в разных учебниках логики они различны: 15 в [8], 19 в [5], 24 в [4, 6, 7]. Чтобы определить, правильно ли заданное рассуждение, надо сравнить это рассуждение с одним из этих списков правильных модусов. Такой способ анализа правильности рассуждений нередко приводит к неоднозначным результатам. Недостатки силлогистики подробно рассмотрены в [16]. Здесь перечислены некоторые из них и предложены способы их устранения.

Недостаток 1: В силлогизме предусмотрено только две посылки и одно заключение. Предлагается одним общим методом анализировать системы с любым числом посылок, для которых возможны более одного следствия или заключения. Тем самым можно перейти к общему методу анализа рассуждений с произвольным числом посылок.

Недостаток 2: В силлогистике все термины не должны соответствовать пустому множеству. В противном случае некоторые правильные модусы силлогизма окажутся ошибочными. Этот запрет ограничивает возможности анализа, т.к. не позволяет проверить существование анализируемых объектов (с точки зрения математики множество существует, если для данных посылок доказано его неравенство пустому множеству). Предлагается не запрещать равенство терминов пустому множеству, но при этом предусмотреть в рассуждении помимо посылок ограничения, в составе которых могут быть запреты равенства некоторых объектов пустому множеству.

Недостаток 3: В силлогистике при изменении порядка посылок часто образуются неправильные модусы силлогизма, в силу чего изменение порядка посылок в силлогистике запрещено. Например, если в приведённом выше силлогизме переставить посылки, то полученный модус окажется неправильным. Если суждения этого силлогизма выразить в терминах математической логики, то перестановка посылок не повлияет на результат. В предлагаемой системе полисиллогистики этот запрет не имеет смысла.

На основе законов алгебры множеств можно построить систему логического вывода с учётом предложенных изменений. Типы суждений можно выразить в соотношениях алгебры множеств. Пусть термины *P* и *Q* в формулировках суждений соответствуют некоторым одноимённым множествам. Тогда типам суждений будут соответствовать следующие выражения алгебры множеств:

$$A: P \subseteq Q; \quad I: P \cap Q \neq \emptyset; \quad E: P \subseteq \bar{Q}; \quad O: P \cap \bar{Q} \neq \emptyset.$$

С учётом этого для полисиллогистики предлагается следующая математическая модель². Пусть в универсуме U задана система множеств S_i ($i = 1, 2, \dots, n$) и их дополнений $\overline{S_i}$ без перечисления их элементов, при этом допускается возможность равенства некоторых из этих множеств пустому множеству или универсуму. В результате проведённого анализа некоторые из этих множеств могут оказаться равными друг другу. Для этой системы заданы *логические посылки* двух типов:

- *общие суждения* заданы как соотношения включения между некоторыми из заданных множеств (например, $\overline{S_2} \subseteq S_3$);
- *частные суждения*, выражающие обязательность непустого пересечения некоторых пар множеств (например, $S_2 \cap S_6 \neq \emptyset$).

В этой системе можно установить два вида ограничений:

- *ограничения подмены термина* (или двусмысленности) выражаются как недопустимость равенства некоторых пар множеств (например, $S_2 \neq S_4$);
- *ограничения пустоты* выражаются как недопустимость равенства пустому множеству некоторых из заданных множеств (например, $S_4 \neq \emptyset$).

В рассматриваемой модели в качестве одного из условий можно предусмотреть *предполагаемое следствие*, которое выражено в виде общего суждения.

С помощью этой модели рассуждений можно решать следующие задачи.

Задача 1: Найти следствия в виде соотношений включения между не заданными в условиях задачи парами множеств (выводятся следствия в виде новых общих суждений).

Задача 2: Проверить, нарушаются ли в данной системе ограничения подмены термина.

Задача 3: Если задано предполагаемое следствие, то проверить, выводится ли это следствие из заданных посылок. В случае отрицательного результата осуществляется поиск возможных посылок, добавление которых в модель рассуждений позволяет превратить предполагаемое невыводимое следствие в обычное следствие. Найденные варианты таких посылок являются *абдуктивными заключениями*.

Задача 4: Проверить, нарушаются ли в данной системе ограничения пустоты (проверяется отсутствие или наличие парадоксов в рассуждении).

Задача 5: Найти новые пары множеств, для которых доказывается непустое пересечение (выводятся заключения в виде новых частных суждений).

Задача 6: Установить, для каких множеств, помимо тех, что заданы в ограничениях пустоты, доказывается их безусловное неравенство пустому множеству.

Решения Задач 1 – 5 можно найти в [17]. Решение задач полисиллогистики удобно начать с построения графа включений.

Литерал – это обозначение множества или его дополнения, например, S_2 и $\overline{S_2}$.

Граф включений – это *граф*, на котором литералы представлены *вершинами*, а отношения включения между соответствующими множествами – *дуги* графа. Если, например, $S_4 \subseteq \overline{S_2}$, то на графе включений дуга направлена от литерала S_4 к литералу $\overline{S_2}$ ($S_4 \rightarrow \overline{S_2}$). Для упрощения на рисунках изображаются дуги от литерала к литералу.

Порядок действий при решении всех шести задач начинается одинаково.

- 1) строится граф включений для всех посылок;
- 2) применяется закон контрапозиции ко всем посылкам и дополняется граф включений.

Пример 1. Этот пример взят из книги [18] с изменениями (термин «ростовщик» заменён на термин «мошенник» и добавлена шестая посылка). В примере демонстрируется ситуация,

² Эта модель отличается от соответствующей модели в [17] тем, что в ней не используются аксиомы E -структур.

когда абсурд обусловлен не ошибками в логическом выводе, а незаметно присутствует в посылках. Даны посылки:

- 1) те, кто нарушает свои обещания, не заслуживают доверия;
- 2) все любители выпить очень общительны;
- 3) человек, выполняющий свои обещания, честен;
- 4) ни один трезвенник – не мошенник;
- 5) тому, кто очень общителен, всегда можно верить;
- 6) все честные люди – не мошенники.

Необходимо вывести новые общие суждения (Задача 1) и проверить существование мошенников, т.е. проверить соблюдается ли ограничение пустоты (Задача 4) для термина «мошенник».

Можно сформулировать посылки полисиллогизма в виде соотношений между следующими множествами: U – люди; S_1 – нарушающие обещания; S_2 – заслуживающие доверия; S_3 – любители выпить; S_4 – очень общительные; S_5 – честные; S_6 – мошенники. Тогда суждения Примера 1 можно выразить в виде следующих соотношений.

- 1) $S_1 \subseteq \overline{S_2}$; 2) $S_3 \subseteq S_4$; 3) $\overline{S_1} \subseteq S_5$; 4) $\overline{S_3} \subseteq \overline{S_6}$; 5) $S_4 \subseteq S_2$; 6) $S_5 \subseteq \overline{S_6}$.

Ограничение пустоты: $S_6 \neq \emptyset$.

Для упрощения решения задач граф включений рекомендуется изображать таким способом (см. рисунок 2): в верхней строке располагаются все позитивные литералы, в нижней – все негативные. Так исключается пропуск литералов, и на такой схеме можно легко вывести контрапозиции исходных суждений.

Для решения задачи необходимо применить закон контрапозиции и (при необходимости) закон двойного дополнения к выводимым посылкам.

- 7) $S_2 \subseteq \overline{S_1}$; 8) $\overline{S_4} \subseteq \overline{S_3}$; 9) $\overline{S_5} \subseteq S_1$; 10) $S_6 \subseteq S_3$; 11) $\overline{S_2} \subseteq \overline{S_4}$; 12) $S_6 \subseteq \overline{S_5}$.

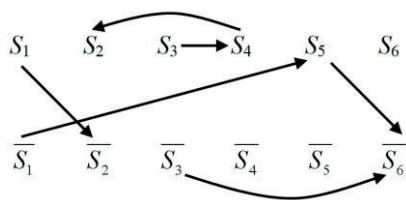


Рисунок 2 – Граф включений для посылок (Пример 1)

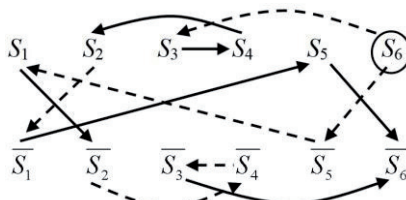


Рисунок 3 – Посылки и следствия (Пример 1)

Граф включений для посылок и их контрапозиций (изображены штриховыми линиями) представлен на рисунке 3. Из рисунка видно, что контрапозиции исходных суждений можно построить, используя правило: если исходное суждение

соединяет пару литералов, то контрапозиция этого суждения соединяет противоположные литералы, при этом направление дуги изменяется на обратное.

На схеме можно найти начальные литералы, т.е. те, в которые не входит ни одна дуга. Для данной задачи это единственный литерал – S_6 . Возможны задачи, у которых нельзя найти начальные литералы, т.к. все пути в графе включений могут оказаться циклами. В полисиллогистике цикл означает, что все литералы, содержащиеся в нём, представляют равные друг другу множества [17].

Закон транзитивности позволяет утверждать, что если имеется путь от одного литерала к другому, то множество, соответствующее начальному литералу пути, включено в множество, соответствующее конечному литералу. Отсюда в обоих случаях получается $S_6 \subseteq \overline{S_6}$ (все мошенники – не мошенники, что означает коллизия парадокса).

Если в Примере 1 исключить суждение 6 «все честные люди – не мошенники», то парадокс не появится, но при этом можно получить неожиданное следствие «все мошенники – честные», что не соответствует значению слова «мошенник».

4 Новые законы алгебры множеств

Необходимость в новых законах вызвана тем, что без них невозможно решение некоторых задач полисиллогистики. Первый закон назван законом парадокса.

(i) Закон парадокса: если доказано, что $X \subseteq \bar{X}$, то $X = \emptyset$.

Доказательство. Из определения операции дополнения следует, что в множестве $\bar{X}$ содержатся те и только те элементы универсума U , которые не являются элементами X . Пусть имеется элемент b такой, что $b \in X$. В то же время из условия $X \subseteq \bar{X}$ следует, что элемент b содержится в $\bar{X}$, т.е. по определению $b \notin X$. Полученное противоречие можно разрешить единственным способом: $X = \emptyset$. *Конец доказательства.*

Закон парадокса можно также доказать методом перебора, используя 16 вариантов возможных соотношений между множествами U , A и B . Проверка показывает, что соотношение $A \subseteq \bar{A}$ соблюдается только в вариантах 11, 14, 15, 16, т.е. в тех и только в тех, где $A = \emptyset$.

К парадоксу также приводит следующая ситуация. Пусть в результате рассуждений оказалось, что некоторый объект A обладает свойством B и в то же время не обладает им. Например, не вызывает сомнения то, что Ахиллес догонит черепаху, но вместе с этим «доказывается», что он не может её догнать. Это можно выразить в виде двух посылок: $A \subseteq B$ и $A \subseteq \bar{B}$. Применив закон контрапозиции ко второй посылке, получается $B \subseteq \bar{A}$. В то же время из $A \subseteq B$ и $B \subseteq \bar{A}$ по закону транзитивности следует $A \subseteq \bar{A}$.

Парадокс образуется и в том случае, когда свойствами объекта одновременно являются не *контрадикторные*, а *контрарные* сущности, когда для двух непустых множеств B и C выполняется отношение $C \neq \bar{B}$, но при этом $C \subseteq \bar{B}$.

Пусть даны две посылки $A \subseteq B$ и $A \subseteq C$. При этом свойства B и C являются контрарными, что можно выразить с помощью соотношения $B \subseteq \bar{C}$. Можно использовать это соотношение в качестве третьей посылки. Тогда из $A \subseteq B$ и $B \subseteq \bar{C}$ по закону транзитивности получается $A \subseteq \bar{C}$. В итоге получается коллизия парадокса $A \subseteq C$ и $A \subseteq \bar{C}$, из чего следует $A \subseteq \bar{A}$.

Второй новый закон алгебры множеств применяется для упрощения анализа частных суждений. Выражения для частных суждений типа $S_2 \cap S_6 \neq \emptyset$ не дают возможности непосредственно получать новые частные суждения, т.к. для этих выражений нельзя использовать законы транзитивности и контрапозиции. Поэтому предложено дать следующую формулировку для частных суждений:

(ii) Условие непустого пересечения: $\alpha_k \subseteq X$ и $\alpha_k \subseteq Y$ при условии $\alpha_k \neq \emptyset$ равносильно выражению $X \cap Y \neq \emptyset$.

Доказательство. Если $\alpha_k \neq \emptyset$, то существует элемент b такой, что $b \in \alpha_k$. Из $\alpha_k \subseteq X$ и $\alpha_k \subseteq Y$ следует, что $b \in X$ и $b \in Y$, в силу чего справедливо $X \cap Y \neq \emptyset$. *Конец доказательства.*

Третий новый закон предназначен для распознавания безусловно непустых множеств среди тех множеств системы, которые не заданы в ограничениях пустоты.

(iii) Закон существования: если $X \neq \emptyset$ и $X \subseteq Y$, то $Y \neq \emptyset$.

Доказательство. Поскольку $X \neq \emptyset$, то существует элемент b такой, что $b \in X$. Поскольку $X \subseteq Y$, то $b \in Y$. Следовательно, $Y \neq \emptyset$. *Конец доказательства.*

Этот закон по форме соответствует известному в логике правилу вывода (*modus ponens*, *MP*): если выводимы формулы A и $A \supset B$, то выводима формула B ($\supset$ – обозначение логической связки импликации). По сути, закон (iii) – это *MP* применительно к множествам.

Использование трёх новых законов можно показать на следующем примере.

Пример 2. В Пример 1 вносится следующее изменение: оставляя неизменным ограничение пустоты ($S_6 \neq \emptyset$), вторая посылка «все любители выпить очень общительны» преобразу-

ется в более правдоподобное частное суждение «некоторые любители выпить очень общительны». Тогда вместо посылки $S_3 \subseteq S_4$ надо, используя закон (ii), ввести две посылки: $\alpha_k \subseteq S_3$ и $\alpha_k \subseteq S_4$ при условии $\alpha_k \neq \emptyset$. В соответствии с этим можно построить граф включений (рисунок 4). Анализ этого графа позволяет получить следующие выводы.

1) На графе включений имеются три начальных литерала: S_6 , $\bar{S}_3$ и α_k .

2) Из литерала S_6 (мошенники) исходят две ветви: $S_6 \rightarrow \overline{S_5} \rightarrow S_1 \rightarrow \overline{S_2} \rightarrow \overline{S_4} \rightarrow \overline{\alpha_k}$ и $S_6 \rightarrow S_3$. Это означает, что мошенники обладают следующими качествами: не честные, нарушающие обещания, не заслуживающие доверия, не общительные, любители выпить. Среди перечисленных свойств, в отличие от Примера 1, нет кон-традикторных, что означает отсутствие парадокса.

3) Из непустого литерала α_k исходят две ветви: $\alpha_k \rightarrow S_4 \rightarrow S_2 \rightarrow \overline{S_1} \rightarrow S_5 \rightarrow \overline{S_6}$ и $\alpha_k \rightarrow S_3$. По условию *непустого пересечения* получается, что непустое пересечение имеют пары литералов, находящихся на одной из этих ветвей (например, $S_4 \cap \overline{S_1} \neq \emptyset$, т.к. $\alpha_k \subseteq S_4$ и $\alpha_k \subseteq \overline{S_1}$), и пары литералов, содержащихся в разных ветвях, исходящих из α_k (например, $\overline{S_6} \cap S_3 \neq \emptyset$, т.к. $\alpha_k \subseteq \overline{S_6}$ и $\alpha_k \subseteq S_3$). Среди этих пар нет пары (S_5, S_6) , из чего следует, что частное суждение «некоторые мошенники честные» ($S_5 \cap S_6 \neq \emptyset$) не является заключением в данном примере. Тот же результат можно получить, если рассмотреть ветви, исходящие из литерала S_6 , который в силу ограничения пустоты соответствует непустому множеству.

Предложенный в Примере 2 метод разрешения противоречий можно обосновать и для общего случая, который выражен в следующей теореме.

Теорема (элиминация парадокса с помощью преобразования общего суждения в частное). Если противоречие в рассуждении вызвано цепью включений литералов $L_1 \subseteq L_2 \subseteq \dots \subseteq L_n$, при условии $L_n = \overline{L_1}$, то элиминировать парадокс можно с помощью выбора в этой цепи пары литералов (L_i, L_{i+1}) и заменой соотношения $L_i \subseteq L_{i+1}$ двумя соотношениями $\alpha_k \subseteq L_i$ и $\alpha_k \subseteq L_{i+1}$ при условии $\alpha_k \neq \emptyset$.

Доказательство. При замене в графе включений разрывается путь, ведущий от L_1 к $\overline{L_1}$, т.к. в исходной цепи дуга $L_i \rightarrow L_{i+1}$ преобразуется в подграф $L_i \leftarrow \alpha_k \rightarrow L_{i+1}$. В цепи, которая образуется из контрапозиций дуг, входящих в исходную цепь, и также, как и исходная, представляет путь из L_1 к $\overline{L_1}$, при замене также происходит разрыв, т.к. дуга $\overline{L_{i+1}} \rightarrow \overline{L_i}$ заменяется на подграф $\overline{L_{i+1}} \rightarrow \overline{\alpha_k} \leftarrow \overline{L_i}$, который препятствует достижению литерала $\overline{L_1}$ из литерала L_1 . Тем самым доказывается, что при замене общего суждения $L_i \subseteq L_{i+1}$ частным суждением $L_i \cap L_{i+1} \neq \emptyset$ парадокс элиминируется. *Конец доказательства.*

Таким образом, замена хотя бы одного общего суждения в цепи включений, ведущей к парадоксу, частным суждением позволяет устранить противоречие, но в ряде случаев такая логическая ошибка как *замена частного суждения общим* приводит правильное рассуждение к парадоксу.

Для решения Задачи 6 (распознавание безусловно непустых множеств в системе) используется закон существования (iii). В Примере 2 из условий задачи ясно, что изначально заданными непустыми множествами в системе являются S_6 и α_k . На графе включений (рисунок 4) можно проследить все ветви, исходящие из этих литералов. По закону существования любой

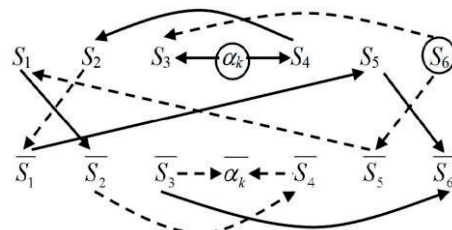


Рисунок 4 – Граф включений (Пример 2)

литерал, содержащийся в этих ветвях, соответствует безусловно непустому множеству. Из анализа Примера 2 ясно, что безусловно непустыми множествами являются все, за исключением $\overline{S_3}$ (трезвенники), т.к. только в этот литерал нет пути из литералов S_6 и α_k .

5 Недостатки силлогистики

Включение теории категорического силлогизма практически во все учебники логики означает, что данная система логического анализа рекомендована к практическому использованию и по своему назначению не допускает ошибок. Однако эта система обладает рядом недостатков. К ним относятся нестрогое и труднопонимаемое теоретическое обоснование, а также недостаток аналитических средств, что не даёт возможности решать более сложные задачи логического анализа рассуждений, включающих распознавание подмены терминов, парадоксов и формирование абдуктивных заключений. Эта теория в некоторых случаях приводит к ошибочным результатам логического анализа, в частности к тому, что некоторые корректные рассуждения распознаются в ней как неправильные модусы [16].

Заключение

Предложенные методы преодоления заблуждений в современной логике позволяют решить ряд проблем, связанных с рассуждениями и обоснованиями, в которых используются отношение включения множеств и изоморфное ему отношение следования. В основе этих методов лежат законы алгебры множеств, которые можно доказать без использования аксиом с помощью рассмотренных в статье вариантов соотношений между множествами.

В работе усовершенствована математическая модель полисиллогистики, в которой в качестве правил вывода используются законы транзитивности и контрапозиции. В модель рассуждений добавлены ограничения в виде неравенств, что позволяет распознавать ошибки в рассуждении. Предложенные изменения позволили расширить аналитические возможности силлогистики и устранить её недостатки. В качестве объектов модели можно вводить не только простые множества, но и формулы исчисления высказываний и предикатов, выраженные с помощью алгебры кортежей, что позволяет использовать данную модель рассуждений в информационных системах, основанных на знаниях.

Для решения ряда задач логического анализа сформулированы и обоснованы новые законы алгебры множеств: закон парадокса, условие непустого пересечения и закон существования.

Список источников

- [1] *Курант Р., Роббинс Г.* Что такое математика? / Пер. с англ. под ред. А.Н. Колмогорова. М.: МЦНМО, 2015. 568 с.
- [2] *Мендельсон Э.* Введение в математическую логику / Пер. с англ. Ф.А. Кабакова. М.: Наука, 1971. 320 с.
- [3] *Mendelson E.* Introduction to Mathematical Logic (6th ed.). Boca Raton, London, New York: Taylor & Francis Group, 2015. 499 p.
- [4] *Бочаров В.А., Маркин В.И.* Введение в логику: учебник. М.: ИФРАН, 2008. 560 с.
- [5] *Гетманова А.Д.* Учебник логики. Со сборником задач. М.: КНОРУС, 2011. 368 с.
- [6] *Томова Н.Е., Шалак В.И.* Введение в логику для философов. М.: ИФРАН, 2014. 191 с.
- [7] *Ивлев Ю.В.* Логика: учебник. 4-е изд. М.: Проспект, 2022. 304 с.
- [8] *Copi I.M., Cohen C., McMahon K.* Introduction to Logic. New York: Routledge, 2016. 654 p.
- [9] *Бурбаки Н.* Теория множеств. М.: Мир. 1965. 455 с.
- [10] *Френкель А.А., Бар-Хиллел И.* Основания теории множеств. Перевод с англ. Ю.А. Гастева. М.: URSS. 2010. 556 с.

- [11] **Halmos P.** Naive Set Theory. New York: D. Van Nostrand Company, 1960. 111 p.
- [12] **Мальцев А.И.** Алгебраические системы. М.: Наука, 1970. 392 с.
- [13] **Сазонов В.В.** Алгебра множеств // Математическая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия. Т.1. 1977. С.129-130.
- [14] **Секей Г.** Парадоксы в теории вероятностей и математической статистике / Пер. с англ. В.В. Ульянова под ред. В.В. Сазонова. М.: Мир, 1990. 240 с.
- [15] **Столл Р.Р.** Множества. Логика. Аксиоматические теории / Пер. с англ. Ю.А. Гастева и И.Х. Шмаина. М.: «Просвещение», 1968. 231 с.
- [16] **Кулик Б.А.** Почему в учебниках логики содержатся логические ошибки? *Образовательные ресурсы и технологии*. 2023. № 1(42). С.7–14. DOI: 10.21777/2500-2112-2023-1-7-14.
- [17] **Кулик Б.А.** Логика и математика: просто о сложных методах логического анализа. СПб.: Политехника, 2020. 144 с.
- [18] **Кэрролл Л.** Символическая логика / Пер. с англ. Ю.А. Данилова // Кэрролл Л. История с узелками. М.: Мир, 1985. С.189-362.

Сведения об авторе

Кулик Борис Александрович, 1941 г. рождения. Окончил Ленинградский горный институт в 1963 г., д.ф.-м.н. (2008). Ведущий научный сотрудник лаборатории Интеллектуальных электромеханических систем Института проблем машиноведения РАН. Член Российской ассоциации искусственного интеллекта. В списке научных трудов более 150 работ в области логики, искусственного интеллекта, системного анализа, надёжности и безопасности систем. Author ID (РИНЦ): 11676; Author ID (Scopus): 6603756784; Researcher ID (WoS): F-1539-2014. ba-kulik@yandex.ru.



Поступила в редакцию 2.11.2024, после рецензирования 26.11.2024. Принята к публикации 19.12.2024.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-11-23

On misconceptions in modern logic

© 2025, B.A. Kulik

Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Abstract

The article discusses the inconsistency of three "indisputable" principles in modern logic: the inconsistency of the concept of "set," the absolute necessity of axioms in logic, and the infallibility of syllogistic reasoning. To address the first misconception, the authors propose incorporating the algebra of sets into the foundations of logic, following the approach outlined in R. Courant and G. Robbins' book *What is Mathematics?* The second misconception is addressed by deriving known laws of algebra of sets, corresponding to classical logic, through the enumeration method. The third misconception is resolved by developing a mathematical model of polysyllogistic reasoning based on the laws of algebra of sets. The novelty of this proposed reasoning model lies in introducing restrictions alongside premises, with any violation of these restrictions signaling errors in reasoning. This model enhances the analytical capabilities of logical analysis, enabling the detection of errors in traditional syllogistic reasoning, including instances where some correct inferences are classified as "incorrect" modes. Furthermore, new laws of algebra of sets are formulated and justified: the law of paradox, the condition of non-empty intersection, and the law of existence.

Keywords: *syllogistic, polysyllogistics, logical analysis, algebra of sets, axioms, inclusion graph, law of paradox, law of existence, logical errors.*

For citation: Kulik B.A. On misconceptions in modern logic [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(1): 11-23. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-1-11-23.

Financial support: The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Registration number of the research, development and technological work "Intelligent control, reliability and safety of complex technical systems": 124041500008-1).

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

List of figures

Figure 1 - Venn diagram for two sets

Figure 2 - The inclusion graph for the premises (Example 1)

Figure 3 - Premises and consequences (Example 1)

Figure 4 - The inclusion graph (Example 2)

References

- [1] **Courant R, Robbins H.** What is Mathematics? An elementary approach to ideas and methods (2nd ed.). New York: Oxford University Press. 1996. 566 p.
- [2] **Mendelson E.** Introduction to Mathematical Logic. Toronto, New York, London, Princeton university press, 1964. 300 p.
- [3] **Mendelson E.** Introduction to Mathematical Logic. – 6th ed. – Boca Raton; London; New York: Taylor & Francis Group, 2015. 499 p.
- [4] **Bocharov VA, Markin VI.** Introduction to Logic: Textbook [In Russian]. Moscow, IFRAN, 2008. 560 p.
- [5] **Getmanova AD.** Textbook of logic. With a collection of tasks [In Russian]. Moscow, KNORUS, 2011. 368 p.
- [6] **Tomova NE, Shalak VI.** Introduction to Logic for Philosophers [In Russian]. Moscow, IFRAN, 2014. 191 p.
- [7] **Ivlev Ju. V.** Logic: textbook [In Russian]. Moscow, Prospekt, 2022. 304 p.
- [8] **Copi IM, Cohen C, McMahon K.** Introduction to Logic. New York: Routledge, 2016. 654 p.
- [9] **Bourbaki N.** Theory of Sets. Paris: Hermann; 1968. 424 p.
- [10] **Fraenkel AA, Bar-Hillel Y.** Foundations of Set Theory. Amsterdam, North-Holland Publishing Company, 1958. 415 p.
- [11] **Halmos P.** Naive Set Theory. New York: D. Van Nostrand Company, 1960. 111 p.
- [12] **Maltsev AI.** Algebraic systems. New York, Heidelberg, and Berlin, Springer-Verlag, 1973. XII + 317 p.
- [13] **Sazonov VV.** Algebra of sets [In Russian]. In Encyclopaedia of Mathematics. Moscow: Soviet Encyclopedia Publ., 1977. V. 1. 129-130.
- [14] **Székeley GJ.** Paradoxes in probability theory and mathematical statistics. Dordrecht, Boston, Lancaster, Tokyo. D. Reidel Publishing Company, 1986. 264 p.
- [15] **Stoll RR.** Sets, logic, and axiomatic theories. San Francisco, W. H. Freeman, 1974. 233 p.
- [16] **Kulik BA.** Why do logic textbooks contain logical errors? [In Russian]. *Educational Resources and Technologies*, 2023; 1(42): 7–14. DOI: 10.21777/2500-2112-2023-1-7-14.
- [17] **Kulik BA.** Logic and Mathematics: Complex Methods of Logical Analysis in Plain Words [In Russian]. Saint Petersburg, Politekhnik, 2020. 144 p.
- [18] **Carroll L.** Symbolic logic. <https://www.gutenberg.org/files/28696/28696-h/28696-h.htm>.

About the author

Boris Alexandrivich Kulik (b. 1941) graduated from the Leningrad Mining Institute (USSR) in 1963, Dr. Sc. in Physics and Mathematics (2008). He is a leading researcher at the Laboratory of Smart Electromechanical Systems (Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences). He is a member of Russian Association of Artificial Intelligence. He is a co-author of more than 150 publications in the field of logic, artificial intelligence, systems analysis and reliability and safety of systems. . Author ID (RSCI): 11676; Author ID (Scopus): 6603756784; Researcher ID (WoS): F-1539-2014. ba-kulik@yandex.ru.

Received November 2, 2024. Revised November 26, 2024. Accepted December 19, 2024.



Подход к твёрдотельному моделированию геометрических объектов в точечном исчислении

© 2025, Е.В. Конопацкий✉, С.И. Ротков, М.В. Лагунова, М.В. Безсольников

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (ННГАСУ),
Нижегород, Россия

Аннотация

Разработка систем автоматизированного проектирования включает комплекс фундаментальных и прикладных исследований. Концептуальную основу математического аппарата таких систем составляет понятие полноценного геометрического тела, как геометрического множества точек, для которого количество текущих параметров соответствует размерности пространства, где геометрическое тело представляется как выделенная часть пространства. Аналитическое описание таких точечных множеств выполняется посредством математического аппарата точечного исчисления. Такой подход имеет обобщение на многомерное пространство. В статье приводится сравнение предложенного подхода к твёрдотельному моделированию геометрических объектов с существующими подходами. Показаны примеры моделирования геометрических тел на основе нового подхода. Выделены преимущества предложенного подхода, включающие компактность аналитического описания, отсутствие необходимости использования матриц преобразования, возможность реализации параллельных вычислений на уровне математического аппарата и др. Обозначены возможности моделирования геометрических тел в точечном исчислении, в том числе моделирование изотропных и анизотропных тел в виде твёрдотельных геометрических объектов с функционально-управляемой линейной и нелинейной структурой пространства.

Ключевые слова: САПР, твёрдотельное моделирование, граничная модель, точечное исчисление, параллельные вычисления, геометрическое ядро.

Цитирование: Конопацкий Е.В., Ротков С.И., Лагунова М.В., Безсольников М.В. Подход к твёрдотельному моделированию геометрических объектов в точечном исчислении. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №1(55). С.24-33. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-1-24-33.

Финансирование: работа выполнена в рамках реализации стратегического проекта ННГАСУ «Суверенные САПР» программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030».

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Процесс современного проектирования невозможно представить без использования систем автоматизированного проектирования (САПР), которые стали эффективным инструментом геометрического моделирования. Геометрические модели прошли многоэтапный процесс эволюции, начиная от ручного черчения, двухмерного и трёхмерного моделирования, использования облачных технологий и цифровой поддержки жизненного цикла изделий до использования средств искусственного интеллекта и машинного обучения.

Существующие САПР хорошо подходят для решения инженерных задач с ограниченным количеством объектов, но пока не могут обеспечить достаточную производительность для создания полноценных цифровых двойников, включающих большие массивы трёхмерных элементов. Другим недостатком современных САПР является отсутствие программного обеспечения, объединяющего возможности геометрического моделирования (CAD) и расчётных САПР (CAE), что приводит к необходимости импорта геометрических моделей объектов

в расчётные комплексы и к возникновению проблем, связанных с недостаточной интероперабельностью отечественных и зарубежных САПР. Основой современных САПР является геометрическое ядро и математический аппарат, на основе которого оно реализовано.

1 Теоретическая часть

Существует несколько видов представления геометрических моделей в САПР, которые включают точечную, каркасную, граничную, конструктивную и воксельную¹ модели. Наибольшее распространение в САПР имеет граничная модель [1], которая получила аббревиатуру *BREP* (*Boundary REPresentation*) или *B-rep* [2-4]. Стоит отметить, что геометрически не совсем корректно называть замкнутую оболочку полноценной твёрдотельной моделью (ТМ), но эта условность используется, в т.ч. и в формате представления данных *IFC*².

Среди отечественных разработчиков геометрического ядра САПР можно выделить два программных продукта: *C3D* [5, 6] и *RGK* [7, 8]. Оба этих геометрических ядра используют граничную модель *BREP*. В работах [9, 10] показано, что поверхность (оболочка) – это двухпараметрическое множество точек, а геометрическое тело – это трёхпараметрическое множество, принадлежащее трёхмерному пространству. В обоих случаях речь идёт о переменных или текущих параметрах, а под геометрическим телом понимается геометрическое множество точек, у которого количество текущих параметров соответствует размерности пространства [9]. Одномерным геометрическим телом является отрезок прямой – выделенная часть одномерного пространства, двумерным телом – выделенная часть плоскости и т.д., а нульмерным геометрическим телом является точка – уникальный геометрический объект, который не имеет никаких метрических характеристик и вместе с тем любой геометрический объект можно представить организованным множеством точек.

Для аналитического описания кривых, поверхностей и гиперповерхностей многомерного пространства разработан математический аппарат «Точечное исчисление» [11]. Точечное исчисление используется также для моделирования геометрических тел, как выделенной части пространства, заполненного организованным множеством точек [9, 10]. Похожий подход, основанный на методах многомерной интерполяции, предложен в [12-14] и реализован на другом математическом аппарате.

Близкой к описанию геометрических тел является воксельная модель, обеспечивающая представление объектов в виде трёхмерного массива объёмных элементов [15-17]. Воксельная модель является обобщением растровой модели на трёхмерное пространство и унаследовала все недостатки растровых моделей, к которым относятся: большие массивы информации, необходимые для представления объёмных данных; значительные затраты оперативной памяти; трудности, связанные с увеличением или уменьшением изображений. Моделирование геометрических тел в виде организованного множества точек можно представить как векторное представление воксельных моделей. Если размер вокселя устремить к точке, то геометрические объекты можно описать организованным множеством точек, получив векторные модели, которые более предпочтительны в САПР по сравнению с растровыми.

ТМ, схожая с воксельной, используется в *CAE*, реализованных на основе метода конечных элементов (МКЭ) [18,19]. При стремлении размера объёмного элемента к бесконечно малой величине (точке) получается точечная ТМ, близкая к предложенной, но вычислительная сложность МКЭ при этом стремится к бесконечности. Если использовать представление

¹ Воксел (от англ. *volumetric pixel* или *voxel* — объёмный пиксель) — элемент объёмного изображения, содержащий значение элемента раstra в трёхмерном пространстве.

² IfcGeometricConstraintResource.

https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4_3/HTML/ifcgeometricconstraintresource/content.html.

геометрических объектов с помощью текущей точки, которая своим движением заполняет пространство, то можно получить модель, которая описывается простыми точечными уравнениями. Эти уравнения сводятся к системе однотипных параметрических уравнений, позволяющих реализовать параллельные вычисления по данным на уровне математического аппарата [20].

Пример моделирования геометрического тела предложенным способом (см. рисунок 1).

Для параметризации ТМ параллелепипеда можно воспользоваться простыми отношениями трёх точек прямых DA , DB и DC на его сторонах:

$$u = \frac{DP}{DA}, \quad v = \frac{DQ}{DB}, \quad w = \frac{DR}{DC}.$$

В результате получаются три точечных уравнения прямых:

$$P = (A - D)u + D, \quad Q = (B - D)v + D, \quad R = (C - D)w + D.$$

Для определения текущей точки M трёхпараметрического множества можно дважды воспользоваться точечной формулой параллельного переноса [11]:

$$\begin{cases} N = P + Q - D \\ M = R + N - D \end{cases} \Rightarrow M = (A - D)u + (B - D)v + (C - D)w + D. \quad (1)$$

В уравнении (1) A, B, C, D – исходные точки, которые не только формируют локальный симплекс трёхмерного пространства для определения искомого множества точек, но и однозначно определяют положение и размеры параллелепипеда в глобальной системе координат. Параметры u, v, w в предложенной параметризации (рисунок 1) изменяются от 0 до 1, обеспечивая заполнение точками внутренней части параллелепипеда. Используя свойства точечного исчисления, можно представить уравнение (1) в более компактном виде:

$$M = Au + Bv + Cw + D(1 - u - v - w).$$

Эти две формы представления геометрических объектов в точечном исчислении являются полностью идентичными и всегда могут быть получены одна из другой. Выбор формы представления точечного уравнения зависит от конкретной задачи и определяется удобством использования. Под точками A, B, C, D, M в уравнении (1) понимаются координатные векторы. Количество координат зависит от размерности пространства. Переходя к координатной форме для трёхмерного пространства, может быть получена следующая система параметрических уравнений:

$$\begin{cases} x_M = (x_A - x_D)u + (x_B - x_D)v + (x_C - x_D)w + x_D \\ y_M = (y_A - y_D)u + (y_B - y_D)v + (y_C - y_D)w + y_D \\ z_M = (z_A - z_D)u + (z_B - z_D)v + (z_C - z_D)w + z_D \end{cases} \quad (2)$$

Таким образом, для определения всех параметров положения и формы ТМ параллелепипеда понадобилось 12 параметров. Если использовать для этих целей граничную модель, то количество параметров увеличивается в разы, поскольку нужно определить каждую из шести плоскостей тремя точками, а каждую точку – тремя координатами. Итого получается 54 параметра. Это только поверхность тела без учёта внутренней составляющей. Есть и другие параметризации, но для этого необходимо использовать геометрические условия, реализация которых требует дополнительных вычислительных ресурсов.

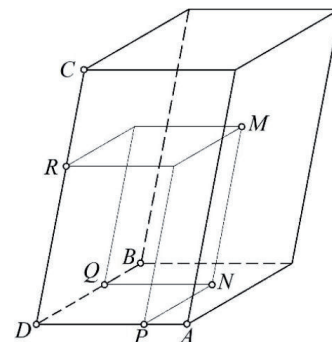


Рисунок 1 - Геометрическая схема определения твёрдотельной модели параллелепипеда

Уравнение (1) включает необходимые геометрические условия и позволяет реализовать параллельные вычисления по данным за счёт использования координатных векторов A, B, C, D, M . Все уравнения системы (2) являются полностью идентичными за исключением координат точек. Таким образом, вычислительные потоки являются сбалансированными, что минимизирует простой ядер процессора и оптимизирует его вычислительную нагрузку.

В описанной параметризации использованы линейные функции от текущих параметров u, v, w . Такие геометрические тела называются изотропными. Предложенный подход подразумевает, что для определения ТМ могут использоваться и нелинейные функции, которые управляют скоростью движения текущей точки внутри геометрического тела. Таким способом можно моделировать не только изотропные, но и анизотропные геометрические тела с функционально-управляемой анизотропией. Это открывает новые возможности геометрического моделирования физических свойств исследуемых объектов. Если под геометрическим телом понимать выделенную часть пространства, то становится возможным моделирование изотропных и анизотропных энергетических, магнитных, тепловых, световых, звуковых и других полей в виде геометрических объектов с линейной и нелинейной структурой пространства. Аналогичным образом, понимая под геометрическим телом не только твёрдые тела, можно использовать предложенный подход для моделирования физических свойств жидкостей и газов. А возможность обобщения понятия геометрического тела на многомерное пространство с учётом математического аппарата точечного исчисления позволяет использовать практически неограниченное количество параметров, описывающих соответствующие им физические свойства.

Предложенный подход к твёрдотельному моделированию представляет собой обобщение граничной и других моделей геометрических тел. Из точечного уравнения ТМ всегда в виде частных случаев можно получить уравнения поверхности оболочки путём фиксации граничных значений текущих параметров, определяющих модель геометрического тела. Например, для ТМ параллелепипеда из уравнения (1) путём фиксации граничных значений параметров u, v, w получены соответствующие грани параллелепипеда.

$$u = 0 \Rightarrow BCD. \quad u = 1 \Rightarrow \alpha // BCD.$$

$$v = 0 \Rightarrow ACD. \quad v = 1 \Rightarrow \beta // ACD.$$

$$w = 0 \Rightarrow ABD. \quad w = 1 \Rightarrow \gamma // ABD.$$

Аналогичным образом можно получить каркасную геометрическую модель путём одновременной фиксации двух параметров, определив, таким образом, все 12 рёбер параллелепипеда. При одновременной фиксации трёх параметров можно получить все 8 узловых точек параллелепипеда, включая исходные точки A, B, C, D . Изменяя значения параметров от 0 до 1, можно получить точечную геометрическую модель в виде облака дискретных точек.

Следующее направление исследований – это визуализация геометрических объектов на экране компьютера. Здесь разработаны алгоритмы, благодаря которым оптимизирована визуализация существующих геометрических моделей [21-23]. В отличие от них предложенный подход к определению геометрических тел, как выделенной части пространства, позволяет разработать и реализовать новые алгоритмы рендеринга изображений для систем твёрдотельного геометрического моделирования, виртуальной и дополненной реальности. Кроме того, такой подход к моделированию геометрических тел создаёт предпосылки для разработки технологии генерации полноценных объёмных изображений в трёхмерном пространстве, основанной на генерации в трёхмерном пространстве полноценных ТМ с помощью световых лучей функционально-управляемой плотности (геометрическое тело с нелинейной структурой пространства).

Исходя из перечисленных возможностей и перспектив использования предложенного подхода к твёрдотельному моделированию, выделено три основных направления в рамках реализации стратегического проекта «Суверенные САПР»:

- геометрическое ядро САПР нового поколения;
- компьютерное моделирование материи и энергии;
- технология генерации объёмных изображений в трёхмерном пространстве.

2 Результаты экспериментов

Предложенный подход к твёрдотельному моделированию прошёл апробацию на примере моделирования геометрических тел различной формы. Примеры моделирования геометрических тел в виде выделенной части трёхмерного пространства представлены в таблице 1.

В таблице 1: $\bar{u}=1-u$, $\bar{v}=1-v$, $\bar{w}=1-w$ – обозначение дополнений параметров u , v , w до единицы, принятое в точечном исчислении [11]. В таблице приведены только некоторые из возможных параметризаций моделей геометрических тел. Многие параметризации представлены в общем виде. Например, чтобы получить из тела трёхосного эллипсоида двухосное тело или шар, достаточно выбрать соответствующие координаты точек A , B , C , D . При этом точечное уравнение остаётся неизменным. Аналогично – с тороидальным телом. В таблице оно реализовано в общем виде, когда эллипс движется по эллиптической траектории, и соответствующими значениями координат точек модель может быть преобразована в круговое тороидальное тело.

Наряду с простыми геометрическими телами проведены вычислительные эксперименты по моделированию геометрических тел с более сложной геометрией.

Все представленные в работе ТМ визуализированы средствами компьютерной алгебры, но для этих целей могут быть использованы и другие инструменты компьютерной графики и научной визуализации.

Проведённые вычислительные эксперименты показали обоснованность и достоверность предложенного подхода.

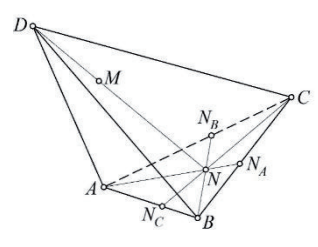
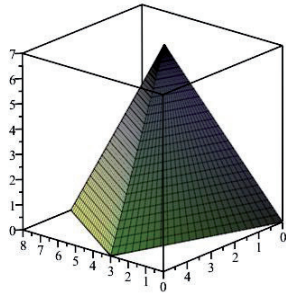
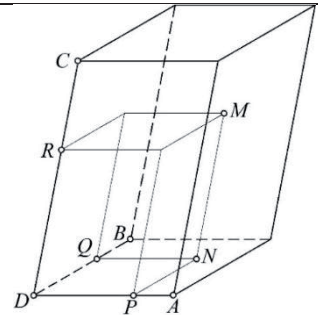
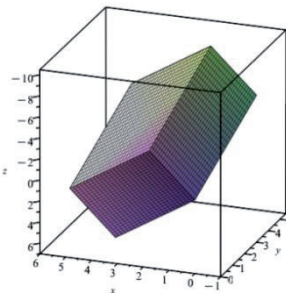
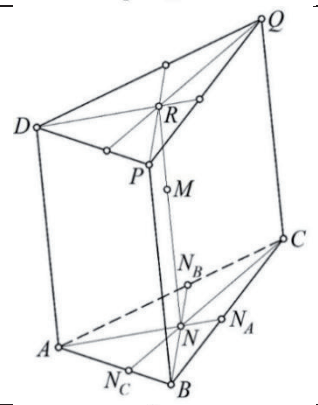
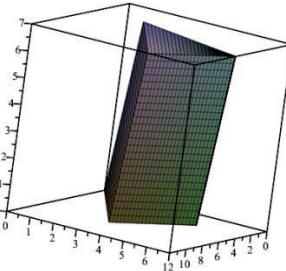
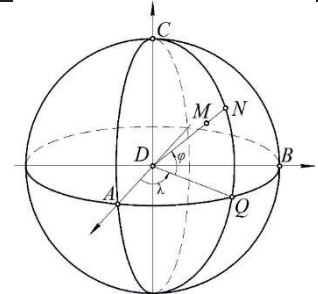
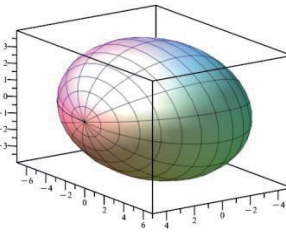
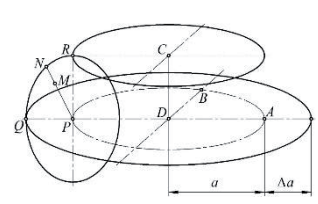
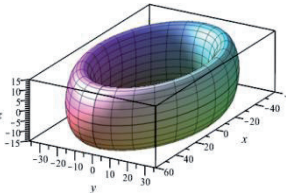
Заключение

Предложен новый математический аппарат векторного представления геометрических объектов. Можно выделить следующие преимущества предложенного подхода и перспективы его использования в САПР:

- разработка новых методов хранения геометро-графической информации, основанных на использовании точечных уравнений, инвариантных относительно параллельного проектирования;
- замена некоторых булевых операций над геометрическими телами аналитическими, а воксельных моделей – векторными;
- отсутствие необходимости использования матриц преобразования и согласования геометрической информации в процессе взаимодействия между *CAD* и *CAE*;
- реализация параллельных вычислений по данным на уровне математического аппарата «Точечное исчисление» и по задачам за счёт использования конструктивных алгоритмов геометрического моделирования на проективной и аффинной основе;
- разработка новых методов расчёта напряжённо-деформированного состояния твёрдых тел, основанных на функционально-управляемой анизотропии и альтернативных по отношению к МКЭ;
- разработка новых высокопроизводительных методов рендеринга изображений;

- разработка новой технологии генерации полноценных объёмных изображений в трёхмерном пространстве.

Таблица 1 – Модели геометрических тел в трёхмерном пространстве

Наименование тела	Геометрическая схема формообразования	Точечное уравнение	Визуализация твёрдотельной модели
Треугольная пирамида		$M = Au\bar{v}\bar{w} + B\bar{v}\bar{w} + C\bar{u}\bar{v}\bar{w} + Dw,$ $u \in [0;1], v \in [0;1], w \in [0;1].$	
Параллелепипед		$M = Au + Bv + Cw + D(1 - u - v - w),$ $u \in [0;1], v \in [0;1], w \in [0;1].$	
Треугольная призма		$M = A(uv - w) + B\bar{v} + C\bar{u} + Dw,$ $u \in [0;1], v \in [0;1], w \in [0;1].$	
Трёхосный эллипсоид		$M = (A - D)u \cos \lambda \cos \varphi + (B - D)u \sin \lambda \cos \varphi + (C - D)u \sin \varphi + D,$ $u \in [0;1], \lambda \in [0;2\pi], \varphi \in \left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right].$	
Тороид		$M = (A - D)\left(1 + \frac{\Delta a}{a}u \cos \lambda\right) \cos \varphi + (B - D)\left(1 + \frac{\Delta a}{a}u \cos \lambda\right) \sin \varphi + (C - D)u \sin \lambda + D,$ $u \in [0;1], \lambda \in [0;2\pi], \varphi \in [0;2\pi].$	

Авторский вклад

Конопацкий Е.В. - общая концепция подхода к твёрдотельному моделированию и получение уравнения; Ротков С.И. - анализ существующих методов твёрдотельного моделирования; Лагунова М.В. - сравнение предложенного подхода с существующими методами твёрдотельного моделирования; Безсольников М.В. - вычислительные эксперименты по твёрдотельному моделированию.

Список источников

- [1] Кулакова И.В., Борзенко А.Е. Граничное представление моделей (метод В-гер в пакетах САПР) // Информационные технологии в конструировании ЭС: Межвузовский сборник научных трудов. Рязань, 2023. С.139-143.
- [2] Hu Z., Zhang J., Zhang X. Construction collision detection for site entities based on 4-D space-time model. *Qinghua Daxue Xuebao* (Ziran Kexue Ban). 2010. Vol.50, No.6. P.820-825.
- [3] Zou Q., Feng H. Yu. A robust direct modeling method for quadric B-rep models based on geometry-topology inconsistency tracking. *Engineering with Computers*. 2022. Vol.38, No.4. P.3815-3830. DOI: 10.1007/s00366-021-01416-5.
- [4] Teschemacher T., Bauer A.M., Oberbichler T., Breitenberger M., Rossi R., Wüchner R., Bletzinger K.U. Realization of CAD-integrated shell simulation based on isogeometric B-Rep analysis. *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*. 2018. Vol.5, No.1. P.1-54. DOI: 10.1186/s40323-018-0109-4.
- [5] Ладилова А.А. Разработка кроссплатформенного ядра геометрического моделирования. *САПР и графика*. 2022. № 7(309). С.52-56.
- [6] Голованов Н.Н. Геометрическое моделирование. М.: КУРС: ИНФРА-М, 2019. 400 с.
- [7] Козлов С.Ю., Баранов Л.В. Геометрическое ядро RGK. *Автоматизация в промышленности*. 2023. №9. С.24-27.
- [8] Геометрическое ядро RGK на форуме компании «Топ Системы». *САПР и графика*. 2023. №7(323). С.32-41.
- [9] Konopatskiy E.V., Bezditnyi A.A., Lagunova M.V., Naidysh A.V. Principles of solid modelling in point calculus // Journal of Physics: Conference Series: 5, Omsk, 16–17 марта 2021 года. Omsk, 2021. P.012063. DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012063.
- [10] Konopatskiy E.V., Bezditnyi A.A. Solid modeling of geometric objects in point calculus. *Proceedings of the 31st International Conference on Computer Graphics and Vision* (GraphiCon 2021). Nizhny Novgorod, Russia, September 27-30, 2021. Vol.3027. P.666-672. DOI: 10.20948/graphicon-2021-3027-666-672.
- [11] Балюба И.Г., Конопацкий Е.В., Бумага А.И. Точечное исчисление. Макеевка: ДОННАСА, 2020. 244 с.
- [12] Аюшеев Т.В., Булычев Р.Н. Моделирование параметрических рациональных тел с использованием обобщенной интерполяции Безье. *Вестник Бурятского государственного университета. Математика, информатика*. 2018. №1. С.83-94. DOI: 10.18101/2304-5728-2018-1-83-94.
- [13] Аюшеев Т.В., Булычев Р.Н., Ракишова О.Д. Построение трехпараметрических тел с вырожденными граничными поверхностями. *Прикладная математика и фундаментальная информатика*. 2019. Т.6, №4. С.4-17. DOI: 10.25206/2311-4908-2019-6-4-4-17.
- [14] Аюшеев Т.В., Дамдинова Т.Ц., Бальжинимаева С.М. Моделирование тел с эллипсоидными порами в векторно-параметрическом представлении. *Динамика систем, механизмов и машин*. 2023. Т.11, №2. С.2-7. DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-2-2-7.
- [15] Шакаев В.Д., Кравец А.Г. Способы представления воксельного ландшафта при проектировании систем виртуальной реальности. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2019. Т.7, №1(24). С.309-327. DOI: 10.26102/2310-6018/2019.24.1.019.
- [16] Shchurova E.I. Voxel and Finite Element Modeling of Twist Drill. *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering* (ICIE 2019). Sochi, Russia, 25-29 March 2019. Springer International Publishing, Switzerland AG, 2020. P.181-190. DOI: 10.1007/978-3-030-22063-1_20.
- [17] Tolok A.V., Tolok N.B. Constructing the functional voxel model for terrain on the basis of bilinear interpolation of triangulated network. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol.1226. P.340-347. DOI: 10.1007/978-3-030-51974-2_33.
- [18] Косов М.Г., Капитанов А.В. Метод гранично-объемных конечных элементов для решения контактных задач. *СТИН*. 2019. №7. С.5-7.
- [19] Страхов Д.Е., Саханова А.И. Объемные конечные элементы в реконструируемых зданиях. *Инновационная наука*. 2017. № 10. С.20-26.
- [20] Конопацкий Е.В. Геометрические основы параллельных вычислений в системах компьютерного моделирования и автоматизированного проектирования. *Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению "Графикон"*. 2022. №32. С.816-825. DOI: 10.20948/graphicon-2022-816-825.

- [21] *Earnshaw R., Dill J., Kasik D.* Data Science and Visual Computing. *Advanced Information and Knowledge Processing*. 2019. DOI:10.1007/978-3-030-24367-8.
- [22] *Aung Pa.Pa.W., Choi W., Kulinan A.S., Cha G., Park S.* Three-Dimensional Engine-Based Geometric Model Optimization Algorithm for BIM Visualization with Augmented Reality. *Sensors*. 2022. Vol.22, No.19. P.7622. DOI: 10.3390/s22197622.
- [23] *Kasik D.* Geometric visualization. *Advanced Information and Knowledge Processing*, 2019. P.59-72. DOI: 10.1007/978-3-030-24367-8_5.

Сведения об авторах



Конопацкий Евгений Викторович, 1980 г. рождения. Окончил Донбасскую государственную академию строительства и архитектуры в 2004 г., д.т.н. (2020). Директор института информационных технологий ННГАСУ, заведующий кафедрой инженерной графики и информационного моделирования ННГАСУ. Учёный секретарь диссертационного совета по специальности «Инженерная геометрия и компьютерная графика. Цифровая поддержка жизненного цикла изделий». В списке научных трудов более 150 работ в области инженерной геометрии и компьютерной графики. ORCID: 0000-0003-4798-7458; Author ID (РИНЦ): 681553; Author ID (Scopus): 57188826034; Researcher ID (WoS): D-3235-2019. e.v.konopatskiy@mail.ru. ✉.

Ротков Сергей Игоревич, 1947 г. рождения. Окончил Горьковский государственный университет им. Лобачевского в 1970 г., д.т.н. (1999). Профессор кафедры инженерной графики и информационного моделирования ННГАСУ. Председатель диссертационного совета «Инженерная геометрия и компьютерная графика. Цифровая поддержка жизненного цикла изделий». В списке научных трудов более 240 работ в области инженерной геометрии, компьютерной графики и цифровой поддержки жизненного цикла изделий. ORCID: 0000-0002-3058-2369; Author ID (РИНЦ): 422792; Author ID (Scopus): 55533401900. rotkov@nngasu.ru.



Лагунова Марина Викторовна, 1962 г. рождения. Окончила Горьковский политехнический институт им. А.А. Жданова в 1984 г., д.п.н. (2002). Профессор кафедры инженерной графики и информационного моделирования ННГАСУ. В списке научных трудов более 250 работ в области инженерной геометрии и компьютерной графики. ORCID: 0000-0002-0671-8609; Author ID (РИНЦ): 364080; Author ID (Scopus): 57203126551. mvlnn@mail.ru.



Безсольников Максим Владимирович, 1998 г. рождения. Окончил ННГАСУ в 2022 г. Аспирант кафедры инженерной графики и информационного моделирования ННГАСУ. Author ID (РИНЦ): 1240598. bezsoff@yandex.ru.

Поступила в редакцию 03.09.2024, после рецензирования 29.11.2024. Принята к публикации 10.12.2024.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-24-33

An approach to solid modeling of geometric objects in point calculus

© 2025, E.V. Konopatskiy✉, S.I. Rotkov, M.V. Lagunova, M.V. Bezsolnov

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (NNSAGU), Nizhny Novgorod, Russia

Abstract

The development of computer-aided design systems involves a combination of fundamental and applied research. The conceptual foundation of the mathematical framework for such systems lies in the notion of a complete geometric body—a geometric set of points where the number of active parameters matches the dimensionality of the space, with the geometric body represented as a distinct part of that space. The analytical representation of these point sets is achieved through the mathematical apparatus of point calculus, which can be generalized to multidimensional spaces. The article compares this proposed approach to solid modeling of geometric objects with existing methods. Examples

demonstrating the modeling of geometric bodies using the new approach are provided. The advantages of this approach are emphasized, including the compactness of the analytical description, the elimination of transformation matrices, the facilitation of parallel computations within the mathematical framework, and more. Additionally, the article explores the capabilities of modeling geometric bodies in point calculus, such as the representation of isotropic and anisotropic bodies as solid geometric objects with a functionally controlled linear or nonlinear spatial structure.

Keywords: CAD, solid modeling, boundary model, point calculus, parallel computing, geometric kernel.

For citation: Konopatskiy EV, Rotkov SI, Lagunova MV, Bezsolnov MV. An approach to solid modeling of geometric objects in point calculus [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(1): 24-33. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-1-24-33.

Financial Support: The work was carried out within the framework of implementation of the NNSAGU strategic project “Sovereign CAD” of the strategic academic leadership program “Priority 2030”.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures and tables

Figure 1 - Geometric scheme for defining the solid model of a parallelepiped

Table 1 - Models of geometric bodies in three-dimensional space

References

- [1] Kulakova IV, Borzenko AE. Boundary representation of models (B-REP method in CAD packages) [In Russian]. *Information technologies in ES design: Interuniversity collection of scientific works*. Ryazan. 2023. P.139-143.
- [2] Hu Z, Zhang J, Zhang X. Construction collision detection for site entities based on 4-D space-time model. *Qinghua Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)*. 2010; 50(6): 820-825.
- [3] Zou Q, Feng HYU. A robust direct modeling method for quadric B-rep models based on geometry–topology inconsistency tracking. *Engineering with Computers*. 2022; 38(4): 3815-3830. DOI: 10.1007/s00366-021-01416-5.
- [4] Teschemacher T, Bauer AM, Oberbichler T, Breitenberger M, Rossi R, Wüchner R, Bletzinger KU. Realization of CAD-integrated shell simulation based on isogeometric B-Rep analysis. *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*. 2018; 5(1): 1-54. DOI: 10.1186/s40323-018-0109-4.
- [5] Ladilova AA. Development of cross-platform kernel of geometrical modeling [In Russian]. *CAD and graphics*. 2022;7(309): 52-56.
- [6] Golovanov NN. Geometrical modeling [In Russian]. Moscow: KURS: INFRA-M, 2019. 400 p.
- [7] Kozlov SYU, Baranov LV. Russian Geometrical Kernel, RGK [In Russian]. *Automation in industry*. 2023; 9: 24-27.
- [8] RGK at the Top Sistemi Company Forum [In Russian]. *CAD and graphics*. 2023; 7(323): 32-41.
- [9] Konopatskiy EV, Bezditnyi AA, Lagunova MV, Naidysh AV. Principles of solid modelling in point calculus. *Journal of Physics: Conference Series*: 5, Omsk, 16–17 марта 2021 года. Omsk, 2021. P.012063. DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012063.
- [10] Konopatskiy EV, Bezditnyi AA. Solid modeling of geometric objects in point calculus. *Proceedings of the 31st International Conference on Computer Graphics and Vision (GraphiCon 2021)*. Nizhny Novgorod, Russia, September 27-30, 2021; 3027: 666-672. DOI: 10.20948/graphicon-2021-3027-666-672.
- [11] Balyuba IG, Konopatsky EV, Bumaga AI. Dot calculus [In Russian]. Makeyevka: DONNASA, 2020. 244 p.
- [12] Ayusheev TV, Bulychev RN. Modeling of parametric rational solids using generalized Bezier interpolation [In Russian]. *Bulletin of Buryat State University. Mathematics, Informatics*. 2018; 1: 83-94. DOI: 10.18101/2304-5728-2018-1-83-94.
- [13] Ayusheev TV, Bulychev RN, Rakshaeva OD. Construction of three-parameter solids with degenerate facet surfaces [In Russian]. *Applied Mathematics and Fundamental Informatics*. 2019; 6(4): 4-17. DOI: 10.25206/2311-4908-2019-6-4-4-17.
- [14] Ayusheev TV, Damdinova TTs, Balzhinimayeva SM. Modeling of solids with ellipsoidal pores in vector-parametric representation [In Russian]. *Dynamics of systems, mechanisms and machines*. 2023; 11(2): 2-7. DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-2-2-7.
- [15] Shakaev VD, Kravets AG. Methods of voxel landscape representation in designing virtual reality systems [In Russian]. *Modeling, optimization and information technologies*. 2019; 7(24): 309-327. DOI: 10.26102/2310-6018/2019.24.1.019.

- [16] **Shchurova EI.** Voxel and Finite Element Modeling of Twist Drill. *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*. Sochi, Russia, 25-29 March 2019. Springer International Publishing, Switzerland AG, 2020. P.181-190. DOI: 10.1007/978-3-030-22063-1_20.
- [17] **Tolok AV, Tolok NB.** Constructing the functional voxel model for terrain on the basis of bilinear interpolation of triangulated network. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020; 1226: 340-347. DOI: 10.1007/978-3-030-51974-2_33.
- [18] **Kosov MG, Kapitanov AV.** Method of boundary-volume finite elements for solving contact problems [In Russian]. *STIN*. 2019; 7: 5-7.
- [19] **Strakhov DE, Sakhapova AI.** Volumetric finite elements in reconstructed buildings [In Russian]. *Innovative science*. 2017; 10: 20-26.
- [20] **Konopatskiy EV.** Geometrical bases of parallel calculations in systems of computer modeling and computer-aided design [In Russian]. *Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Vision "Graphicon"*. 2022; 32: 816-825. DOI: 10.20948/graphicon-2022-816-825.
- [21] **Earnshaw R, Dill J, Kasik D.** Data Science and Visual Computing. *Advanced Information and Knowledge Processing*. 2019. DOI:10.1007/978-3-030-24367-8.
- [22] **Aung PaPaW, Choi W, Kulinan AS, Cha G, Park S.** Three-Dimensional Engine-Based Geometric Model Optimization Algorithm for BIM Visualization with Augmented Reality. *Sensors*. 2022; 22(19): 7622. DOI: 10.3390/s22197622.
- [23] **Kasik D.** Geometric visualization. *Advanced Information and Knowledge Processing*, 2019. P.59-72. DOI: 10.1007/978-3-030-24367-8_5.
-

About the authors

Evgeniy Viktorovich Konopatskiy (b. 1980) graduated from Donbas State Academy of Civil Engineering and Architecture in 2004, Ph.D. (2020). Director of the Institute of Information Technologies of NNSAGU, Head of the Department of Engineering Graphics and Information Modeling of NNSAGU. Academic Secretary of the Dissertation Council on the specialty "Engineering Geometry and Computer Graphics. Digital support of product life cycle". The list of scientific works includes more than 150 works in the field of engineering geometry and computer graphics. ORCID: 0000-0003-4798-7458; Author ID (RSCI): 681553; Author ID (Scopus): 57188826034; Researcher ID (WoS): D-3235-2019. e.v.konopatskiy@mail.ru. ✉.

Sergey Igorevich Rotkov (b. 1947) graduated from Lobachevsky Gorky State University (GSU) in 1970, Doctor of Engineering (1999). Professor of the Department of Engineering Graphics and Information Modeling, NNSAGU. Chairman of the Dissertation Council on the specialty "Engineering Geometry and Computer Graphics. Digital support of product life cycle". The list of scientific works includes more than 240 works in the field of engineering geometry, computer graphics and digital support of product life cycle. ORCID: 0000-0002-3058-2369; Author ID (RSCI): 422792; Author ID (Scopus): 55533401900. rotkov@nngasu.ru.

Marina Viktorovna Lagunova (b. 1962) graduated from the Gorky Polytechnic Institute named after A.A. Zhdanov in 1984, Doctor of Pedagogical Science (2002). Professor of the Department of Engineering Graphics and Information Modeling of NNSAGU. The list of scientific works includes more than 250 works in the field of engineering geometry and computer graphics. ORCID: 0000-0002-0671-8609; Author ID (RSCI): 364080; Author ID (Scopus): 57203126551. mvlnn@mail.ru.

Maxim Vladimirovich Bezsolnov (b. 1998) graduated from the NNSAGU in 2022. Postgraduate student of the Department of Engineering Graphics and Information Modeling of NNSAGU. Author ID (RSCI): 1240598. bezsoff@yandex.ru.

Received September 3, 2024. Revised November 29, 2024. Accepted December 10, 2024.



Концептуальный и понятийный анализы: общий подход¹

© 2025, В.С. Выхованец

Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

Аннотация

В работе предлагается разделить методологию концептуального и понятийного анализов. Различие концептуального и понятийного анализов основано на различном толковании понятия и концепта. Понятие в работе рассматривается как частное мнение, понимание чего-либо, в то время как концепт – общее понятие, абстрактная идея. Предполагается, что существует множество одноимённых понятий, имеющих разный объём и содержание. Концепт рассматривается как объективированное понятие, выработанное и закреплённое общественным опытом. Показано, что основной формой представления результатов известных методов концептуального анализа является семантическая сеть, в которой вершинами являются концепты, а дуги задают отношения между концептами. Отмечается, что для формализации понятия и концепта недостаточно классической теории множеств и семантической сети, необходимо использовать теорию структур. Концептуальный анализ определён как методика синтеза формальных описаний концептов с использованием операций построения булеана и декартиана. Перечислены проблемы, возникающие при концептуальном анализе в формализме теории структур. Появление понятийного анализа связано с требованиями обозримого, однозначного и непротиворечивого описания понятий, вызванными изменчивостью их свойств. Понятийный анализ определён как методика формального описания понятий с помощью операций обобщения и ассоциации. При обобщении происходит объединение понятий, при котором сущностями понятия-обобщения становятся сущности обобщаемых понятий. При ассоциации происходит соединение понятий, при котором каждая сущность понятия-ассоциации включает в себя по одной из сущностей ассоциируемых понятий. При понятийном анализе проблемы, возникшие при описании концептов, решаются на основе корпусного подхода – путём формирования множества различных описаний понятий. Доказано, что в основе концептуального и понятийного анализов лежит теория структур. Определены области эффективной применимости концептуального и понятийного анализов. Приведён пример использования понятийного анализа при проектировании технического устройства.

Ключевые слова: концепт, понятие, структура, концептуальный анализ, понятийный анализ.

Цитирование: Выхованец В.С. Концептуальный и понятийный анализы: общий подход. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №1(55). С.34-44. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-34-44.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Единицей смысла, используемой в онтологическом проектировании, является понятие. Понятие определяется как мыслимая совокупность схожих в некотором смысле представлений из окружающего нас внешнего или внутреннего мира². Оперирование понятиями позво-

¹ Публикуемая статья, в которой затронуты важные аспекты онтологического анализа, содержит ряд спорных и противоречивых положений в попытке её автора обосновать тезис о сосуществовании понятийного и концептуального описания предметных областей. По мнению редакции эта публикация призвана продолжить дискуссию по основам онтологического моделирования... Ждём от читателей продолжение дискуссии. *Прим. ред.*

² Следует различать реальное и формальное понятие. Под реальным понятием понимается форма мышления, выделяющая и называющая некоторое множество представлений – психических процессов, сформировавшихся в сознании человека и запомненных в виде целостных образов. В свою очередь, формальное понятие в самом простом виде изображается треугольником Фреге, где выделяют знак (имя понятия), а также объём понятия (множество принадлежащих понятию предметов, процессов, явлений) и содержание понятия (смысл понятия, заданный на каком-либо формальном языке).

ляет абстрагироваться от объёма включённых в это понятие представлений и сосредоточиться на их смысловом содержании. В случае необходимости легко осуществляется обратный мысленный переход от понятия к представлениям, этим понятием выражаемым. При этом действует правило: что истинно для понятия в целом, истинно для всех его представлений. Обратное, однако, не верно, так как представления, принадлежащие одному и тому же понятию, чем-то обязательно различаются³.

Для формализации понятия и принадлежащих ему представлений используется теория множеств. Множество, как и понятие – это совокупность различных элементов, рассматриваемых совместно по причине обладания ими некоторыми общими признаками, закреплёнными в имени множества. Один и тот же элемент может входить в разные множества, а значит иметь несколько отличительных признаков. Таким образом, множество является базовым формализмом понятия, так как предназначено для представления и оперирования совокупностями элементов различной природы.

За объективированным понятием закрепилось слово «концепт»⁴. Понятие – это представление или понимание чего-либо, сведения о чём-нибудь, знание о классе предметов, явлений, их связях и отношениях, а концепт – это понятие, лежащее в основе теоретических построений [1]. Концепт фиксирует содержательную сторону социально-значимого или научного понятия, выработанного и закреплённого общественным опытом. Понятие, лежащее в основе концепта, может иметь более богатое содержание, чем то, что выражено в концепте⁵.

От слова «концепт» получил своё название концептуальный анализ (КА), занимающийся выявлением и представлением концептов некоторой области знания⁶ – предметной области (ПрО). Основной формой представления результатов известных методов КА является семантическая сеть – ориентированный граф (орграф), вершинами которого являются понятия, а дуги задают отношения между ними. Типовая операция над семантической сетью – поиск подграфа с заданными свойствами (изоморфного графа) – *NP*-полная задача [2], что затрудняет постановку и решение задач онтологического проектирования.

Простым примером метода КА может служить метод анализа формальных понятий (англ. *Formal concept analysis*) [3]. Метод определяет способ вывода иерархии концептов (решётки концептов) из набора объектов и их признаков. Концептом называется упорядоченная пара $[O, P]$, где O – это множество объектов, а P – множество их общих признаков. Каждый концепт в иерархии описывает объекты, обладающие одними и теми же общими признаками, каждый вышележащий концепт – объекты с общими признаками нижележащих концептов, а каждый нижележащий концепт – объекты, имеющие признаки вышележащих концептов. Иными словами, вышележащий в иерархии концепт является обобщением нижележащих, а нижележащие концепты – специализацией вышележащих. Таким образом, метод

³ Различимость представлений непосредственно следует из того, что в их основе лежат психически различимые целостные образы. Так как понятие может мыслиться на основе любого одиночного представления, то для различимости одиночных понятий (представлений) вводят аппарат признаков. Предполагается, что любое представление может быть мысленно деконструировано и выражено списком характерных для него признаков, а объёмные понятия могут быть характеризованы признаками, общими для всех его представлений.

⁴ Здесь под объективированным понятием понимается формальное понятие, являющееся достоверным. Объективированные понятия формируются в процессе получения, обоснования и систематизации знаний о мире, человеке, обществе. Для этого выработаны специальные методы получения достоверного знания, использующие такие его свойства как непротиворечивость, однозначность, связность, формализуемость, выводимость, объяснимость, пополняемость, интерпретируемость, предсказательность и т.п.

⁵ Более богатое содержание понятия по сравнению с концептом связано с тем, что реальное понятие может быть субъективным и/или изменять своё содержание в зависимости от области (ситуации) его применения.

⁶ Знание – это психическое образование, направленное на адекватное отражение окружающей действительности, которое субъективно по своей природе и не может быть непосредственно изучено. Знание фиксируется в сознании человека в виде понятий, суждений, умозаключений, рассуждений, теорий. Представление знаний – это отчуждение знания от его носителя в некоторой внешней форме, а объективация знаний – признание знаний, представленных во внешней форме, объективно достоверными.

анализа формальных понятий позволяет извлекать концептуальную модель ПрО из эмпирических объектно-признаковых данных.

Более сложным примером метода КА является метод построения моделей сущность-связь (англ. *Entity-Relationship Model*) [4].

В стандартной графической нотации, с помощью которой визуализируется модель, концепты изображаются в виде прямоугольников, а отношения между концептами – в виде ромбов. Если концепты участвуют в отношении, они связаны линиями с соответствующим ромбом. Признаки концептов и отношений изображаются в виде овалов и связываются линией с соответствующим отношением или концептом. Таким образом, помимо связей обобщения, как это имеет место при формальном анализе понятий, на диаграмме сущность-связь между концептами могут задаваться связи различной природы. В итоге модель сущность-связь используется для фиксации существующих концептов, их признаков и связей в заданной ПрО.

Классической теории множеств [5] недостаточно для представления сложноустроенных концептов и оперирования ими. По этой причине в КА используется теория структур [6], математический аппарат которой позволяет представлять сложно структурированные концепты, а также выполнять над ними различные операции [7].

Появление понятийного анализа (ПА) вызвано проблемами обозримого, однозначного и непротиворечивого описания концептов, связанными с изменчивостью набора признаков у принадлежащих им элементов (экземплярам). Теории КА [8], базирующиеся на вероятностном подходе, при котором набор признаков расширяется и их появление у экземпляров концепта имеет вероятностную природу, а также теории, разделяющие признаки экземпляров концепта на типичные, присущие всем экземплярам, и атипичные, которые могут появляться лишь у некоторых экземпляров, не смогли устранить возникшие проблемы. В предельном случае утверждается, что общего понимания концептов достичь не удастся по различным социальным, политическим и иным причинам [9].

При ПА проблемы, возникшие при описании концептов, решаются на основе корпусного подхода – путём выделения в одной ПрО нескольких проблемных областей (аспектов) и формирования корпуса теорий. В этом случае предусматривается возможность нескольких описаний одного и того же понятия, в каждой проблемной области по-своему. При ПА каждое понятие образуется путём идентификации представлений, а также обобщением или ассоциацией других понятий. Предлагается отказаться от отношений между понятиями, несущими в семантической сети основную смысловую нагрузку, а использовать неименованные связи между понятиями, показывающие только способ их образования [10]. В этом случае связи становятся понятиями и отображаются как узлы орграфа.

Цель настоящей статьи – попытаться разъяснить различия между концептом и понятием, КА и ПА, а также показать использование ПА на примере.

1 Теория структур Н. Бурбаки

Представления множества как линейной последовательности различных элементов недостаточно для описания сложно устроенных концептов. Математический аппарат структур призван устранить этот недостаток классической теории множеств. Основными понятиями теории структур являются ступень, структура и род [6].

Определение 1 (ступень). Пусть $X_1, X_2, \dots, X_N$ – множества. Тогда

- каждое из множеств $X_1, X_2, \dots, X_N$ – ступень над множествами $X_1, X_2, \dots, X_N$;
- если X – ступень над множествами $X_1, X_2, \dots, X_N$, то множество всех подмножеств $B(X)$ – ступень над множествами $X_1, X_2, \dots, X_N$;
- если X и Y – ступени над множествами $X_1, X_2, \dots, X_N$, то декартово произведение $X \times Y$ – ступень над множествами $X_1, X_2, \dots, X_N$.

Ступени, образованные на фиксированном числе базисных множеств, образуют соответствующую шкалу множеств счётной мощности. Базисные множества соответствуют не-

структурированным концептам, ступени – множества концептов, обладающих некоторой структурой, а шкала – это множество всех концептов, которые могут быть образованы на заданных базисных множествах.

Определение 2 (структура). Любой элемент, принадлежащий ступени над множествами $X_1, X_2, \dots, X_N$ называется структурой, заданной на множествах $X_1, X_2, \dots, X_N$.

Пример 1. Бинарное отношение β на множестве X является структурой, так как β – подмножество ступени $X \times X$ и принадлежит ступени $B(X \times X)$.

Пример 2. Двухместная операция φ , заданная на множестве X , $\varphi: X \times X \rightarrow X$, является структурой, т.к. φ – подмножество ступени $X \times X \times X$ и принадлежит ступени $B(X \times X \times X)$. Здесь и далее символ $\rightarrow$ обозначает отображение.

Пример 3. Пусть задана метрика ρ на множестве X_1 с расстоянием на упорядоченном множестве X_2 , т.е. функция на множестве $X_1 \times X_1$ со значением на множестве X_2 . В этом случае структура ρ является подмножеством ступени $X_1 \times X_1 \times X_2$ и принадлежит ступени $B(X_1 \times X_1 \times X_2)$.

Очевидно, что все структуры различны, а каждая структура (концепт) – это линейное множество других структур (экземпляров концепта).

Интуитивно ощущаемая несущественность природы элементов, составляющих базовые множества, означает то, что, если на данных множествах задана некоторая структура и существует биекция этих множеств на другие множества, то и на других множествах может оказаться такая же структура. Это свойство структур в теории структур называется биективной переносимостью.

Определение 3 (род). Пусть задана структура σ , принадлежащая ступени S над множествами $X_1, X_2, \dots, X_N$, $\sigma \in S(X_1, X_2, \dots, X_N)$. Тогда родом структур Σ называется множество структур, переносимых из σ при всех возможных биекциях множеств $X_1, X_2, \dots, X_N$, при которых выполняются некоторые условия R , обеспечивающие сохранение структуры σ при биекциях. В этом случае σ называется родовой константой рода структур Σ , а R – аксиомами рода структур.

Род структуры – развитие понятия множества, при котором множество снабжается переносимой структурой на другие множества.

Пример 4. Для задания порядка на множестве X необходимо определить множество $\sigma \in B(X \times X)$ такое, что выполняются аксиомы транзитивности, антисимметричности и рефлексивности:

$$\forall a \in X \forall b \in X \forall c \in X ([a, b] \in \sigma \wedge [b, c] \in \sigma \Rightarrow [a, c] \in \sigma);$$

$$\forall a \in X \forall b \in X ([a, b] \in \sigma \wedge [b, a] \in \sigma \Rightarrow a = b);$$

$$\forall a \in X [a, a] \in \sigma,$$

где $\forall$ – квантор всеобщности, $\wedge$ – логическая связка И, $\Rightarrow$ – логическое следование, $=$ – отношение равенства элементов (множеств), а перечисление элементов в квадратных скобках задаёт упорядоченное множество. Тогда для рода структур с родовой константой σ необходимо потребовать, чтобы при любой биекции множества X переносились транзитивность, антисимметричность и рефлексивность.

В итоге род структур Σ с родовой константой σ и аксиомами R – это множество эквивалентных концептов $\sigma(R)$, которые используются в описании различных ПрО.

Операция $\lambda(X, X, \dots, X) \rightarrow X$ и отношение $\delta(X, X, \dots, X)$ определяются как структуры, являющиеся подмножествами декартова произведения базисного множества X : $\lambda \subseteq X \times X \times \dots \times X \times X$, $\delta \subseteq X \times X \times \dots \times X$ [11]. Благодаря использованию отношения нестрогого включения множеств $\subseteq$ в алгебраических системах реализуется булеан $B(X \times X \times \dots \times X)$, из которого извлекаются операции и отношения.

В зависимости от используемых операций и отношений алгебраическая система может стать, например, группой, решёткой, векторным пространством или моделью ПрО. В итоге алгебраические системы и роды структур оказались равномоощными в описании структурированных множеств.

Методические трудности, связанные с непосредственным использованием теории структур и алгебраических систем для формализации концептов ПрО, привели к созданию и развитию КА С.П. Никанорова.

2 Концептуальный анализ С.П. Никанорова

КА С.П. Никанорова заключается в использовании теории структур [6] для описания прикладных ПрО [7]. В отличие от других моделей ПрО, например, функционально-числовых, родоструктурные модели фиксируют структуру ПрО в виде экспликации одной или нескольких теорий, каждая из которых является множеством родов структур. Всякий род структур по определению является концептом. В КА различается несколько уровней экспликации.

Экспликация элементарных теорий. Элементарные теории строятся на двух-трёх базисных множествах и состоят из двух-трёх ступеней и определённых на них структур.

Экспликация микротеорий. Микротеоии строятся на двух-трёх синтезируемых базисных схемах. Каждая базисная схема представляет один аспект ПрО, где под базисной схемой понимается концептуальная схема ПрО, содержащая первичные (базовые, начальные) концепты ПрО. Основные шаги синтеза новой базисной схемы следующие:

- 1) выделение базисных концептов X для заданного аспекта ПрО, соответствующих множеству начальных ступеней шага синтеза, $X = X1 \cup X2 \cup \dots \cup XN$, где $\cup$ – операция объединения множеств;
- 2) построение булеана $B(X)$ и декартианов $X \times X \times \dots \times X$;
- 3) выделение из булеана множеств и из декартианов подмножеств новых структур (концептов) X , имеющих интерпретацию в ПрО;
- 4) если полученных концептов X недостаточно для описания ПрО, то переход на шаг 2.

Постулируется, что базисная схема необходима и достаточна для синтеза любых понятий ПрО. На шаге 2 из множества концептов X создаётся множество концептов-обобщений и множество концептов-ассоциаций. Однако не все синтезируемые концепты имеют место в ПрО. Поэтому на шаге 3 отбираются только те концепты, которые описывают заданную ПрО. На шаге 4 синтез завершается, если получена требуемая детализация ПрО в виде её концептуальной схемы.

Требуется изоляция (независимость) аспектов. Если базисные схемы не изолированы и в каждой из них частично описывается одно и то же, то проводится отождествление одинаковых структур базисных схем, а одноимённые, но не одинаковые структуры в различных аспектах переименовываются так, чтобы их имена различались.

Экспликация мезотеорий. Мезотеории – это теории для решения прикладных задач, которые образуются при синтезе трёх-четырёх микротеорий. Мезотеории задают предел сложности теорий, с которой можно продуктивно работать при КА.

Экспликация гипертеорий. Гипертеория – это теория, которая из-за своей сложности и масштаба не может быть построена до конца. Гипертеория строится в расчёте на то, что она позволит обнаружить семейства целевых мезотеорий и предоставит средства для выделения их гипертеории.

Результаты КА представляются в виде М-графа (рисунок 1), на котором показано образование ступеней, использованных для экспликации ПрО: булеан соединяется одной дугой с образовавшей его ступенью, а декартиан – двумя и более. Узлы помечаются именами структур, выделенных из соответствующих ступеней. Например, из рисунка 1 видно, что из декартиана $X1 \times X1$ выделена некоторая структура с именем $D1$, а из булеана $B(X2)$ – структура с именем $B1$. Описание структур выполняется отдельно. Например, структура $B1$ задаётся конкретным подмножеством $X2$, а структура $D1$ задаётся перечислением упорядоченных пар вида $[X, Y]$, где X и Y берутся из множества $X1$. Структу-

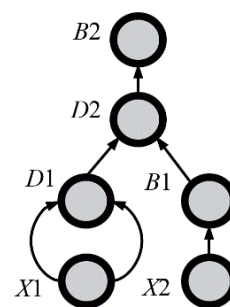


Рисунок 1 – М-граф

ра $D2$ задаётся перечислением упорядоченных пар вида $[X, Y]$, где X берётся из ступени $X1 \times X1$, а Y принадлежит ступени $B(X2)$.

С развёрнутым примером КА можно ознакомиться в главе 3 работы [12].

3 Понятийный анализ

В отличие от КА по [7], при котором синтезируются множества концептов большой мощности с последующей отбраковкой неприменимых концептов, ПА заключается в выявлении понятий ПрО и определении способов их образования.

Основным допущением ПА является различие понятия и концепта. Как и в русском языке [1], в английском языке понятие (англ. *notion*) – это мнение или понимание чего-либо; понятийный (англ. *notional*) – это гипотетический, воображаемый, а концепт (англ. *concept*) – это общее понятие, абстрактная идея [13]. Таким образом, в естественных языках присутствует различие в понимании понятия и концепта, где концепт объективен, а понятие субъективно. По этой причине существует множество понятий, имеющих одно и то же имя, но разный объём и содержание в различных проблемных областях (аспектах). Объективация понятия в заданной проблемной области осуществляется специальными методами, например голосованием экспертов [14]⁷.

При ПА понятия образуются (определяются) путём выполнения мысленных операций над другими понятиями. Выделяются три вида понятий и порождающих их операций: понятия-знаки (операция идентификации), понятия-обобщения (операция обобщения) и понятия-ассоциации (операция ассоциации). Операции идентификации, обобщения и ассоциации рассматриваются как необходимые и достаточные для мысленного выделения и превращения в понятия тех представлений и понятий, которые накоплены относительно описываемой ПрО.

Идентификация. При образовании понятия-знака происходит мысленная замена представления знаком – другим уникальным представлением, например, именем.

Пример 5. Каждый человек как личность неповторим. Однако для предприятия необходим простой метод распознавания сотрудников. С этой целью каждому сотруднику присваивается уникальный идентификатор (понятие-знак), например, табельный номер.

Обобщение. При образовании понятия-обобщения G происходит объединение обобщаемых понятий $G1, G2, \dots, GN$, при котором элементами понятия-обобщения становятся все элементы обобщаемых понятий. На одном и том же множестве понятий X может быть построено множество понятий-обобщений. Иными словами, понятие-обобщение G принадлежит ступени $B(X)$.

Пример 6. На предприятии за рабочими и инженерами может закрепляться инвентарь. Понятие Сотрудник вводится для обобщения понятий Инженер и Рабочий, которые являются обобщениями понятий конкретных инженеров и рабочих, занимающих соответствующие должности на предприятии.

Ассоциация. При образовании понятия-ассоциации A происходит соединение понятий, при котором каждый элемент понятия-ассоциации A включает в себя по одному из элементов ассоциируемых понятий $A1, A2, \dots, AN$. На одних и тех же ассоциируемых понятиях может быть построено множество понятий-ассоциаций, отличающихся объёмом входящих в них элементов. Иными словами, понятие-ассоциация A принадлежит ступени $B(A1 \times A2 \times \dots \times AN)$.

Пример 7. Понятие Перемещение, описывающее места размещения оборудования, определяется как ассоциация понятий Оборудование и Место. Объём понятия Перемещение включает те упорядоченные пары элементов понятий Оборудование и Место, которые соответствуют реальным перемещениям. Понятие Оборудова-

⁷ Каждый эксперт является экспертом в своей проблемной области, где он может решать стоящие перед ним прикладные задачи. Однако в смежных проблемных областях его знания могут быть применимы частично, условно, приближённо или неприменимы. Методы экспертного оценивания предназначены для выявления объективированных понятий в заданной проблемной области с учётом описанной ситуации.

ние является обобщением понятий единиц оборудования, имеющихся на предприятии, а понятие Место – понятий, выражающих места размещения оборудования.

С помощью выделения (идентификации), соединения (ассоциации) и объединения (обобщения) понятий ПрО могут быть конструктивно построены все мыслимые понятия [10]. Осталось эксплицировать только те понятия, которые необходимы для достижения целей ПА – выявления и определения формальных понятий, необходимых для решения некоторого класса прикладных задач.

Результатом ПА является понятийная структура, содержащая интенционалы формальных понятий (содержания понятий или множества понятий, использованных для их образования), но без детального описания экстенционалов понятий (объёмов понятий или множеств элементов, принадлежащих понятиям)⁸.

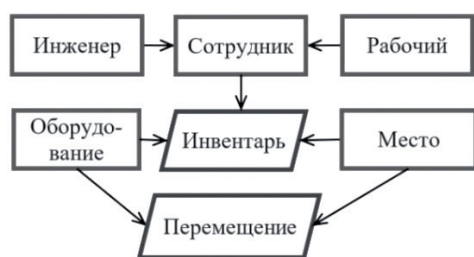


Рисунок 2 – Пример понятийной структуры

Понятийная структура представляется в виде нагруженного ориентированного графа с вершинами двух типов (см. пример на рисунке 2), в которой от обобщаемых понятий к понятиям обобщения (узлам-прямоугольникам) и от ассоциируемых понятий к понятиям-ассоциациям (узлам-параллелограммам) проводятся дуги, показывающие образование этих понятий, а узлы помечены именами понятий с указанием аспектов, если таковые имеются.

В понятийной структуре на рисунке 2 определены понятие-обобщение Сотрудник и понятия-ассоциации Инвентарь и Перемещение. Остальные понятия не определены, но могут быть раскрыты как обобщения понятий-знаков конкретных инженеров, рабочих, оборудования и мест его размещения.

В понятийном мышлении недопустимы понятия, которые прямо или косвенно определяются через самих себя, а также не имеющие принадлежащих им представлений. Поэтому при построении понятийной структуры ПрО требуется, чтобы определяемые понятия не были пустыми, а также отсутствовали понятийные циклы. При ПА не пустота понятий гарантируется тем, что такие понятия не могут мыслиться, а отсутствие понятийных циклов проверяется отсутствием циклов в понятийной структуре. Необходимым требованием к понятийной структуре является также объективированное описание каждой проблемной области, позволяющее ставить и решать прикладные задачи.

4 Прикладной пример

Характерным примером применения ПА при проектировании технических устройств может служить решение задачи управления конфигурациями изделий (аспект конфигурации). Основными недостатками известных конфигураторов является возникновение при их использовании следующих проблем:

- учёт сложных ограничений, связанных с недопустимостью совместного использования комплектующих изделий, материалов и программ;
- расчёт характеристик конфигурируемого изделия и его составляющих;
- поиск мест возникновения ошибок конфигурации, связанных с неправильным или неполным выбором комплектующих изделий, а также заданием их потребительских свойств;

⁸ Для превращения понятийной структуры в понятийную модель необходимо задать экстенционалы понятий. Для описания экстенционалов используется или перечисление элементов, или разрешающая процедура, позволяющая распознать элементы, принадлежащие понятию. В [10] показано, что для понятийных моделей разрешающая процедура выражается на языке исчисления одноместных предикатов, что делает понятийные модели разрешимыми и непротиворечивыми в счётных ПрО и полными – в конечных, где мощность модели определяется мощностью множества используемых понятий-знаков.

- создание конфигурационной модели изделия, приводящей к необходимости разработки индивидуальных компьютерных программ для каждого изделия или продукта.

Конфигурационная структура изделия строится на основе ПА, при котором:

- понятиями-знаками обозначаются изделия, которые с точки зрения процесса конфигурации являются неделимыми (не конфигурируемыми);
- понятие-обобщение объединяет множество допустимых исполнений изделия в одно итоговое изделие, конфигурируемое путём выбора одного из возможных исполнений;
- понятие-ассоциация выражает соединение множества изделий в одно сборочное изделие, все составные части которого обязательны.

На рисунке 3 показана иерархия изделий, образующих вычислительное устройство – сервер, который является понятием-ассоциацией Сервер (символ ассоциации – знак &) и соединяет в себе Корпус, Плату материнскую, Процессор, Вентилятор, Память оперативную и т.д. Понятие-обобщение Вентилятор (символ обобщения – знак V) определено как объединение двух исполнений: понятия-знака Вентилятор 1U и понятия-знака Вентилятор 2U. Другие изделия, входящие в состав сервера, на рисунке не раскрыты.

Таким образом, при конфигурировании понятийная структура выражает структуру конфигурируемого изделия, а описание входящих в неё понятий задаётся перечислением состава изделий – в виде понятий-ассоциаций, а их исполнений – в виде понятий-обобщений.

К конфигурационным понятиям изделия могут привязываться логические высказывания и вычисляемые выражения. Логические высказывания задают ограничения, препятствующие произвольному выбору составляющих изделий при конфигурировании, а вычисляемые выражения – признаки (характеристики) как изделия в целом, так и его составляющих. На рисунке 3 вычисляемые признаки понятия Сервер отображены в правой панели формы. Это электрическая мощность сервера, суммарный объём оперативной памяти, число процессоров и т.д. Логические высказывания, выражающие ограничения, задаются на форме ввода конфигураций и на рисунке 3 не показаны. Для описания множеств элементов, принадлежащих понятиям, используются как их перечисление (как это сделано выше для вентиляторов), так и логические высказывания с односторонними предикатами, задающими принадлежность элемента понятию. Для унификации выражений и устранения неоднозначностей в именовании понятий вместо имён понятий используются номера их узлов (поле Узел на рисунке 3).

Спецификация изделия осуществляется путём установки или сброса флагов выбора исполнения, входящего в состав некоторого понятия-обобщения. При изменении флага выбора, размещённого в неименованном поле на рисунке 3 в левую часть формы, запускается индуктивная процедура изменения флагов вложенных элементов и обновляются свойства изменённых элементов. Если при спецификации нарушаются ограничения, задаваемые логиче-

Наименование	Узел	Свойство	Значение	Примечания
Сервер	13	Мощность	500	Вт
Корпус	98	Память	64	ГБ
Плата материнская	161	Процессор	2	шт.
Плата системная	210	Диски	3 840	ГБ
Процессор	27			
Вентилятор	34			
Вентилятор 2U	104			
Вентилятор 1U	112			
Память оперативная	30			
Контроллер загрузки	36			
Контроллер дисков	37			
Диск информационный	38			
Плата расширения	39			

Рисунок 3 – Форма спецификации изделия [15]

скими высказываниями, то ошибочные элементы выделяются и выводятся сообщения об ошибке, а также логическая формула, которая не выполнялась (см. всплывающую надпись на рисунке 3).

Заключение

Результатом визуализации большинства известных методов анализа ПрО является семантическая сеть, в которой задаются концепты, выделенные в ПрО, и связи между концептами, несущие основную семантическую нагрузку сети. Концепты могут иметь сложную внутреннюю структуру, которую трудно выразить семантической сетью. По этой причине математическим аппаратом КА может стать теория структур, а его основным методом – синтез структурированных множеств, выражающих концепты ПрО.

Значимым результатом в этом направлении стал концептуальный синтез по С.П. Никанорову, область применения которого – слабоструктурированные ПрО, богатые эмпирическими знаниями, но не имеющие развитой или завершённой теории.

Известные методологии КА предполагают выявление и формализацию объективированных понятий – концептов. Имеются примеры ПрО, для которых невозможно получить полное описание в виде единой теории (одной концептуальной схемы).

Проблемы, возникающие при КА, привели к появлению ПА. Отличием ПА от других методологий является представление связей между понятиями в виде отдельных самостоятельных понятий, обладающих структурой и которые можно использовать для образования других понятий.

Таким образом, при ПА строится многоаспектная теория ПрО (корпус взаимосвязанных теорий). Для каждой теории из корпуса требуется её внутренняя непротиворечивость (как и при КА), однако для всех взаимосвязанных теорий взаимной непротиворечивости не требуется. Это связано с тем, что один и тот же элемент может принадлежать понятию в одном аспекте, а в другом аспекте ему не принадлежать. Следует отметить наличие перекрёстных связей между проблемными областями, выраженное в том, что для образования понятий в одной проблемной области могут использоваться понятия из других проблемных областей, в том числе и одноимённые.

Область применения ПА – многоаспектные хорошо структурированные ПрО, которые богаты разноплановыми эмпирическими и теоретическими знаниями.

В качестве прикладного примера применения ПА рассмотрено управление конфигурацией, позволяющее учесть ограничения, связанные с несовместимостью составляющих изделий, отобразить места возникновения ошибок конфигурации, выполнить расчёт характеристик конфигурируемого изделия или его частей.

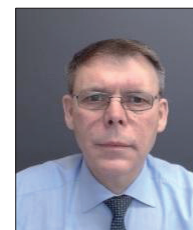
Список источников

- [1] Русский семантический словарь. Толковый словарь, систематизированный по классам слов и значений / РАН. Ин-т рус. яз.; Под общей ред. Н.Ю. Шведовой. Том 3. М.: Азбуковник, 2003. 720 с.
- [2] *Chein M., Mugnier M.-L.* Graph-based Knowledge Representation: Computational Foundations of Conceptual Graphs. Springer, 2009. 425 p.
- [3] *Ganter B., Wille R.* Formal Concept Analysis: Mathematical Foundations. Berlin: Springer-Verlag, 1998.
- [4] *Chen P.* Entity-Relationship Modeling: Historical Events, Future Trends, and Lessons Learned. Software pioneers. Springer-Verlag. P.296–310.
- [5] *Куратовский К., Мостовский А.* Теория множеств. М.: Мир, 1970. 416 с.
- [6] *Бурбаки Н.* Теория множеств: Пер. с фр. М.: Мир, 1965. 459 с.
- [7] *Никаноров С.П.* Концептуализация предметных областей. М.: Концепт, 2009. 268 с.
- [8] *Olive A.* Conceptual Modeling of Information Systems. New York: Springer, 2007. 471 p.

- [9] **Рассел С., Норвиг П.** Искусственный интеллект: современный подход. Том 1. Решения проблем: знания и рассуждения: Пер. с англ. СПб.: ООО «Диалектика», 2021. 704 с.
- [10] **Выхованец В. С.** Понятийный анализ и понятийное моделирование. *Управление большими системами*. 2021. Вып. 92. С.64-109. DOI:10.25728/ubs.2021.92.4.
- [11] **Мальцев А.И.** Алгебраические системы. М.: Наука, 1970. 392 с.
- [12] **Никаноров С.П., Никитина Н.К., Теслинов А.Г.** Введение в концептуальное проектирование АСУ: Анализ и синтез структур. М.: РВШ, 1995. 240 с.
- [13] The Oxford Dictionary of Current English / Ed. D. Thompson. New York: Oxford University Press, 1999. 996 p.
- [14] **Орлов А.И.** Организационно-экономическое моделирование: Ч. 2 Экспертные оценки. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 486 с.
- [15] **Выхованец В.С.** Управление конфигурацией продукции. *Автоматизация. Современные технологии*. 2024. Т. 78. № 7. С. 317-321. DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-7-317-321.

Сведения об авторе

Выхованец Валерий Святославович, 1961 г. рождения. Окончил Харьковское высшее военное командно-инженерное училище им. Маршала Советского Союза Н.И. Крылова в 1983 г., д.т.н. (2008). В списке научных трудов более 100 работ в области многозначной логики, теории и технологии программирования, управления бизнес-процессами, понятийного моделирования, представления и обработки знаний. Author ID (РИНЦ): 292151; Author ID (Scopus): 6602541270; Researcher ID (WoS): J-4690-2013, ORCID: 0000-0001-8269-6520. valery@vykhovanets.ru.



Поступила в редакцию 03.10.2024, после рецензирования 13.01.2025. Принята к публикации 17.01.2025.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-34-44

Conceptual and notional analysis: a general approach

© 2025, V.S. Vykhoanets

Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

Abstract

The paper suggests distinguishing between the methodologies of conceptual analysis and notional analysis. The difference lies in how the notion and concept are interpreted. In the paper, a notion is viewed as an individual opinion or understanding of something, whereas a concept represents a general notion or abstract idea. It is assumed that many similar concepts exist with varying scopes and contents. A concept is treated as an objectified notion developed and solidified through social experience. The primary representation of the results of established conceptual analysis methods is shown to be a semantic network, where the vertices are concepts and the arcs represent relationships between them. However, it is noted that classical set theory and semantic networks are insufficient to formalize notions and concepts; instead, the theory of structures must be employed. Conceptual analysis is described as a technique for synthesizing formal concept descriptions using Boolean and Cartesian construction operations. The challenges of applying conceptual analysis within the framework of the theory of structures are outlined. The development of notional analysis is linked to the demand for precise, unambiguous, and consistent notion descriptions, driven by the variability of their properties. Notional analysis is defined as a method for formal normal descriptions using generalization and association operations. Generalization entails combining notions such that the entities of the generalized notions become entities of the resulting notion. Association involves merging notions, with each entity of the resulting notion including one entity from each of the associated notions. Notional analysis addresses issues encountered when describing concepts using a corpus-based approach by generating diverse descriptions of notions. It is demonstrated that both conceptual and notional

analyses are rooted in the theory of structures. The paper identifies areas where these analyses are effectively applied and provides an example of using notional analysis in the design of a technical device.

Keywords: *concept, notion, structure, conceptual analysis, notional analysis.*

For citation: *Vykhovanets VS.* Conceptual and notional analysis: a general approach [In Russian]. *Ontology of designing.* 2025; 15(1): 34-44. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-1-34-44.

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

List of figures

Figure 1 - M-graph

Figure 2 - Notional structure

Figure 3 - Product specification form

References

- [1] Russian semantic dictionary. Explanatory dictionary, systematized by classes of words and meanings [In Russian]. RAS. Russian Language Institute; Ed. N.Y. Shvedova. Vol. 3. Moscow: Azbukovnik, 2003. 720 p.
- [2] **Chein M, Mugnier M.-L.** Graph-based knowledge representation: Computational foundations of conceptual graphs. Springer, 2009. 425 p.
- [3] **Ganter B, Wille R.** Formal concept analysis: Mathematical foundations. Berlin: Springer-Verlag, 1998.
- [4] **Chen P.** Entity-Relationship modeling: Historical events, future trends, and lessons learned. Software pioneers. Springer-Verlag. P. 296–310.
- [5] **Kuratowski K, Mostowski F.** Set theory. Warszawa: Polish Scientific Publishers, 1967. 416 p.
- [6] **Bourbaki N.** Theorie des ensembles [In French]. Hermann, 1960. 459 p.
- [7] **Nikanorov SP.** Conceptualization of subject domains [In Russian]. Moscow: Concept, 2009. 268 p.
- [8] **Olive A.** Conceptual modeling of information systems. New York: Springer, 2007. 471 p.
- [9] **Russel S, Norvig P.** Artificial intelligence: A modern approach. Fourth edition. Pearson, 2022. 1167 p.
- [10] **Vykhovanets V. S.** The notional analysis and notional modeling [In Russian]. *Upravlenie bolshimi sistemami.* 2021; 92: 64-109. DOI: 10.25728/ubs.2021.92.4.
- [11] **Maltsev AI.** Algebraic systems [In Russian]. Moscow: Nauka, 1970. 392 p.
- [12] **Nikanorov SP, Nikitina NK, Teslinov AG.** Introduction to the conceptual design of automated control systems: Analysis and synthesis of structures [In Russian]. Moscow: RVSN, 1995. 240 p.
- [13] The Oxford dictionary of current English / Ed. D. Thompson. New York: Oxford university press, 1999. 996 p.
- [14] **Orlov AI.** Organizational and economic modeling: Part 2. Expert assessments [In Russian]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2011. 486 p.
- [15] **Vykhovanets VS.** Product configuration management [In Russian]. *Avtomatizatsiya. Sovremennoe sostoyanie.* 2024; 78(7): 317-321. DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-7-317-321.

About the author

Valeriy Sviatoslavovich Vykhovanets (b. 1961) graduated from Kharkov Higher Military Command and Engineering College (Kharkov, USSR) in 1978, Dr. Sc. (2008). He is the author of about 100 scientific articles in the field of multi-valued logic, theory and technology of programming, business process management, conceptual modeling, knowledge representation and processing. Author ID (RSCI): 292151; Author ID (Scopus): 6602541270; Researcher ID (WoS): J-4690-2013, ORCID: 0000-0001-8269-6520. valery@vykhovanets.ru.

Received October 3, 2024. Revised January 13, 2025. Accepted January 17, 2025.

ПРИКЛАДНЫЕ ОНТОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 004.89

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-45-54



Построение графа знаний по телекоммуникационным данным

© 2025, А.А. Головин¹✉, Н.А. Жукова^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В работе описывается метод построения графа знаний по телекоммуникационным данным на основе проприетарных и эталонных моделей, используемых в области телекоммуникаций. В качестве эталонных рассматриваются модели, входящие в фреймворк, разработанный консорциумом *TM Forum*. Граф знаний проприетарных моделей предлагается строить с помощью автоматизированной обработки лог-файлов автотестов и таблиц БД биллинговой системы. Актуальность применения графов знаний обусловлена их структурированностью и семантической, а также возможностью последующего применения алгоритмов машинного обучения для генерации рекомендаций по оптимизации телекоммуникационных процессов и систем. Предложено применение метода на основе подхода многошагового рассуждения для создания интерпретируемых рекомендаций по восстановлению отсутствующих связей, путём их прогнозирования в проприетарном графе знаний. Предложенный метод рассматривает многошаговое рассуждение как задачу ответа на вопрос с использованием обработки естественного языка. Применение разработанного решения на основе нейросетевой архитектуры трансформера обеспечило интерпретируемые результаты с сохранением значений метрик, по сравнению с аналогами.

Ключевые слова: граф знаний, телекоммуникации, лог-файлы, восстановление структуры, многошаговое рассуждение.

Цитирование: Головин А.А., Жукова Н.А. Построение графа знаний по телекоммуникационным данным. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №1(55). С.45-54. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-1-45-54.

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке гранта, бюджетная тема №FFZF-2022-0006.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Термин граф знаний (ГЗ) определяется как база знаний, состоящая из сущностей и связей между ними. ГЗ широко используются в обработке естественного языка, вопросно-ответных системах, рекомендательных системах и т.д. [1]. ГЗ содержат структурированные данные о сущностях и связях между ними, представленные в формате триплета (h, r, t) , где h — головная сущность, r — отношение, t — хвостовая сущность. ГЗ востребованы в различных областях, включая и телекоммуникации [2], где они используются для описания сетевых устройств, сервисов, бизнес-процессов и других сущностей, связанных с телекоммуникационной инфраструктурой [3]. Актуальность применения ГЗ в этой области обусловлена несколькими факторами [4]:

- рост объёма и сложности телекоммуникационных данных, которые требуют эффективного управления, интеграции и обработки.
- необходимость повышения качества и надёжности телекоммуникационных сервисов, а также удовлетворения индивидуальных потребностей клиентов.
- появление новых технологий и стандартов в телекоммуникационной отрасли, которые создают новые возможности для телекоммуникационных операторов.

ГЗ могут помочь в решении различных задач в телекоммуникационной области за счёт использования следующих преимуществ [5]:

- данные в ГЗ являются структурированными и семантическими, что позволяет извлекать, связывать и анализировать информацию из разных источников и в разных форматах;
- для ГЗ возможно применение логического вывода и машинного обучения, что позволяет автоматизировать и оптимизировать процессы принятия решений, обнаружения аномалий, предсказания поведения и др.

Одним из источников данных в области телекоммуникаций являются лог-файлы биллинговых систем. При построении ГЗ на основе данных лог-файлов, в связи с их слабой структурированностью, формируемый граф часто имеет неполную структуру, в которой отсутствует нужная информация. Таким образом, разработка метода эффективного построения ГЗ по телекоммуникационным лог-файлам является перспективной областью исследований.

Целью данной работы является разработка метода построения ГЗ по телекоммуникационным данным по лог-файлам биллинговой системы, а также исследование возможности применения метода на основе подхода многошагового рассуждения для генерации интерпретируемых рекомендаций по восстановлению отсутствующих связей в ГЗ.

1 Наборы данных

В ГЗ содержатся данные о сетевых устройствах и информационных системах, функционирующих в телекоммуникационной сети (ТС), и данные, содержащие информацию о бизнес-процессах компаний. ГЗ, используемые в телекоммуникационных системах, включают бизнес-процессные, информационные, функциональные и компонентные модели, а также статистические и оперативные данные о сетях. Данные, представленные в форме ГЗ в сфере телекоммуникаций, могут использоваться для различных целей, таких как анализ, моделирование, оптимизация и управление ТС.

В работах [6, 7] рассматривается телекоммуникационный ГЗ, построенный по данным оператора кабельного телевидения. При построении ГЗ использовались данные о пользователях, сетевых устройствах и услугах оператора. Построение ГЗ позволило провести анализ поведения клиентов кабельного оператора. Важным требованием была возможность обработки большого объёма данных [7].

В [8] представлен ГЗ, построенный на основе стандартизированных для области телекоммуникаций моделей, разработкой и поддержкой которых занимается консорциум *TM Forum*, специализирующийся на стандартизации и управлении телекоммуникационными и цифровыми сервисами. *TM Forum* предоставляет фреймворк (*TM Framework, TMFF*), включающий в себя бизнес-процессную (*Enhanced Telecom Operations Map, eTOM*), информационную (*Shared Information and Data Model, SID*), функциональную модели (*Functional model*) и модель приложений (*Telecom Application Map, TAM*). Модель *TMFF* и связи между её элементами на примере задачи заказа услуг показаны на рисунке 1.

При построении ГЗ ТС операторов, как правило, используются многие источники, которые предоставляют информацию о ТС — это лог-файлы, различные текстовые описания, включая пользовательскую документацию, документацию программного кода и т.д. Объёмы

таких данных достаточно большие, в частности, в [7] при построении проприетарных ГЗ (ПГЗ, закрытый граф, разработанный для решения задач конкретной сферы или предприятия) использовались лог-файлы сетевых устройств, в которые могло быть записано более миллиона сообщений в день. Однако, эти данные часто являются неполными, что приводит к нарушению полноты структуры формируемого ГЗ.

ГЗ на основе *TMFF* может использоваться как эталонная модель, с которой сопоставляются модели, построенные по реальным данным телекоммуникационных компаний. При формировании рекомендаций по восстановлению структуры предлагается применять подход на основе многошагового рассуждения, который обеспечит интерпретируемые прогнозы. Эталонная модель *TMFF* при этом используется в качестве обучающего и валидационного набора данных.

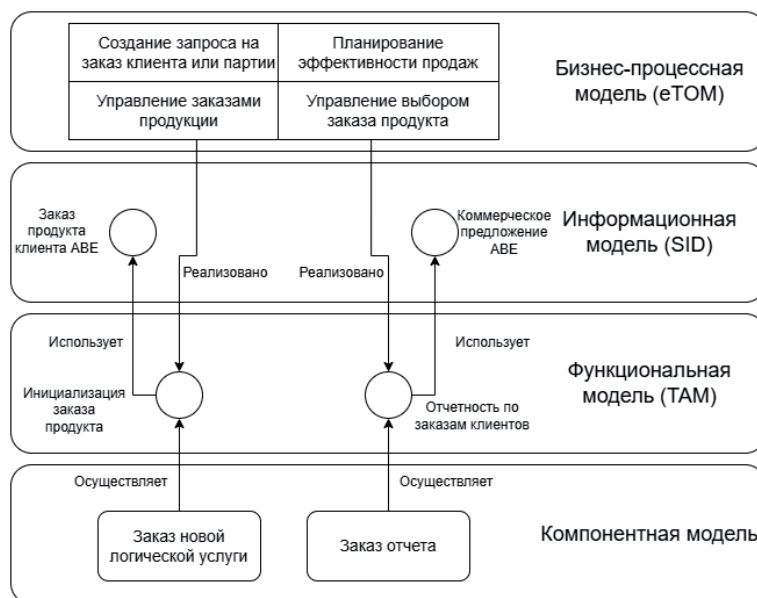


Рисунок 1 – Модель *TMFF* и зависимости между её элементами

2 Метод решения

Предлагаемый метод предусматривает построение ГЗ, содержащего данные о ТС и реализуемых в них процессах, на основе имеющихся о сетях данных, получаемых из различных источников, а также восстановление структуры графа с использованием многошагового рассуждения и ГЗ, построенного на основе эталонных моделей *TM Forum*.

2.1 Построение ГЗ по телекоммуникационным данным

Эталонный ГЗ был построен на основе модели *TMFF*, включающей в себя модели *eTOM*, *SID*, *TAM* и компонентную модели. С использованием этих моделей были сгенерированы файлы *CSV* и выполнен маппинг ГЗ в формате *JSON* для СУБД *Neo4j*. Данный ГЗ экспортирован и помещён в открытый доступ на платформе *GitHub* [8].

ПГЗ построен по телекоммуникационным данным, полученным из биллинговой системы. В состав ГЗ были включены данные об информационных объектах (для формирования информационной составляющей ГЗ), данные из спецификаций программного кода (для формирования бизнес-процессной и функциональной составляющих ГЗ) и данные об автотестах (для формирования компонентной составляющей ГЗ).

Данные об информационных объектах получены с помощью реляционной базы данных (БД) в результате разбора документации, который позволил выявить связи между элементами данных из БД и компонентами биллинговой системы.

По данным, хранящимся в БД, построена проприетарная онтология, которая в дальнейшем интегрирована в единый ПГЗ. Для преобразования данных из БД в онтологию использовался редактор онтологий *Protégé*, в частности функция импорта *R2RML*. Для создания файлов маппинга сущностей БД использовались следующие классы: имя БД (*Database name*), имена таблиц (*Table names*), имена столбцов (*Column names*) и имена ключей (*Key names*). Иерархия классов онтологии представлена на рисунке 2.

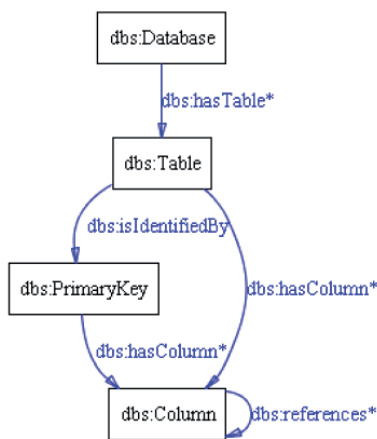


Рисунок 2 – Иерархия классов
проприетарной онтологии

Для построения компонентной модели, включаемой в состав ПГЗ, использовались лог-файлы, полученные в результате выполнения автотестов. Были проанализированы лог-файлы и сформированы CSV файлы, содержащие информацию об иерархии компонентов биллинговой системы. Информация о бизнес-процессах и функциях была получена путём автоматической обработки исходного кода. На основе этой информации был построен ПГЗ с использованием СУБД *Neo4j*.

Связи между элементами функциональной и информационной моделей в ПГЗ показаны на рисунке 3.

Примеры связанных сущностей, соответствующих функциям «Извлечение данных баланса» из проприетарной функциональной модели и «Централизованное управление правилами заказа» из эталонной функциональной модели, а также элементы из связанных с ними сущностей информационной модели показаны на рисунках 4 и 5.

На рисунке 6 отображены связи между сущностью «Заказы логических услуг», соответствующей проприетарной информационной модели, и сущностями, соответствующими *SID*.



Рисунок 3 – Фрагмент графа знаний, показывающий
связи между элементами функциональной
и информационной моделей



Рисунок 4 – Пример связанных сущностей, соответствующих функции «Извлечение данных баланса» из проприетарной функциональной модели

2.2 Восстановление структуры ГЗ

Дальнейшим этапом является восстановление структуры полученного ПГЗ. Восстановление структуры ГЗ – это задача прогнозирования недостающих связей или фактов в ГЗ [9], необходимость решения которой обуславливается тем, что значительная часть создаваемых ПГЗ является неполными и зашумленными, что ограничивает их полезность и надёжность [10]. Для восстановления структуры ГЗ предлагается использовать методы, способные вывести новые факты из существующих и заполнять пробелы в ГЗ, в частности, метод многошагового рассуждения.



Рисунок 5 – Пример связанных сущностей, соответствующих функции «Централизованное управление правилами заказа» из эталонной функциональной модели



Рисунок 6 – Фрагмент графа знаний с связанными сущностями, соответствующими информационным моделям эталонного и проприетарного графов знаний

2.2.1 Многошаговое рассуждение

Многошаговое рассуждение – это подход, позволяющий предсказывать новые связи для неполных ГЗ, который заключается в поиске и комбинировании нескольких логических шагов, связывающих сущности и отношения [11]. При многошаговом рассуждении вместо того, чтобы предсказывать хвостовую сущность t для данного триплета запроса (h, r) , обеспечивается предоставление доказательного пути от h до t , который демонстрирует процесс вывода [12].

Многошаговое рассуждение помогает восстановить отсутствующие элементы ГЗ, используя косвенные связи и выполняя интерпретируемые логические выводы на основе доступных данных, что особенно актуально для телекоммуникационных ГЗ, построенных по лог-файлам и другим данным телекоммуникационных операторов, которые имеют неполную структуру [7]. Интерпретируемость полученных результатов позволяет обосновывать прогнозы и принимать взвешенные решения, что важно при решении прикладных задач.

Применение подхода многошагового рассуждения для ПГЗ в связке с эталонным ГЗ, построенным по модели *TM Forum*, позволяет предоставить рекомендации по восстановлению структуры ГЗ телекоммуникационного оператора. Для этого модель на основе многошагового рассуждения обучается на эталонном ГЗ. Рекомендации формируются за счёт предсказания недостающих связей в ПГЗ.

Многошаговое рассуждение может быть реализовано с помощью различных методов, которые предполагают использование моделей, основанных на обучении с подкреплением [13, 14], нейросетевой архитектуре трансформера и других [15].

2.2.2 Предложенное решение

Предлагаемый метод основан на многошаговом рассуждении, которое использует архитектуру трансформера кодер-декодер для преобразования запроса в доказательный путь («sequence-to-sequence»).

Использование такой архитектуры обеспечивает существенные преимущества [16]:

- метод не полагается на существующие связи для создания доказательного пути и обладает гибкостью для восстановления отсутствующих связей (особенно эффективно при работе с разреженными ГЗ);
- доказательные пути, генерируемые предлагаемым методом, обеспечивают интерпретируемость результатов.

Разработанный метод рассматривает многошаговое рассуждение как задачу преобразования последовательностей из одного домена последовательности в другой. Запрос является исходной последовательностью, а доказательный путь — целевой. Кодер-трансформер отображает запрос и предыдущую последовательность путей в контекстуализированное представление, и это представление затем используется для авторегрессионного декодирования выходного пути, токен за токеном.

Идея предлагаемого метода состоит в том, чтобы свести задачу многошагового рассуждения к задаче ответа на вопрос с использованием обработки естественного языка. Различные сущности и отношения интерпретируются как разные слова, контекстуальные вложения которых обучаются на графе.

Процесс обучения предлагаемого метода:

$$q = (h, r), \quad \tau = (r_1, t_1, \dots, r_n, t, [\text{eos}]), \quad (1)$$

где $[\text{eos}]$ — конец токена последовательности, q и τ обозначают запрос и путь.

Разложение вероятности:

$$p(\tau|q) = \prod_{k=1}^{|\tau|} p(\tau_k|q, \tau_{<k}), \quad (2)$$

где τ_k обозначает k -й токен выходного пути, а $|\tau|$ — количество токенов в пути.

Обучается матрица встраивания токенов $E \in \mathbb{R}^{V \times d}$, где d — размерность векторного представления. Размер словаря равен $V = |\mathcal{E}| + |\mathcal{R}| + |\mathcal{S}|$, поскольку словарь токенов включает в себя набор сущностей $\mathcal{E}$, набор отношений $\mathcal{R}$ и набор специальных токенов $\mathcal{S}$. При декодировании τ_k маска позволяет кодировщику обрабатывать только токены запроса (h, r) и предыдущие токены $\tau_{<k}$ в выходном пути, предотвращая раскрытие будущей информации.

Далее метод вычисляет распределение вероятностей для k -го токена как:

$$p(\cdot | q, \tau_{<k}) = \text{Softmax}(\text{MLP}(\text{Enc}(h, r, \tau_{<k})) \cdot E), \quad (3)$$

где $\text{MLP}()$ — многослойный перцептрон, $\text{Enc}()$ — кодировщик (*Transformer Encoder*) предлагаемого «*sequence-to-sequence*» метода (рисунок 7).

В процессе обучения метод выбирает конкретный путь для каждого триплета $(h, r, t) \in T$ из всех возможных путей между h и t с максимальной длиной $N = 3$. Значение N было выбрано на основе наблюдения, что большинство пар сущностей в наборах данных ГЗ связаны максимум за 3 шага. Этот выбор также обеспечивает корректное сравнение с аналогами, которые также ограничивают максимальную длину пути до 3 [15]. В качестве функции потерь используется перекрёстная энтропия с дополнительным сглаживанием меток.

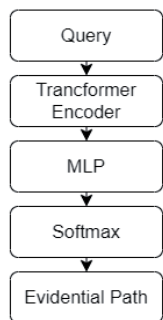


Рисунок 7 – *Sequence-to-sequence* метод

3 Исследование свойств решения

В ходе эксперимента построены эталонный ГЗ и ПГЗ. Параметры построенных ГЗ приведены в таблице 1.

Для оценки качества предлагаемого метода на основе многошагового рассуждения рассчитаны следующие метрики: средний обратный ранг (*MRR*) и количество попаданий в N . *MRR* — это показатель, используемый для оценки эффективности системы ранжирования в задачах поиска информации и рекомендаций [17]. Он измеряет среднее качество ранжиро-

ванных результатов, учитывая ранговую позицию первого релевантного элемента. MRR рассчитывается путём взятия обратной величины ранга первого релевантного элемента и последующего усреднения этих обратных рангов по всем запросам:

$$MRR = \frac{1}{|Q|} \sum_{q=1}^{|Q|} \frac{1}{rank_q}, \quad (4)$$

где $|Q|$ — общее количество запросов, а $rank_q$ — позиция наиболее релевантного для запроса элемента в первых N результатах.

Количество попаданий в N ($H@N$) — метрика оценки, используемая в системах информационного поиска и рекомендаций [18]. Она измеряет долю запросов, по которым хотя бы один релевантный элемент появляется в первых N результатах:

$$H@N = \frac{|\{q \in Q \mid rank_q \leq N\}|}{|Q|}. \quad (5)$$

В таблице 2 представлены метрики, рассчитанные на построенном эталонном ГЗ для существующих решений и предлагаемого метода.

Таким образом, разработанный метод практически достигает тех же результатов, что и методы, основанные на векторных представлениях. Результаты метрик предложенного метода «*sequence-to-sequence*» превысили результаты метода *KG-BERT*. При этом использование предложенного метода обеспечило интерпретируемость, в то время как результаты, получаемые с использованием других методов, интерпретируемыми не являются.

Таблица 2 – Результаты прогнозирования отношений на эталонном графе знаний

Метод	MRR	H@1	H@3	H@10
TransE	0,426	0,321	0,471	0,633
ConvE	0,437	0,343	0,432	0,627
RotatE	0,423	0,314	0,473	0,626
TuckER	0,452	0,358	0,494	0,635
ConE	0,448	0,342	0,492	0,641
KG-BERT	–	0,041	0,301	0,422
Seq-to-seq	0,439	0,324	0,462	0,619

Заключение

В результате проведённого исследования построены эталонные ГЗ и ПГЗ. Для создания эталонного ГЗ применялись модели ТМ *Forum*, а ПГЗ строился за счёт автоматизированной обработки лог-файлов автотестов и таблиц БД биллинговой системы.

Разработанный на основе многошагового рассуждения «*sequence-to-sequence*» метод для восстановления структуры ГЗ рассматривает триплет запроса и доказательный путь как последовательности и использует архитектуру трансформера. Предложенный метод имеет хорошую сходимость и возможность интерпретации результата.

Авторский вклад

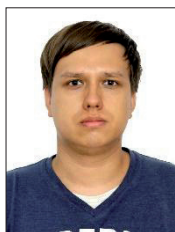
Головин А.А. построил ГЗ, провел исследование, участвовал в написании рукописи. Жукова Н.А. спланировала исследование и структуру ГЗ, участвовала в написании рукописи.

Список источников

- [1] Li J., Hou L. Review of knowledge graph research. *Natural Sci. Ed.* 2017. Vol.40(3). P.454-459. DOI: 10.13451/j.cnki.shanxi.univ(nat.sci.).2017.03.008.
- [2] Mier F.J.Z. Applications of Knowledge Graphs in Telecommunication Systems Management. *IEEE Internet Computing*. 2023. Vol.27(3). P.29-34. DOI: 10.1109/MIC.2023.3253305.

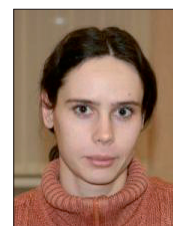
- [3] **Krinkin K., Kulikov I., Vodyaho A., Zhukova N.** Architecture of a Telecommunications Network Monitoring System Based on a Knowledge Graph. 26th *Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*. 2020. P.231-239. DOI: 10.23919/FRUCT48808.2020.9087429.
- [4] **Lei T., Wang Y.** Telecom Operator Knowledge Graphs Reasoning for Question Answering // 2021 International Conference on Computer Information Science and Artificial Intelligence (CISAI). 2021. P.981-984. DOI: 10.1109/CISAI54367.2021.00196.
- [5] **Zou X.** A Survey on Application of Knowledge Graph // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol.1487. DOI: 10.1088/1742-6596/1487/1/012016.
- [6] **Krinkin K., Vodyaho A., Kulikov I., Zhukova N.** Models of Telecommunications Network Monitoring Based on Knowledge Graphs. 9th *Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*. 2020. P. 1-7. DOI: 10.1109/MECO49872.2020.9134148.
- [7] **Zhukova N., Kulikov I., Utkin N.** The Method for Searching Patterns In Log Files of Telecommunication Devices for Monitoring their State. 2021 XXIV *International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*. 2021. P. 124-126. DOI: 10.1109/SCM52931.2021.9507157.
- [8] TMF Business Process Framework Dataset for Neo4j. <https://github.com/A1gord/TMF-Business-Process-Framework-Dataset-for-Neo4j>.
- [9] **Chen Z., Wang Y., Zhao B., Cheng J., Zhao X., Duan Z.** Knowledge Graph Completion: A Review. *IEEE Access*. 2020. Vol.8. P.192435-192456. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3030076.
- [10] **Issa S., Adekunle O., Hamdi F., Cherfi S. S. -S., Dumontier M., Zaveri A.** Knowledge Graph Completeness: A Systematic Literature Review. *IEEE Access*. 2021. Vol.9. P.31322–31339. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3056622.
- [11] **Wan G., Du B.** Gaussian Path: A Bayesian Multi-Hop Reasoning Framework for Knowledge Graph Reasoning. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2021. Vol.35(5). P.4393-4401. DOI: 10.1609/aaai.v35i5.16565.
- [12] **Das R., Dhuliawala S., Zaheer M., Vilnis L., Durugkar I., Krishnamurthy A., Smola A., McCallum A.** Go for a Walk and Arrive at the Answer: Reasoning Over Paths in Knowledge Bases using Reinforcement Learning. *ICLR 2018*. 2018. P.1-18. DOI: 10.48550/arXiv.1711.05851.
- [13] **Bai L., Yu W., Chen M., Ma X.** Multi-hop reasoning over paths in temporal knowledge graphs using reinforcement learning. *Applied Soft Computing*. 2021. Vol.103. P.1-9. DOI: 10.1016/j.asoc.2021.107144.
- [14] **Cui H., Peng T., Xiao F., Han J., Han R., Liu L.** Incorporating anticipation embedding into reinforcement learning framework for multi-hop knowledge graph question answering. *Information Sciences*. 2023. Vol.619. P.745-761. DOI: 10.1016/j.ins.2022.11.042.
- [15] **Bai Y., Lv X., Li J., Hou L., Qu Y., Dai Z., Xiong F.** SQUIRE: A Sequence-to-sequence Framework for Multi-hop Knowledge Graph Reasoning. *Proceedings of the 2022 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*. 2022. P.1649-1662. DOI: 10.18653/v1/2022.emnlp-main.107.
- [16] **Zou J., Wan J., Zhang H., Zhang Y.** Multi-hop Path Query Answering Model for Knowledge Graph based on Neighborhood Aggregation and Transformer. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. Vol.2560. P.1-15. DOI: 10.1088/1742-6596/2560/1/012049.
- [17] **Caballero M.** A Brief Survey of Question Answering Systems // *International Journal of Artificial Intelligence & Applications (IJAIA)*. 2022. Vol. 12(5). P. 1-7.
- [18] **Kim B., Hong T., Ko Y., Seo J.** Multi-Task Learning for Knowledge Graph Completion with Pre-trained Language Models. *Proceedings of the 28th International Conference on Computational Linguistics*. 2020. P.1737-1743. DOI: 10.18653/v1/2020.coling-main.153.

Сведения об авторах



Головин Алексей Андреевич, 1999 г. рождения. Окончил магистратуру СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Аспирант кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ СПбГЭТУ «ЛЭТИ». ORCID: 0009-0004-4687-8393; Author ID (РИНЦ): 1214796; Author ID (Scopus): 57442656600; golovin99@icloud.com. ✉.

Жукова Наталия Александровна, 1983 г. рождения. Окончила СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в 2006 году, д.т.н. (2020). Профессор кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ СПбГЭТУ «ЛЭТИ», ведущий научный сотрудник СПб ФИЦ РАН. В списке научных трудов более 100 работ в области обработки и анализа данных. ORCID: 0000-0001-5877-4461; Author ID (РИНЦ): 222968; Author ID (Scopus): 56406142300. nazhukova@mail.ru.



Поступила в редакцию 14.10.2024, после рецензирования 20.11.2024. Принята к публикации 23.12.2024.



Building a knowledge graph from telecommunication data

© 2025, A.A. Golovin¹✉, N.A. Zhukova^{1,2}

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI» (ETU «LETI»), Saint-Petersburg, Russia

² St. Petersburg Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (SPCRAS), Saint-Petersburg, Russia

Abstract

The paper presents a method for building a knowledge graph from telecommunication data using proprietary and reference models commonly employed in the telecommunications domain. Reference models are based on those included in the framework developed by the TM Forum consortium. The proposed approach involves building a knowledge graph for proprietary models through automated processing of autotest log files and billing system database tables. The relevance of knowledge graphs stems from their structured and semantic nature, as well as their potential for applying machine learning algorithms to generate recommendations for optimizing telecommunication processes and systems. A method based on a multi-step reasoning approach is proposed for creating interpretable recommendations by predicting and restoring missing links in a proprietary knowledge graph. This approach treats multi-step reasoning as a question-answering task using natural language processing techniques. The implementation of the proposed solution, leveraging a transformer-based neural network architecture, yielded interpretable results while maintaining metric values comparable to existing methods.

Keywords: knowledge graphs, telecommunication, log files, structure recovery, multi-step reasoning.

For citation: Golovin AA, Zhukova NA. Building a knowledge graph from telecommunication data [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(1): 45-54. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-1-45-54.

Financial support: This work was supported by the state budget, project No. FFZF-2022-0006.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures and tables

Figure 1 - TMFF model and dependencies between its elements

Figure 2 - Proprietary ontology class hierarchy

Figure 3 - A fragment of the knowledge graph that shows the relations between the elements of the functional and information models

Figure 4 - Examples of related entities corresponding to the "Balance Data Retrieval" function from proprietary functional model

Figure 5 - Examples of related entities corresponding to the "Centralized Ordering Rules Management" function from the reference functional model

Figure 6 - A fragment of the knowledge graph with related entities corresponding to the information models of the reference and proprietary knowledge graphs

Figure 7 - Sequence-to-sequence method overview

Table 1 - Key parameters of the constructed reference and proprietary knowledge graphs

Table 2 - Results of relation prediction on the reference knowledge graph

References

- [1] Li J, Hou L. Review of knowledge graph research. *Natural Sci. Ed.* 2017; 40(3): 454-459. DOI: 10.13451/j.cnki.shanxi.univ(nat.sci.).2017.03.008.
- [2] Mier FJZ. Applications of Knowledge Graphs in Telecommunication Systems Management. *IEEE Internet Computing*. 2023; 27(3): 29-34. DOI: 10.1109/MIC.2023.3253305.
- [3] Krinkin K, Kulikov., Vodyaho A, Zhukova N. Architecture of a Telecommunications Network Monitoring System Based on a Knowledge Graph. 26th *Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*. 2020. P.231-239. DOI: 10.23919/FRUCT48808.2020.9087429.

- [4] **Lei T, Wang Y.** Telecom Operator Knowledge Graphs Reasoning for Question Answering. 2021 *International Conference on Computer Information Science and Artificial Intelligence (CISAI)*. 2021. P.981-984. DOI: 10.1109/CISAI54367.2021.00196.
- [5] **Zou X.** A Survey on Application of Knowledge Graph. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1487. DOI: 10.1088/1742-6596/1487/1/012016.
- [6] **Krinkin K, Vodyaho A, Kulikov I, Zhukova N.** Models of Telecommunications Network Monitoring Based on Knowledge Graphs. 9th *Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*. 2020. P.1-7. DOI: 10.1109/MECO49872.2020.9134148.
- [7] **Zhukova N, Kulikov I, Utkin N.** The Method for Searching Patterns In Log Files of Telecommunication Devices for Monitoring their State. 2021 *XXIV International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*. 2021. P.124-126. DOI: 10.1109/SCM52931.2021.9507157.
- [8] TMF Business Process Framework Dataset for Neo4j. <https://github.com/A1gord/TMF-Business-Process-Framework-Dataset-for-Neo4j>.
- [9] **Chen Z, Wang Y, Zhao B, Cheng J, Zhao X, Duan Z.** Knowledge Graph Completion: A Review. *IEEE Access*. 2020; 8: 192435-192456. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3030076.
- [10] **Issa S, Adekunle O, Hamdi F, Cherfi SS-S, Dumontier M, Zaveri A.** Knowledge Graph Completeness: A Systematic Literature Review. *IEEE Access*. 2021; 9: 31322–31339. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3056622.
- [11] **Wan G, Du B.** Gaussian Path: A Bayesian Multi-Hop Reasoning Framework for Knowledge Graph Reasoning. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2021; 35(5): 4393-4401. DOI: 10.1609/aaai.v35i5.16565.
- [12] **Das R, Dhuliawala S, Zaheer M, Vilnis L, Durugkar I, Krishnamurthy A, Smola A, McCallum A.** Go for a Walk and Arrive at the Answer: Reasoning Over Paths in Knowledge Bases using Reinforcement Learning. *ICLR* 2018. 2018. P.1-18. DOI: 10.48550/arXiv.1711.05851.
- [13] **Bai L, Yu W, Chen M, Ma X.** Multi-hop reasoning over paths in temporal knowledge graphs using reinforcement learning. *Applied Soft Computing*. 2021; 103: 1-9. DOI: 10.1016/j.asoc.2021.107144.
- [14] **Cui H, Peng T, Xiao F, Han J, Han R, Liu L.** Incorporating anticipation embedding into reinforcement learning framework for multi-hop knowledge graph question answering. *Information Sciences*. 2023; 619: 745-761. DOI: 10.1016/j.ins.2022.11.042.
- [15] **Bai Y, Lv X, Li J, Hou L, Qu Y, Dai Z, Xiong F.** SQUIRE: A Sequence-to-sequence Framework for Multi-hop Knowledge Graph Reasoning. *Proceedings of the 2022 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*. 2022. P.1649-1662. DOI: 10.18653/v1/2022.emnlp-main.107.
- [16] **Zou J, Wan J, Zhang H, Zhang Y.** Multi-hop Path Query Answering Model for Knowledge Graph based on Neighborhood Aggregation and Transformer. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023; 2560: 1-15. DOI: 10.1088/1742-6596/2560/1/012049.
- [17] **Caballero M.** A Brief Survey of Question Answering Systems. *International Journal of Artificial Intelligence & Applications (IJAAIA)*. 2022; 12(5): 1-7.
- [18] **Kim B, Hong T, Ko Y, Seo J.** Multi-Task Learning for Knowledge Graph Completion with Pre-trained Language Models. *Proceedings of the 28th International Conference on Computational Linguistics*. 2020. P.1737-1743. DOI: 10.18653/v1/2020.coling-main.153.

About the authors

Aleksei Andreevich Golovin (b. 1999) graduated from the Master's program at the ETU «LETI». Postgraduate student of the Department of Software Engineering and Computer Applications at ETU «LETI». ORCID: 0009-0004-4687-8393; Author ID (RSCI): 1214796; Author ID (Scopus): 57442656600; golovin99@icloud.com. ✉.

Nataly Aleksandrovna Zhukova (b. 1983) graduated from the ETU «LETI» in 2006, Ph.D (2020). Associate Professor at the ETU. Leading researcher at SPCRAS. She is a co-author of more than 100 publications in the field of data processing and analysis. ORCID: 0000-0001-5877-4461; Author ID (Scopus): 56406142300. nazhukova@mail.ru.

Received October 10, 2024. Revised November 21, 2024. Accepted December 23, 2024.



Анализ отзывов пациентов с использованием машинного обучения и лингвистических методов

© 2025, И.Е. Калабихина¹, В.С. Мошкин²✉, А.В. Колотуша¹, М.И. Кашин², Г.А. Клименко¹, З.Г. Казбекова¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ), Москва, Россия

²Ульяновский государственный технический университет (УлГТУ), Ульяновск, Россия

Аннотация

С развитием цифровизации традиционные методы анкетирования потребителей с целью оценки степени их удовлетворённости качеством услуг уступают место подходу, основанному на автоматической обработке текстовых массивов социальных медиа. Целью работы является определение степени удовлетворённости качеством медицинских услуг пациентов посредством разработки и апробации алгоритма классификации русскоязычных текстовых отзывов, извлечённых из социальных медиаресурсов. Интерес представляет определение тональности отзывов пациентов (положительный/отрицательный) о работе медицинских учреждений и врачей, а также объекты обращения отзыва – качество оказанных медицинских услуг или организация обслуживания пациентов медицинским учреждением. Разработан метод классификации текстовых отзывов о работе медицинских учреждений, размещённых пациентами на двух сайтах отзывов о врачах в России. Проанализировано около 60 тысяч отзывов. Апробированы методы машинного обучения с использованием различных архитектур искусственных нейронных сетей. Разработанный алгоритм классификации имеет высокую эффективность – лучший результат показала архитектура на основе рекуррентной нейронной сети (показатель точности = 0.9271). Применение метода поиска именованных сущностей к текстовым сообщениям позволило повысить эффективность классификации для каждого из классификаторов, базирующихся на использовании нейронных сетей. Для повышения качества классификации требуется семантическое разбиение отзыва по объекту обращения и тональности и последующий учёт полученных фрагментов отдельно друг от друга.

Ключевые слова: машинное обучение, отзывы пациентов, нейронные сети, классификация отзывов, качество медицинских услуг.

Цитирование: Калабихина И.Е., Мошкин В.С., Колотуша А.В., Кашин М.И., Клименко Г.А., Казбекова З.Г. Анализ отзывов пациентов с использованием машинного обучения и лингвистических методов. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №1(55). С.55-66. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-1-55-66.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект №23-71-01101 «Разработка моделей и методов повышения производительности хранилищ данных посредством предиктивного анализа темпоральной диагностической информации» и НИР «Воспроизводство населения в социально-экономическом развитии» при поддержке экономического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (ЦИТИС: 122041800047-9 ЭФ МГУ).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В настоящее время процесс анкетирования для оценки удовлетворённости потребителей набором услуг начал уступать место подходу, основанному на автоматической обработке текстов в социальных медиа с возможностью извлечения семантики. При использовании такого подхода выборка становится более представительной и независимой, а результаты анализа более достоверно отражают отношение потребителей. Особенно важно проведение подобного анализа в таких сферах деятельности человека, как медицина.

Целью работы является определение степени удовлетворённости качеством медицинских услуг пациентов путём классификации русскоязычных текстовых отзывов, извлечённых из социальных медиаресурсов, о работе медицинских учреждений и врачей.

Для достижения данной цели необходима разработка программных классификаторов, позволяющих разделить анализируемые текстовые данные по группам в соответствии с выбранными критериями: эмоциональная окраска; объект или субъект применения; причинно-следственная составляющая и пр. Жанровые и речевые особенности текстов в социальных медиа порождают необходимость разработки интеллектуальных алгоритмов классификации текстов, позволяющих проводить подробный анализ текстовых отзывов с учётом особенностей предметной области.

Онлайн-отзывы и онлайн-рейтинги формируют *неформальные коммуникации, направленные на потребителей посредством интернет-технологий, связанные с использованием или характеристиками конкретных товаров и услуг или их продавцов* [1]. Это активно используется в здравоохранении для оценки деятельности врачей и больниц.

На отзыв пациента могут влиять личностные характеристики врача: пол, возраст, специальность [2–5]. Например, более высокие оценки у врачей-женщин [2, 3], акушеров-гинекологов и врачей более молодого возраста [6]. В зависимости от частоты использования веб-сайтов для рейтингования врачей [7, 8] пользователи, имеющие разные ключевых характеристики, по-разному оценивают значимость онлайн-отзывов о врачах [9]. В качестве данных используются одновременно значение рейтинга и тексты комментариев [10]. В частности, выявлены факторы, влияющие на положительные оценки врача, связанные с его характеристиками и другими, не зависящими от него факторами.

В ряде исследований используются в качестве основы данных массивы текстов отзывов о врачах [11, 12]. Оценки врачей в социальных медиа могут дополнять информацию, предоставляемую традиционными опросами пациентов, и способствовать пониманию пациентами качества услуг, предоставляемых врачом или медицинским учреждением [13].

Анализ социальных медиа включает:

- 1) извлечение из различных ресурсов соответствующего контента социальных сетей [14];
- 2) выбор данных для прогнозного моделирования анализа настроений;
- 3) визуализация выводов, полученных в результате анализа [15].

Для анализа настроений на основе полученных данных можно использовать контролируемые и неконтролируемые методы [16]. Основные подходы к классификации полярности анализируемых текстов включают слово, предложение или абзацы.

В [17] рассмотрены методы интеллектуального анализа текста, в т.ч. на основе машинного обучения и онтологий, а также с использованием гибридного подхода. Показано, что не существует алгоритма, который бы работал хорошо для всех типов данных.

В [18] рассмотрены различные типы классификаторов текста, в частности: байесовский классификатор; дерево решений; K -ближайшего соседа (K -NN); метод опорных векторов (SVM); искусственная нейронная сеть (НС) на основе многослойного перцептрона; алгоритм Роккио. Общим недостатком всех алгоритмов является их низкая производительность.

В [19] рассмотрены два подхода к классификации текста: подход «Мешок слов»; сетевая классификация. Выделено 18 классов и классифицированы актуальные темы. Показано, что сетевой классификатор работал значительно лучше, чем текстовый. В [20] обсуждаются методы, позволяющие преодолеть трудности классификации коротких текстов на основе потоковых данных в социальных сетях.

В [21] предложена многомерная структура классификации текстовых документов. Показано, что классификация на основе многомерной модели категорий с использованием многомерных и иерархических классификаций превосходит плоскую классификацию.

В статье [22] предложен метод точной настройки модели, обученной с использованием некоторых известных документов, содержащих более богатую контекстную информацию.

Как показал приведённый обзор, в настоящее время не существует единого подхода к классификации текстовых ресурсов. Результаты категоризации зависят от предметной области, репрезентативности обучающей выборки и других факторов. Поэтому актуальной является задача разработки и применения интеллектуальных методов анализа отзывов об оказании медицинских услуг.

1 Модели классификации отзывов о медицинских услугах

В настоящем исследовании разработан метод классификации текстовых отзывов, полученных из социальных медиа. Результатом классификации стало распределение текстовых отзывов по следующим основаниям:

- тональность текста: положительная или отрицательная;
- объект адресации: отзыв о медицинском учреждении или о конкретном враче.

Для классификации отзывов были апробированы методы машинного обучения с использованием различных архитектур НС. В данном исследовании предложено три архитектуры НС, которые зарекомендовали себя наилучшим образом в задачах небинарной классификации текстовых данных. Эффективность предложенных алгоритмов сопоставлена с результатами классификации текстов с использованием моделей, показывающих хорошие результаты при бинарной классификации (*BERT* и *SVM*) [23, 24].

1.1 Сеть долгой краткосрочной памяти

Общая архитектура *LSTM* (*Long Short-Term Memory*) – сети, представленная на рисунке 1, состоит из следующих слоёв:

- Слой *Embedding* – входной слой НС, состоящий из нейронов:
 $Emb = \{Size(D), Size(S_{vec}), L_{sec}\}$, где $Size(D)$ – размер словаря в текстовых данных;
 $Size(S_{vec})$ – размер векторного пространства, в которое будут вставлены слова; $Size(S_{vec}) = 32$;
 L_{sec} – длина входных последовательностей, равная максимальному размеру вектора, сформированного при предобработке слов.
- Слой *LSTM* – рекуррентный слой НС. Включает 32 блока.
- Слой *Dense* – выходной слой, состоящий из четырёх нейронов. Каждый нейрон отвечает за выходной класс. Функция активации – «*softmax*».

1.2 Рекуррентная НС

Общая архитектура рекуррентной НС, представленная на рисунке 2, состоит из следующих слоёв:

- Слой *Embedding* – входной слой НС.
- Слой *GRU* – рекуррентный слой НС. Включает 16 блоков.
- Слой *Dense* – выходной слой, состоящий из четырёх нейронов. Функция активации – «*softmax*».

1.3 Свёрточная НС

Общая архитектура свёрточной НС (*Convolutional neural network, CNN*), представленная на рисунке 3, состоит из следующих слоёв:

- Слой *Embedding* – входной слой НС.
- Слой *Conv1D* – свёрточный слой, необходим для глубокого обучения. С данным слоем точность классификации текстовых сообщений повышается. Функция активации – «*relu*».
- Слой *MaxPooling1D* – слой, отвечающий за уменьшение размерности сформированных карт признаков. Максимальный пул равен 2.
- Слой *Dense* – первый выходной слой, состоящий из 128 нейронов. Функция активации – «*relu*».
- Слой *Dense* – итоговый выходной слой, состоящий из четырёх нейронов. Функция активации – «*softmax*».

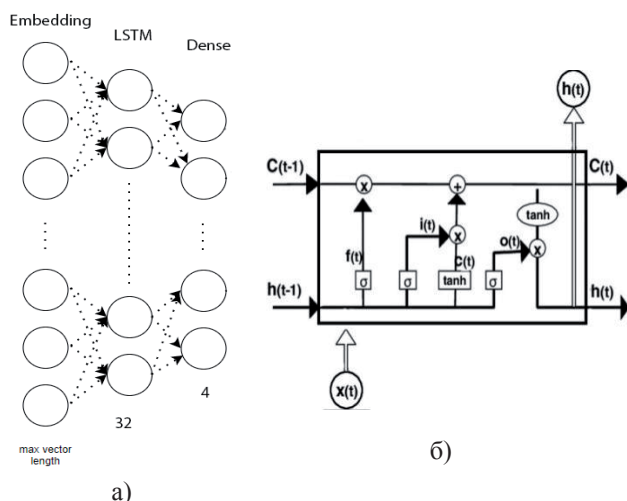


Рисунок 1 – LSTM-сеть: общая архитектура (а), LSTM-слой (б)

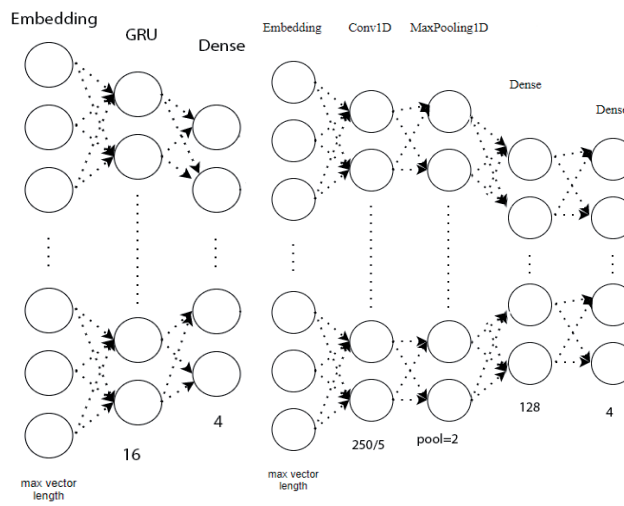


Рисунок 2 – Общая архитектура рекуррентной нейронной сети

Рисунок 3 – Общая архитектура сверточной нейронной сети

1.4 Использование лингвистических алгоритмов

Особенностью анализируемых текстовых отзывов является наличие элементов разных классов внутри одного отзыва. Для повышения качества классификации объединены наиболее эффективные методы машинного обучения с лингвистическими методами, которые учитывают речевые и грамматические особенности языка текста. Общая схема алгоритма классификации представлена на рисунке 4.

В качестве лингвистической составляющей разработанного алгоритма принята совокупность методов предобработки, валидации и детектирования именованных сущностей (имена врачей клиники).

2 Программная реализация системы классификации текстов

В качестве модуля для лингвистического анализа текста на русском языке использовалась библиотека *Natasha* на *Python*. С помощью данной библиотеки решаются базовые задачи обработки русского языка: сегментация на токены и предложения, морфологический и синтаксический анализ, лемматизация, извлечение, нормализация и детектирование именованных сущностей. Библиотека использовалась для поиска и извлечения именованных сущностей.

Для процессов инициализации, обучения НС, а также оценки эффективности классификации использовались следующие библиотеки:



Рисунок 4 – Общая схема алгоритма классификации

- *Tensorflow* – открытая программная библиотека для машинного обучения.
- *Keras* – библиотека глубокого обучения, представляющая высокоуровневый *API* на *Python*, способный работать поверх *TensorFlow*.
- *Numpy* – библиотека на *Python*, предназначенная для работы с многомерными массивами.
- *Pandas* – библиотека на *Python*, предоставляющая специальные структуры данных и операции для работы с числовыми таблицами и временными рядами.

Для обучения моделей использован *Google Colab*.

3 Результаты экспериментов по классификации текстовых отзывов

3.1 Набор данных

Для оценки эффективности предложенных подходов проведён ряд экспериментов по классификации текстовых отзывов о медицинских услугах клиник и врачей. В качестве исходных данных использовались текстовые отзывы агрегаторов *prodoctorov.ru* и *infodoctor.ru*.

Извлечённые данные имели следующий перечень переменных:

- *city* – город, в котором оставлен отзыв;
- *text* – текст отзыва;
- *author_name* – имя автора отзыва;
- *date* – дата написания отзыва;
- *day* – день написания отзыва;
- *month* – месяц написания отзыва;
- *year* – год написания отзыва;
- *doctor_or_clinic* – бинарная переменная (отзыв написан о враче ИЛИ о клинике);
- *spec* – специальность врача (для отзывов, посвящённых врачам);
- *gender* – пол автора отзыва;
- *id* – идентификационный номер отзыва.

По условиям экспериментов максимальное число слов в отзыве равно 90.

3.2 Результаты эксперимента по классификации текстовых отзывов по тональности

Для апробации алгоритмов определения тональности сформирована база из 5037 комментариев с сайта *prodoctorov.ru* с наличием исходной разметки по тональности и объекту применения.

В качестве алгоритма векторизации текстовых данных использовалась языковая модель *RuBERT*. Для бинарной классификации текста на категории (положительный или отрицательный) использовалась модель Трансформер. Соотношение обучающей и тестовой выборок составило 80/20. Результаты работы классификатора на тестовой выборке: *Precision* = 0,9857, *Recall* = 0,8909, *F1-score* = 0,9359. Полученные значения метрик качества работы классификатора позволяют утверждать о возможности применения данной архитектуры бинарного классификатора по тональности текста на источники данных медицинских отзывов.

На данной выборке также апробирован *LSTM*-классификатор (см. подраздел 1.1). Соотношение обучающей и тестовой выборок составило 80/20. Результаты классификации отзывов с сайта *prodoctorov.ru* с применением *LSTM*-сети следующие: позитивный отзыв о враче – 21%; позитивный отзыв о клинике – 54%; негативный отзыв о враче – 5%; негативный отзыв о клинике – 20%.

3.3 Эксперимент по классификации текстовых отзывов с применением различных моделей машинного обучения

Для классификации отзывов с использованием представленных в разделе 1 моделей машинного обучения использовались данные агрегатора *infodoctor.ru*. Преимущество этого агрегатора перед площадками (*prodoctorov.ru*, *docdoc.ru*) состоит в наличии группировки отзывов по рейтингу от одного до пяти для разных городов, что упрощает процедуру сбора данных. Выборки охватывают Москву, Санкт-Петербург и 14 других городов-миллионников России, по которым есть возможность сформировать минимально представительные выбор-

ки (не менее 1000 наблюдений в расчёте на один город), в период с июля 2012 года по август 2023 года. Всего извлечено 58246 отзывов. Примеры выбранных отзывов приведены в таблице 1 (тексты отзывов даны в оригинальном виде).

Таблица 1 – Примеры отзывов с сайта *infodocctor.ru*

№	Текст отзыва	Информация об отзыве	Класс тональности	Класс объекта применения
1	«Врач очень грубая, совершенно не имеет подход к людям, ваше заболевание её не интересует, для неё важнее пораньше уйти домой. Обращаться к такому врачу больше не хочется. Никому её не советую»	Екатерина, 13.04.2023 г., г. Москва	Отрицательный	О враче
2	«Проходил МРТ брюшной полости. Приняли меня не вовремя. Результаты по обследованию мне выдали сразу, обращаюсь с ними к врачу. Добираться до клиники мне было удобно. Общались со мной не очень хорошо. Не приду сюда повторно»	Камиль, 17.04.2023 г., г. Москва	Отрицательный	О клинике
3	«Все положительные отзывы составлены маркетологами, с отрицательными они всюду тщательно борются, реальные негативный отзывы пресекают. Клиника очень дорогая и ориентирована чисто на сбор денег, на ваше здоровье там всем глубоко фиолетово»	Анонимный пользователь, 10.04.2023 г., г. Москва	Отрицательный	О клинике
4	«В этой клинике происходит сбор денег, потому что назначают ненужно обследование и ненужные анализы - это я узнала уже, когда все начала проходить, а потом задумалась, зачем мне все это»	Арина, 2.03.2023 г., г. Москва	Отрицательный	О клинике
5	«Плохой врач. Моя проблема - сильная сухость кожи и высыпание на этой почве. ##### сказала только «её надо увлажнять» и всё. Как и чем не сказала. Рекомендации по уходу или дальнейшим действиям пришлось выпрашивать. Ничего не назначила кроме одного крема, после просьб моих»	Без имени, 11.05.2023 г., г. Москва	Отрицательный	О враче

Соотношение обучающей и тестовой выборок для всех применяемых алгоритмов составило 80/20. Графики, отражающие результаты классификации на обучающем и тестовом наборах данных для *LSTM*-, *GRU*- и *CNN*-архитектурах, представлены на рисунке 5.

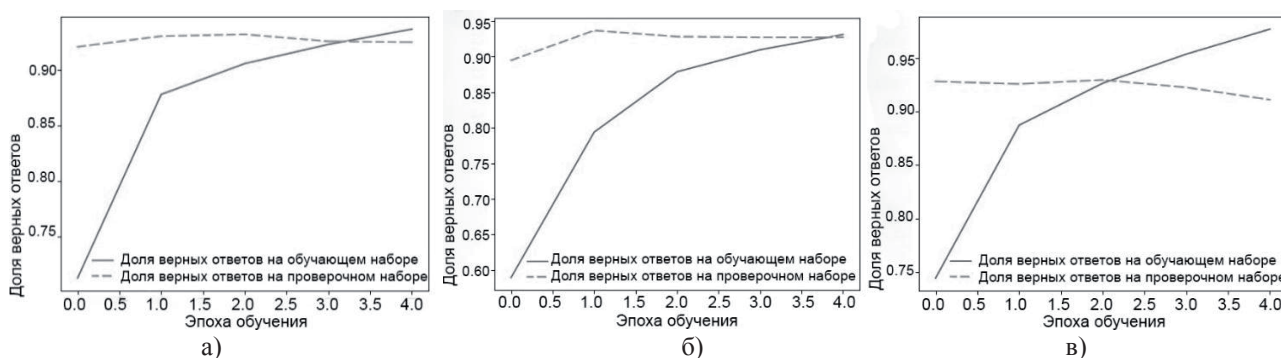


Рисунок 5 - Результаты классификации на обучающем и тестовом наборах данных для *LSTM*-сети (а), *GRU*-сети (б) и *CNN*-сети (в).

Сравнение показателей эффективности классификации текстовых отзывов представлено в таблице 2, где: *Accuracy* – точность при обучении; *Val_accuracy* – точность при проверке; *Loss* – потери при обучении; *Val_loss* – потери при проверке. Для оценки достоверности показателей характеристик предложенных моделей на используемом наборе данных проведены эксперименты с применением *SVM* и *RuBERT*. Из таблицы 2 видно, что эти алгоритмы показали чуть меньшую эффективность.

Одной из особенностей анализируемых текстовых отзывов стало наличие элементов разных классов внутри одного отзыва: одно текстовое сообщение могло содержать отзыв о враче и о клинике. В связи с этим введено два класса – положительный и отрицательный отзывы о клинике и враче – и применён лингвистический метод (*Ling*) поиска именованных сущностей (см. подраздел 1.4). Применение данного подхода позволило повысить эффективность классификации для всех трёх архитектур искусственных НС. Результаты классификации с использованием рассмотренных алгоритмов представлены на рисунке 6.

Лингвистический подход применялся только к тем сообщениям, которые на первом этапе НС отнесла к категории «отзыв о клинике».

Применение метода поиска именованных сущностей к текстовым сообщениям позволило повысить эффективность классификации.

Среди отзывов, неправильно классифицированных (в т.ч. с учётом применения *Ling*), имеется набор длинных текстовых сообщений, которые семантически могут относиться одновременно к разным классам. Это отзывы, которые:

- характеризуют клинику и врача, но без упоминания конкретного имени, что не позволяет отнести отзыв к смешанному классу;
- включают противоположные высказывания о клинике, которые касаются разных сторон её функционирования (в первую очередь могут разниться мнения об организационном сопровождении и уровне медицинского обслуживания клиник). Более глубокая категоризация отзывов о клинике позволит повысить качество классификации.

Заключение

В статье представлен метод классификации текстовых отзывов о работе медицинских учреждений, извлечённых из социальных медиаресурсов. Данный метод предполагает применение одной из архитектур искусственных НС (*LSTM*, *CNN*, *GRU*) для классификации отзывов на основные категории (по тональности и по объекту обращения) и лингвистического подхода с извлечением именованных сущностей.

Проведён ряд экспериментов по классификации текстовых отзывов о медицинских услугах клиник и врачей. В качестве исходных данных использовались текстовые отзывы агрегаторов *prodoctorov.ru* и *infodoctor.ru*. Проанализировано около 60 тысяч отзывов. По результатам проведённых экспериментов можно сделать следующие выводы.

- Классификация русскоязычных текстовых отзывов, извлечённых из социальных медиа, о медицинских учреждениях и врачах с использованием НС, имеет высокую эффектив-

Таблица 2 – Показатели эффективности классификации текстовых отзывов

Показатели	<i>LSTM</i>	<i>GRU</i>	<i>CNN</i>	<i>SVM</i>	<i>BERT</i>
<i>Accuracy</i>	0.9369	0.9309	0.9772	0.8441	0.8942
<i>Val accuracy</i>	0.9253	0.9271	0.9112	0.8289	0.8711
<i>Loss</i>	0.1859	0.2039	0.0785	0.3769	0.1729
<i>Val loss</i>	0.2248	0.2253	0.3101	0.3867	0.2266

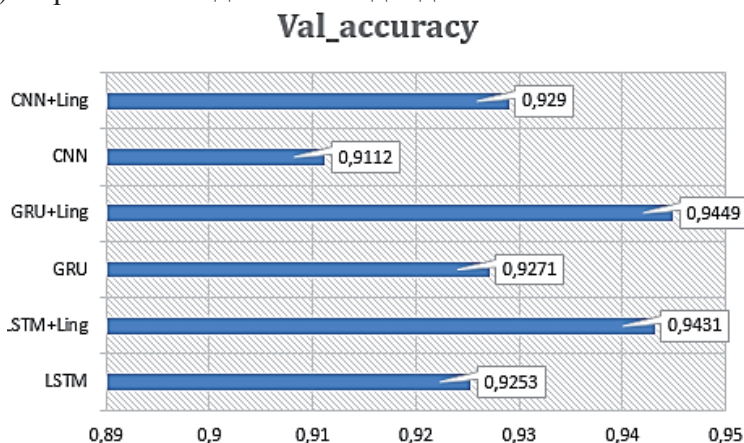


Рисунок 6 - Результаты классификации с использованием рассмотренных алгоритмов

ность при разбиении по тональности и объекту приложения. Наиболее высокую эффективность классификации показала архитектура на основе *GRU* (*val_accuracy*=0.9271).

- Применение метода поиска именованных сущностей к текстовым сообщениям позволило повысить эффективность классификации.

Авторский вклад

Калабахина И.Е. - постановка и разработка задачи исследования; Мошкин В.С. - разработка и формализация моделей и алгоритмов; Колотуша А.В. - сбор и предобработка обучающего и тестового множества; Кашин М.И. - программная реализация программной системы; Клименко Г.А. - анализ современных подходов; Казбекова З.Г. - разработка и оценка применимости алгоритмов, подготовка обучающего и тестового множества.

Список источников

- [1] *Litvin S.W., Goldsmith R.E., Pan B.* Electronic word-of-mouth in hospitality and tourism management. *Tourism management*. 2008; 29(3), 458-468. DOI: 10.1016/j.tourman.2007.05.011.
- [2] *Emmert M., Meier F.* An analysis of online evaluations on a physician rating website: evidence from a German public reporting instrument. *Journal of medical Internet research*. 2013; 15(8), e2655. DOI:10.2196/jmir.2655.
- [3] *Nwachukwu B.U., Adjei J., Trehan S.K., Chang B., Amoo-Achampong K., Nguyen J.T., Ranawat A.S.* Rating a sports medicine surgeon's "quality" in the modern era: an analysis of popular physician online rating websites. *HSS Journal*. 2016; 12(3), 272-277. DOI: 10.1007/s11420-016-9520-x.
- [4] *Obele C.C., Duszak Jr.R., Hawkins C.M., Rosenkrantz A.B.* What patients think about their interventional radiologists: assessment using a leading physician ratings website. *Journal of the American College of Radiology*. 2017; 14(5), 609-614. DOI: 10.1016/j.jacr.2016.10.013.
- [5] *Emmert M., Meier F., Pisch F., Sander U.* Physician choice making and characteristics associated with using physician-rating websites: cross-sectional study. *Journal of medical Internet research*. 2013; 15(8), e2702. DOI: 10.2196/jmir.2702.
- [6] *Gao G.G., McCullough J.S., Agarwal R., Jha A.K.* A changing landscape of physician quality reporting: analysis of patients' online ratings of their physicians over a 5-year period. *Journal of medical Internet research*. 2012; 14(1), e38. DOI: 10.2196/jmir.2003.
- [7] *Galizzi M.M., Miraldo M., Stavropoulou C., Desai M., Jayatunga W., Joshi M., Parikh S.* Who is more likely to use doctor-rating websites, and why? A cross-sectional study in London. *BMJ open*. 2012; 2(6), e001493. DOI: 10.1136/bmjopen-2012-001493.
- [8] *Hanauer D.A., Zheng K., Singer D.C., Gebremariam A., Davis M.M.* Public awareness, perception, and use of online physician rating sites. *Jama*. 2014; 311(7), 734-735. DOI: 10.1001/jama.2013.283194.
- [9] *McLennan S., Strech D., Meyer A., Kahrass H.* Public awareness and use of German physician ratings websites: Cross-sectional survey of four North German cities. *Journal of medical Internet research*. 2017; 19(11), e387. DOI: 10.2196/jmir.7581.
- [10] *Lin Y., Hong Y.A., Henson B.S., Stevenson R.D., Hong S., Lyu T., Liang C.* Assessing patient experience and healthcare quality of dental care using patient online reviews in the United States: mixed methods study. *Journal of Medical Internet Research*. 2020; 22(7), e18652. DOI: 10.2196/18652.
- [11] *Emmert M., Meier F., Heider A.K., Dürr C., Sander U.* What do patients say about their physicians? An analysis of 3000 narrative comments posted on a German physician rating website. *Health policy*. 2014; 118(1), 66-73. DOI: 10.1016/j.healthpol.2014.04.015.
- [12] *Shah A.M., Yan X., Shah S.A.A., Mamirkulova G.* Mining patient opinion to evaluate the service quality in healthcare: a deep-learning approach. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2020; 11, 2925-2942. DOI: 10.1007/S12652-019-01434-8.
- [13] *Jiang S., Street R.L.* Pathway linking internet health information seeking to better health: a moderated mediation study. *Health Communication*. 2017; 32(8), 1024-1031. DOI: 10.1080/10410236.2016.1196514.
- [14] *Hotho., Nürnberger A., Paaß G.* A Brief Survey of Text Mining, *LDV Forum - GLDV Journal for Computational Linguistics and Language Technology*. 2005; vol. 20, pp.19-62. DOI: 10.21248/jlcl.20.2005.68.
- [15] *Păvăloaia V., Teodor E., Fotache D., Danileț M.* Opinion Mining on Social Media Data: Sentiment Analysis of User Preferences, Sustainability. 2019; 11, 4459. DOI: 10.3390/su11164459.
- [16] *Bespalov D., Bing B., Yanjun Q., Shokoufandeh A.* Sentiment classification based on supervised latent n-gram analysis", *Proceedings of the 20th ACM international conference on Information and knowledge management*

- (CIKM '11). Association for Computing Machinery. 2011; New York, USA, 375–382. DOI: 10.1145/2063576.2063635.
- [17] **Irfan R, King CK, Grages D, Ewen S, Khan SU, Madani SA, Kolodziej J, Wang L, Chen D, Rayes A, Tziritas N, Xu CZ, Zomaya AY, Alzahrani AS, Li H.** A Survey on Text Mining in Social Networks, Cambridge Journal, The Knowledge Engineering Review. 2015; 30(2), pp. 157-170. DOI:10.1017/S0269888914000277.
- [18] **Patel P., Mistry K.** A Review: Text Classification on Social Media Data, IOSR Journal of Computer Engineering. 2015; 17(1), pp. 80-84.
- [19] **Lee K., Palsetia D., Narayanan R., Patwary Md.M.A, Agrawal A., Choudhary A.S.** Twitter Trending Topic Classification, in Proceeding of the 2011 IEEE 11 th International Conference on Data Mining Workshops, ICDW'11. 2011; pp. 251-258.
- [20] **Kateb F., Kalita J.** Classifying Short Text in Social Media: Twitter as Case Study, International Journal of Computer Applications. 2015; 111(9), pp. 1-12. DOI: 10.5120/19563-1321.
- [21] **Theeramunkong T., Lertnattee V.** Multi-Dimension Text Classification, SIIT, Thammasat University, 2005.<http://www.aclweb.org/anthology/C02-1155> (03 October 2024). DOI: 10.1109/TITB.2004.832.
- [22] **Sornlertlamvanich V., Pacharawongsakda E., Charoenporn T.** Understanding Social Movement by Tracking the Keyword in Social Media, in MAPLEX2015, 2015; Yamagata, Japan.
- [23] **Kalabikhina I., Moshkin V., Kolotusha A., Kashin M., Klimenko G., Kazbekova Z.** Advancing Semantic Classification: A Comprehensive Examination of Machine Learning Techniques in Analyzing Russian-Language Patient Reviews. Mathematics. 2024; 12(4): 566. DOI:10.3390/math12040566.
- [24] **Kalabikhina I., Zubova E., Loukachevitch N., Kolotusha A., Kazbekova Z., Banin E., Klimenko G.** Identifying Reproductive Behavior Arguments in Social Media Content Users' Opinions through Natural Language Processing Techniques, Population and Economics. 2023; 7(2), pp. 40-59. DOI: 10.3897/popecon.7.e97064.

Сведения об авторах



Калабихина Ирина Евгеньевна, 1969 г. рождения. Доктор экономических наук, профессор. Заведующая кафедрой народонаселения Экономического факультета МГУ. Главный редактор журнала «Население и экономика». Области исследований: взаимосвязь демографического и экономического развития, прикладная демография, экономика неравенства, детерминанты рождаемости, социальное бюджетирование, политика в области народонаселения, политика в интересах социально-демографических групп населения. Author ID (Scopus): 57190138890; Researcher ID (WoS): N-3625-2013; ORCID: 0000-0002-3958-6630. ikalabikhina@yandex.ru.

Мошкин Вадим Сергеевич, 1990 г. рождения. Окончил УлГТУ в 2012 г., к.т.н. (2017 г.), доцент кафедры «Информационные системы» УлГТУ. Проректор по цифровой трансформации УлГТУ. Вице-президент Российской ассоциации искусственного интеллекта. В списке научных трудов более 150 статей в области интеллектуальной обработки знаний, автоматизации проектирования, построения прикладных интеллектуальных систем. Author ID (RSCI): 762084; Author ID (Scopus): 57190250573; Researcher ID (WoS): L-3578-2016; ORCID: 0000-0002-9258-4909. v.moshkin@ulstu.ru ✉.



Колотуша Антон Васильевич, 1995 г. рождения. Кандидат экономических наук. Программист 2 категории лаборатории информационно-аналитических ресурсов кафедры народонаселения Экономического факультета МГУ. Области исследований: прикладная демография, экономика неравенства, анализ социальных медиа, политика в области народонаселения. Author ID (Scopus): 57223390271; ORCID: 0000-0002-3089-3327. tony_kol@mail.ru.



Кашин Максим Игоревич, 2003 г. рождения. Студент направления 09.03.04 «Программная инженерия» УлГТУ. Младший научный сотрудник научно-исследовательского отдела Департамента научных исследований и инноваций УлГТУ. Области исследований: анализ естественного языка, принятие решений, машинное обучение, автоматизация сложных бизнес-процессов. m.kashin@ulstu.ru.



Клименко Герман Андреевич. Аспирант кафедры народонаселения Экономического факультета МГУ. Области исследований: прикладная демография, экономика неравенства, анализ социальных медиа, политика в области народонаселения. Author ID (Scopus): 57223391224; ORCID: 0000-0003-3045-7151. german89000@mail.ru.



Казбекова Зарина Германовна. Кандидат экономических наук. Научный сотрудник кафедры народонаселения Экономического факультета МГУ. Выпускник аспирантуры кафедры народонаселения. Области исследований: прикладная демография, экономика неравенства, анализ социальных медиа, политика в области народонаселения. Author ID (Scopus): 57934120000; ORCID: 0000-0002-7567-3184. kazbekova.zarina@bk.ru.



Поступила в редакцию 5.09.2024, после рецензирования 2.12.2024. Принята к публикации 18.12.2024.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-55-66

Analysis of patient reviews using machine learning and linguistic methods

© 2025, I.E. Kalabikhina¹, V.S. Moshkin²✉, A.V. Kolotusha¹, M.I. Kashin², G.A. Klimenko¹, Z.G. Kazbekova¹

¹Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Moscow, Russia

²Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

Abstract

With the advancement of digitalization, traditional methods of surveying consumers to assess their satisfaction with service quality are being replaced by approaches based on the automatic processing of text data from social media. This study aims to determine the degree of patient satisfaction with the quality of medical services by developing and testing an algorithm for classifying Russian-language text reviews collected from social media platforms. The focus is on analyzing the sentiment (positive/negative) of patient reviews about medical institutions and doctors, as well as identifying the review's subject—either the quality of medical services provided or the organization of patient care by the institution. A method was developed for classifying text reviews about the work of medical institutions posted by patients on two Russian doctor review platforms. Approximately 60,000 reviews were analyzed. Machine learning techniques, including various artificial neural network architectures, were tested. The classification algorithm demonstrated high efficiency, with the best performance achieved using a recurrent neural network architecture (accuracy = 0.9271). Incorporating named entity recognition into text analysis further enhanced the classification efficiency across all neural network-based classifiers. To improve classification quality, the study highlights the need for semantic segmentation of reviews by their subject and sentiment, followed by the separate analysis of these fragments.

Keywords: machine learning, patient reviews, neural networks, review classification, quality of medical services.

For citation: Kalabikhina IE, Moshkin VS, Kolotusha AV, Kashin MI, Klimenko GA, Kazbekova ZG. Analysis of patient reviews using machine learning and linguistic methods [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(1): 55-66. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-1-55-66.

Financial Support: This work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 23-71-01101 “Development of models and methods for increasing the performance of data warehouses through predictive analysis of temporal diagnostic information» and research work “Population reproduction in socio-economic development” with the support of the Faculty of Economics of the Lomonosov Moscow State University.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures and table

Figure 1 - LSTM network: general architecture, LSTM layer

Figure 2 - General architecture of a recurrent neural network

Figure 3 - General architecture of a convolutional neural network

Figure 4 - General scheme of the classification algorithm

Figure 5 - Results of classification on the training and test dataset for an LSTM network, a GRU network, and a CNN network

Figure 6 - Classification results using the considered algorithms

Table 1 - Examples of reviews from the infodoctor.ru website

Table 2 - Efficiency indicators for classifying text reviews

References

- [1] **Litvin SW, Goldsmith RE, Pan B.** Electronic word-of-mouth in hospitality and tourism management. *Tourism management*. 2008; 29(3): 458-468. DOI: 10.1016/j.tourman.2007.05.011.
- [2] **Emmert M, Meier F.** An analysis of online evaluations on a physician rating website: evidence from a German public reporting instrument. *Journal of medical Internet research*. 2013; 15(8): e2655. DOI:10.2196/jmir.2655.
- [3] **Nwachukwu BU, Adjei J, Trehan SK, Chang B, Amoo-Achampong K, Nguyen JT, Ranawat AS.** Rating a sports medicine surgeon's "quality" in the modern era: an analysis of popular physician online rating websites. *HSS Journal*. 2016; 12(3): 272-277. DOI: 10.1007/s11420-016-9520-x.
- [4] **Obele CC, Duszak JrR, Hawkins CM, Rosenkrantz AB.** What patients think about their interventional radiologists: assessment using a leading physician ratings website. *Journal of the American College of Radiology*. 2017; 14(5): 609-614. DOI: 10.1016/j.jacr.2016.10.013.
- [5] **Emmert M, Meier F, Pisch F, Sander U.** Physician choice making and characteristics associated with using physician-rating websites: cross-sectional study. *Journal of medical Internet research*. 2013; 15(8): e2702. DOI: 10.2196/jmir.2702.
- [6] **Gao GG, McCullough JS, Agarwal R, Jha AK.** A changing landscape of physician quality reporting: analysis of patients' online ratings of their physicians over a 5-year period. *Journal of medical Internet research*. 2012; 14(1): e38. DOI: 10.2196/jmir.2003.
- [7] **Galizzi MM, Miraldo M, Stavropoulou C, Desai M, Jayatunga W, Joshi M, Parikh S.** Who is more likely to use doctor-rating websites, and why? A cross-sectional study in London. *BMJ open*. 2012; 2(6): e001493. DOI: 10.1136/bmjopen-2012-001493.
- [8] **Hanauer DA, Zheng K, Singer DC, Gebremariam A, Davis MM.** Public awareness, perception, and use of online physician rating sites. *Jama*. 2014; 311(7): 734-735. DOI: 10.1001/jama.2013.283194.
- [9] **McLennan S, Streh D, Meyer A, Kahrass H.** Public awareness and use of German physician ratings websites: Cross-sectional survey of four North German cities. *Journal of medical Internet research*. 2017; 19(11): e387. DOI: 10.2196/jmir.7581.
- [10] **Lin Y, Hong YA, Henson BS, Stevenson RD, Hong S, Lyu T, Liang C.** Assessing patient experience and healthcare quality of dental care using patient online reviews in the United States: mixed methods study. *Journal of Medical Internet Research*. 2020; 22(7): e18652. DOI: 10.2196/18652.
- [11] **Emmert M, Meier F, Heider AK, Dürr C, Sander U.** What do patients say about their physicians? An analysis of 3000 narrative comments posted on a German physician rating website. *Health policy*. 2014; 118(1): 66-73. DOI: 10.1016/j.healthpol.2014.04.015.
- [12] **Shah AM, Yan X, Shah SAA, Mamirkulova G.** Mining patient opinion to evaluate the service quality in healthcare: a deep-learning approach. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2020; 11: 2925-2942. DOI: 10.1007/S12652-019-01434-8.
- [13] **Jiang S, Street RL.** Pathway linking internet health information seeking to better health: a moderated mediation study. *Health Communication*. 2017; 32(8): 1024-1031. DOI: 10.1080/10410236.2016.1196514.
- [14] **Hotho, Nürnberger A, Paß G.** A Brief Survey of Text Mining, LDV Forum - GLDV *Journal for Computational Linguistics and Language Technology*. 2005; 20: 19-62. DOI: 10.21248/jlcl.20.2005.68.
- [15] **Păvăloaia V, Teodor E, Fotache D, Danileț M.** Opinion Mining on Social Media Data: Sentiment Analysis of User Preferences, *Sustainability*. 2019; 11: 4459. DOI: 10.3390/su11164459.
- [16] **Bespalov D, Bing B, Yanjun Q, Shokoufandeh A.** Sentiment classification based on supervised latent n-gram analysis". Proceedings of the 20th ACM international conference on Information and knowledge management (CIKM '11). Association for Computing Machinery. 2011; NY, USA, 375-382. DOI: 10.1145/2063576.2063635.
- [17] **Irfan R, King CK, Grages D, Ewen S, Khan SU, Madani SA, Kolodziej J, Wang L, Chen D, Rayes A, Tziritis N, Xu CZ, Zomaya AY, Alzahrani AS, Li H.** A Survey on Text Mining in Social Networks, Cambridge Journal, The Knowledge Engineering Review. 2015; 30(2): 157-170. DOI:10.1017/S0269888914000277.
- [18] **Patel P, Mistry K.** A Review: Text Classification on Social Media Data, *IOSR Journal of Computer Engineering*. 2015; 17(1): 80-84.

- [19] **Lee K, Palsetia D, Narayanan R, Patwary MdMA, Agrawal A, Choudhary AS.** Twitter Trending Topic Classification. In Proceeding of the 2011 IEEE 11 th International Conference on Data Mining Workshops, ICDW'11. 2011; pp. 251-258.
 - [20] **Kateb F, Kalita J.** Classifying Short Text in Social Media: Twitter as Case Study. *International Journal of Computer Applications*. 2015; 111(9): 1-12. DOI: 10.5120/19563-1321.
 - [21] **Theeramunkong T, Lertnattee V.** Multi-Dimension Text Classification, SIIT, Thammasat University, 2005. <http://www.aclweb.org/anthology/C02-1155> (03 October 2024). DOI: 10.1109/TITB.2004.832.
 - [22] **Sornlertlamvanich V, Pacharawongsakda E, Charoenporn T.** Understanding Social Movement by Tracking the Keyword in Social Media, in MAPLEX2015, 2015; Yamagata, Japan.
 - [23] **Kalabikhina I, Moshkin V, Kolotusha A, Kashin M, Klimenko G, Kazbekova Z.** Advancing Semantic Classification: A Comprehensive Examination of Machine Learning Techniques in Analyzing Russian-Language Patient Reviews. *Mathematics*. 2024; 12(4):566. DOI:10.3390/math12040566.
 - [24] **Kalabikhina I, Zubova E, Loukachevitch N, Kolotusha A, Kazbekova Z., Banin E, Klimenko G.** Identifying Reproductive Behavior Arguments in Social Media Content Users' Opinions through Natural Language Processing Techniques, *Population and Economics*. 2023; 7(2): 40-59. DOI: 10.3897/popecon.7.e97064.
-

About the authors

Irina Evgenievna Kalabikhina (b. 1969). Doctor of Economics, Professor. Head of the Population Department of the Faculty of Economics of Moscow State University. Editor-in-Chief of the journal "Population and Economics". Research areas are the relationship between demographic and economic development, applied demography, economics of inequality, determinants of fertility, social budgeting, population policy, policy in the interests of socio-demographic groups of the population. Author ID (Scopus): 57190138890; Researcher ID (WoS): N-3625-2013; ORCID: 0000-0002-3958-6630. ikalabikhina@yandex.ru.

Vadim Sergeevich Moshkin (b. 1990). Graduated from UISTU in 2012, PhD (2017), Associate Professor of the Information Systems Department of UISTU. Vice-Rector for Digital Transformation of UISTU. Vice-President of the Russian Association of Artificial Intelligence. The list of scientific works includes more than 150 articles in the field of intelligent knowledge processing, design automation, and the construction of applied intelligent systems. Author ID (RSCI): 762084; Author ID (Scopus): 57190250573; Researcher ID (WoS): L-3578-2016; ORCID: 0000-0002-9258-4909. v.moshkin@ulstu.ru ✉.

Anton Vasilievich Kolotusha (b. 1995). Candidate of Economic Sciences. 2nd category programmer of the of the Laboratory of Information and Analytical Resources of the Department of Population of the Economics Faculty of Moscow State University named after M.V. Lomonosov. The areas of research include applied demography, economics of inequality, social media analysis, population policy. Author ID (Scopus): 57223390271; ORCID: 0000-0002-3089-3327. tony_kol@mail.ru.

Maksim Igorevich Kashin (b. 2003). Student of the "Software Engineering" specialty of the Ulyanovsk State Technical University (UISTU). Junior researcher of the Research Department of the Department of Scientific Research and Innovation of UISTU. The areas of research include natural language analysis, decision making, machine learning, automation of complex business processes. m.kashin@ulstu.ru.

German Andreevich Klimenko. Postgraduate student of the Department of Population of the Economics Faculty of Moscow State University. The areas of research include applied demography, economics of inequality, social media analysis, and population policy. Author ID (Scopus): 57223391224; ORCID: 0000-0003-3045-7151. german89000@mail.ru.

Zarina Germanovna Kazbekova. Candidate of Economic Sciences. Researcher of the Department of Population of the Economics Faculty of Moscow State University. Graduate of the postgraduate program of the Department of Population. The areas of research include applied demography, economics of inequality, social media analysis, and population policy. Author ID (Scopus): 57934120000; ORCID: 0000-0002-7567-3184. kazbekova.zarina@bk.ru.

Received September 5, 2024. Revised December 2, 2024. Accepted December 18, 2024.



Метод разработки интеллектуальных тренажёров на основе онтологии предметной области

© 2025, О.А. Сычёв ✉, Н.А. Пенской, Г.В. Терехов

Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ), Волгоград, Россия

Аннотация

В учебных дисциплинах обучаемому необходимо усвоить много новых понятий, для чего требуется большой объём тренировки с обратной связью. Интеллектуальный тренажёр может позволить обучаемому научиться решать простые задачи и получать объяснения ошибок, а преподаватель на занятии может уделить время решению более сложных задач. В данной работе предлагается метод разработки интеллектуальных тренажёров на основе онтологии предметной области в виде веб-приложений, доступных для аудиторной и внеаудиторной работы. Использование формата *RDF* для представления задачи и модели предметной области позволяет осуществить логический вывод с помощью машины вывода *Apache Jena Reasoner*. Приведён пример разработки интеллектуального тренажёра для изучения порядка вычисления выражений с поддержкой языков программирования *C++*, *C#* и *Python*, способного объяснять ошибки, генерировать объясняющие подсказки и вести обучающий диалог с помощью наводящих вопросов. Тренажёр опробован при обучении бакалавров и магистров факультета электроники и вычислительной техники Волгоградского государственного технического университета. Большинство студентов отметили разработанный тренажёр как более полезный, чем обучающий тест. Тренажёр может применяться при самостоятельном изучении темы и при проведении занятий в рамках учебного процесса.

Ключевые слова: интеллектуальный тренажёр, обучение, онтология предметной области, порядок вычислений выражений, вводные курсы, программирование.

Цитирование: Сычёв О.А., Пенской Н.А., Терехов Г.В. Метод разработки интеллектуальных тренажёров на основе онтологии предметной области. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №1(55). С.67-81. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-67-81.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

При первоначальном обучении программированию освоение большого числа новых абстрактных понятий, необходимых для написания первой программы, может создавать большие трудности [1-4] и приводить к разочарованию в профессии [5]. На вводных курсах используются различные стратегии для помощи обучающимся: компьютерное тестирование, инструменты на основе мобильных приложений [6], инструментальные среды для создания электронных курсов [7] и т.п.

Отдельного внимания заслуживает та группа обучаемых, которые с трудом усваивают новые понятия. Преподавателю не всегда удаётся уделить достаточное внимание каждому обучаемому, поэтому получение обучаемыми обратной связи о причинах их ошибок целесообразно формализовать и автоматизировать.

Частыми случаями являются ошибки, связанные с освоением новых понятий предметной области (ПрО). В таких случаях полезной может быть учебная среда, в которой обучаемый, решая простые задачи, получает информацию о новых понятиях ПрО и связях между ними, а также объяснение своих ошибок каждый раз, когда он их совершает [8, 9]. Работа с такой учебной средой может быть не ограничена по времени, а опыт, полученный от самостоятельного решения задач, полезен для изучения новых тем.

Большинство программ для отображения работы программного кода показывает выполнение кода с множеством сложных аспектов, что может стать излишней когнитивной нагрузкой и помешать процессу обучения. Успех упражнений по моделированию визуального программирования зависит от согласования взаимодействия графического интерфейса с конкретными целями обучения [10], что легче сделать с помощью нескольких инструментов, подходящих для обучения по конкретным темам. В [11] отмечается, что некоторые обучающиеся считают системы онлайн-обучения слишком повторяющимся, что можно устранить с помощью адаптивного тестирования. Согласно [12], сложные программные анимации «подавляют» некоторых обучаемых, это приводит к выводу, что таким обучаемым нужны простые тренажёры для освоения базовых понятий.

Программы для обучения могут подсказать обучаемому следующее правильное действие, когда он ошибся или запросил подсказку. Например, такой подход можно встретить в предварительном типе вопроса *Preg* для системы дистанционного обучения *Moodle* [13], где в вопросах открытого типа обучаемый имеет возможность получить обратную связь в виде места первой ошибки и следующего правильного символа или лексемы, если поиск правильного продолжения ответа представляет сложности. Этого не всегда достаточно, т.к. обучаемые могут выполнить правильный шаг по подсказке, не понимая, почему он правильный. Подсказка следующего правильного шага позволяет успешно закончить упражнение, но не объясняет обучаемому причины его ошибки.

Полезной помощью обучаемому является обратная связь с сообщением о нарушенных правилах ПрО и о следующем правильном шаге с объяснением правил ПрО, которые делают этот шаг возможным. Такая обратная связь может быть основана на парадигме с ограничениями, где каждая ошибка связана с нарушением определённого ограничения. Такой подход был предложен для автоматизации изучения понятий ПрО в [14].

Существуют учебные среды, пользоваться которыми можно как при взаимодействии с преподавателем, так и при самостоятельной подготовке. К ним можно отнести «КЛИОС» [15], которая предназначена для изучения русского языка, а также интеллектуальную среду поддержки разработки интегрированных экспертных систем «АТ-ТЕХНОЛОГИЯ» [16]. В этой среде комментарии к решаемой задаче, подсказки и объяснения полученных результатов задаются преподавателем при создании задачи, что делает создание задач трудоёмким, а качество обучения зависимым от конкретной задачи.

Цель работы - улучшение понимания обучаемым содержания понятий ПрО, используя интеллектуальную обучающую среду на основе онтологии ПрО, содержащей аксиоматическое определение понятий ПрО. Такая среда (интеллектуальный тренажёр, ИТ) сможет генерировать правильные ответы при решении простых задач об изучаемых понятиях в совокупности с поясняющей обратной связью об ошибках обучаемого.

1 Построение ИТ на основе онтологии ПрО

Для разработки предлагаемого подхода выбрана задача определения порядка вычисления выражения, записанного на языке программирования. Эта задача необходима для правильного понимания и написания кода и служит основой для более сложных задач (например, проверки типов данных). Обратная связь должна сообщить обучающемуся об ошибке и дать объяснение причины. Для создания поясняющей обратной связи используются декларативные модели, которые выражают логику принятия решений без описания её алгоритма. Это позволяет определить все правильные решения. Важным является то, что в декларативной модели неправильные решения вызовут ошибки в условиях, которые определяют правильность ответа, при этом конкретное нарушенное условие позволяет определить тип ошибки.

Для продуктивного изучения программирования важен правильный порядок изучения понятий и выполнения задач для проверки отдельных понятий и их сочетаний [17]. Навык определения порядка вычисления выражений относится к базовым и необходим в самом начале изучения программирования. От его усвоения зависит понимание следующих тем, особенно включающих сложные типы данных (массивы, объекты, указатели и ссылки).

В современных языках программирования задача определения порядка вычисления выражения не является простой. Языки программирования имеют несколько уровней приоритета операций и содержат такие понятия, как ассоциативность операций и отношения «упорядочено до» и «упорядочено после». На вводных курсах по программированию большая часть аудиторного времени, как правило, уделяется более сложным темам, таким как изучение циклов и методов отладки, при этом тема вычисления выражений остаётся недостаточно раскрытой. Например, для ответа на вопрос: «Может ли на текущем шаге быть выполнен оператор X ?», обучаемому необходимо проанализировать до четырёх ветвей рассуждений, определяя, полностью ли выполнятся левый, центральный и правый операнды X , и есть ли какие-либо операторы со строгим порядком вычисления своих операндов, блокирующие вычисление X . При анализе каждой ветви требуется ответить на несколько вопросов. Анализ последней ветви включает два рекурсивных вопроса, подразумевающих возможность решения той же задачи для определения операндов операторов со строгим порядком вычисления.

Построение ИТ включает:

- 1) разработку онтологической модели (ОМ) изучаемой ПрО, учитывающей возможные ошибки в процессе решения задач;
- 2) составление шаблонов обратной связи для обучаемого в соответствии с видами ошибок;
- 3) разработку интерфейсов обучаемого (минимизируя количество действий, необходимых для ввода ответа) и преподавателя (для ввода задач), в виде веб-интерфейсов;
- 4) разработку программного кода, связывающего интерфейсы пользователей с ОМ.

ОМ ПрО, используемая для разработки ИТ, должна удовлетворять условиям [14]. Принципиальным компонентом модели является система правил вывода для проверки решения задачи обучаемым и поиска смысловых ошибок в нём. ОМ может дополняться системой правил для пошагового решения задачи, позволяющей генерировать подсказки, если обучаемый затрудняется продолжить решение. Эти правила могут быть запущены на машине вывода для получения результатов. ОМ учебной задачи включает:

- объекты ПрО;
- классы объектов (категории или типы объектов ПрО), которые могут быть связаны отношением наследования;
- свойства классов (общие для всех объектов этого класса) и их объектов;
- отношения (связи) между объектами.

Для представления данных для машинного вывода используется стандарт *Resource Description Framework (RDF)*. Единицей представления информации в *RDF* является триплет $T = \langle S, P, O \rangle$, который включает три компонента: субъект S , предикат P и объект O . Множество триплетов представляют собой базу знаний (БЗ) или *RDF*-граф, которые выражают факты об объектах в моделируемой ПрО. Такой граф обычно рассматривается как совокупность: словаря, который служит для описания конкретных данных; свойств классов и свойств операторов. Словарь является частью графа знаний и описывает систему абстрактных понятий, например классы объектов и их возможные связи, и применяется для описания другой части графа - экземпляров, которые представляют конкретные сущности в моделируемой ПрО. Примером универсальной машины вывода является *Apache Jena* [18].

В качестве альтернативы можно использовать деревья мыслительных процессов как расширение деревьев решений $G = (V, L)$ [19]. Вершины V в таком дереве соответствуют ша-

гам в решении задачи, а рёбра L - результатам выполнения шагов. С их помощью можно описать процесс решения задачи для моделируемой ПрО. Поскольку для эффективной работы ИТ необходимы два набора правил (для решения задачи и для нахождения ошибок), то необходимо построить два дерева. Дерево для решения задачи содержит один вид узлов-листьев: позитивный (зелёный) узел с перечнем действий над графом знаний для запоминания найденного шага решения. Каждому такому узлу ставится в соответствие один вид подсказки, который параметризуется найденными данными. Дерево для проверки ответа и нахождения ошибок содержит два вида листьев: зелёные (по данной ветке ответ не содержит ошибок) и красные (обнаружена ошибка). Перечень красных узлов составляет основу списка возможных видов ошибок.

Составление системы правил вывода для определения ошибок позволяет классифицировать виды ошибок; в процессе поиска ошибки находятся данные, идентифицирующие объекты, связанные с ошибкой, которые необходимо включить в сообщение. На их основе составляются шаблоны обратной связи для обучаемого, которые используются для генерации объясняющих сообщений об ошибках. Разрабатываются необходимые шаблоны для вывода информации об объектах, значениях их свойств и т.д. Для набора правил решения задачи составляются шаблоны подсказок, объясняющих, почему в данных обстоятельствах подсказанная часть решения задачи является правильной.

Для ИТ необходимо разработать предметно-зависимый интерфейс моделируемой ПрО, который позволит наглядно отображать задачу и вводить результат решения в виде минимального количества действий. Поскольку задания, которые допускают интеллектуальную обратную связь, должны иметь закрытое множество ответов [14], то эффективность интерфейса обучаемого можно измерять количеством воздействий на компьютерную мышь, необходимых для решения задачи. Интерфейс преподавателя должен максимально упрощать ввод задачи и осуществлять перевод её условия в формат *RDF*, при этом минимизируя необходимость ознакомления с новыми языками записи заданий.

Современные ИТ, доступные через сеть Интернет, представляют собой клиент-серверные приложения, где взаимодействие между компонентами тренажёра может быть организовано посредством *HTTP Rest API* (см. рисунок 1).

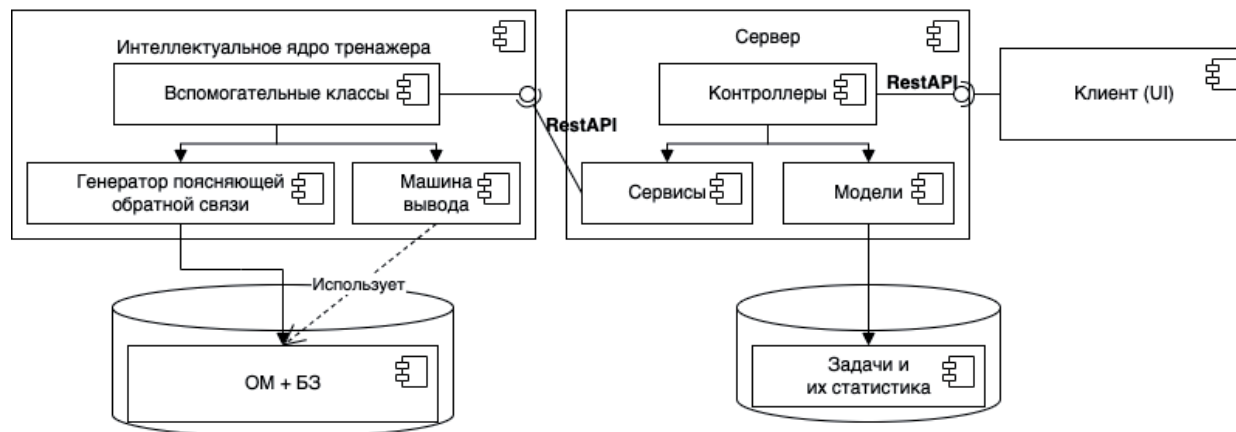


Рисунок 1 – Диаграмма компонентов интеллектуального тренажёра

Одним из архитектурных шаблонов, применяемых при создании веб-приложений, является модель-представление-контроллер (*Model-View-Controller, MVC*). На нём основаны веб-фреймворки *Ruby On Rails* [20], *Laravel* [21] и др. Серверная часть должна содержать сервисы для доступа к программной машине вывода: программный интерфейс приложения (*API, Application Programming Interface*), контроллеры для обработки запросов от клиента, модели

для взаимодействия с базой данных (БД), шаблоны для генерации пользовательского интерфейса и данных для клиентского компонента, например в виде формата *JSON* (*JavaScript Object Notation*). Правила ПрО хранятся в БЗ (например, в формате *XML*), отдельно в БД хранятся созданные преподавателями задачи и статистика их решения.

На каждом шаге решения задачи клиентская часть должна обновлять модель ответа обучаемого - представлять ответ обучаемого в виде *JSON* и отправлять его на сервер посредством *AJAX*-запроса (*Asynchronous Javascript and XML*, асинхронный *JavaScript* и *XML*). Вспомогательные классы интеллектуального ядра тренажёра получают и анализируют запрос, вызывают машину вывода для проверки полученной части ответа. Если текущий шаг решения задачи содержит ошибку, генератор поясняющей обратной связи создаст подсказку на естественном языке на основе дополнительной информации из ответа машины вывода.

2 ИТ определения порядка вычисления выражений

ИТ¹ разработан с использованием описанного в разделе 1 метода. ОМ выражения на языке программирования разработаны для каждого поддерживаемого тренажёром языка. Каждая ОМ состоит из двух классов верхнего уровня - «Токен» и «Элемент». Дочерними классами для класса «Элемент» являются «Оператор» и «Операнд». В каждом языке программирования можно выделить множество свойственных ему операторов, которые в ОМ являются подклассами класса «Оператор». Для языка *C++* класс «Оператор» имеет 55 подклассов, отражающих конкретные операторы языка программирования. Конкретные операторы, встречающиеся в выражении на языке программирования, могут рассматриваться в качестве экземпляров классов операторов, например класса «Сложение». Пример фрагмента иерархии классов ОМ, составленный с помощью редактора *Protege* для выражения на языке программирования *C++*, представлен на рисунке 2.

Представление выражения на языке программирования в качестве онтологии включает задачу систематизации отношений. Объект класса «Элемент» должен быть связан с одним или несколькими объектами класса «Токен», что отражает отношение «имеет токен». Взаимное расположение токенов в выражении отражается при помощи отношения «находится непосредственно слева от» и его производных отношений. Связь между объектами классов «Элемент» и «Оператор» задаётся при помощи отношения «является операндом». Выделенные в ходе разработки ОМ отношения представлены на рисунке 3.

Первая версия ИТ разработана с использованием подготовленных правил для машины вывода [22] и переработана с использованием описанного в данной статье метода. Применение дерева мыслительного процесса позволило добавить возможность задавать обучаемому

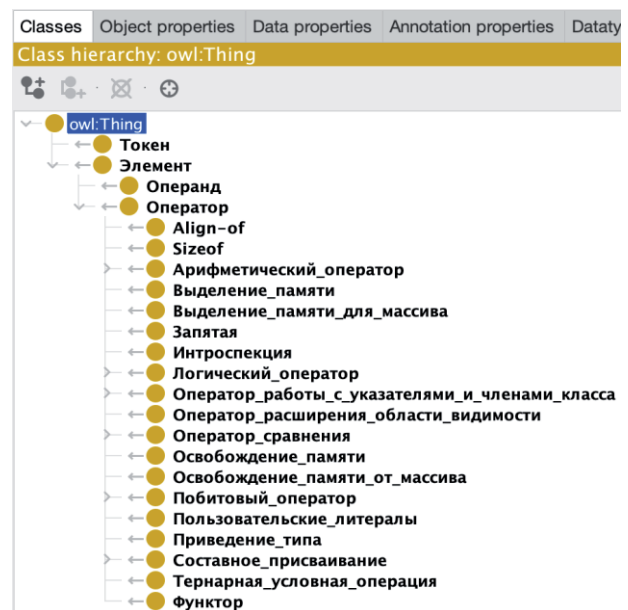


Рисунок 2 – Верхний уровень иерархии онтологии выражения на языке программирования на примере *C++* (выполнено в редакторе *Protege*)

¹ Интеллектуальный тренажер HOWITWORKS:EXPRESSIONS. Сычёв О.А., Пенской Н.А., Терехов Г.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Номер свидетельства: RU 2022685372. 2022 Номер заявки: 2022684973.

наводящие вопросы, когда он совершил ошибку при выполнении упражнения, поскольку дерево явно описывает желаемый ход рассуждения обучаемого. Вопросы генерируются на основе шаблонов, приписанных к узлам дерева мыслительного процесса, и словарей. Это даёт возможность определить и исправить ошибки обучаемого, если сообщений от ИТ, связанных со сделанными им ошибками, оказывается недостаточно. В связи с особенностью ПрО составлено одно дерево мыслительного процесса, поскольку существует один способ решения этой задачи (перебор возможных вариантов и выбор подходящих).

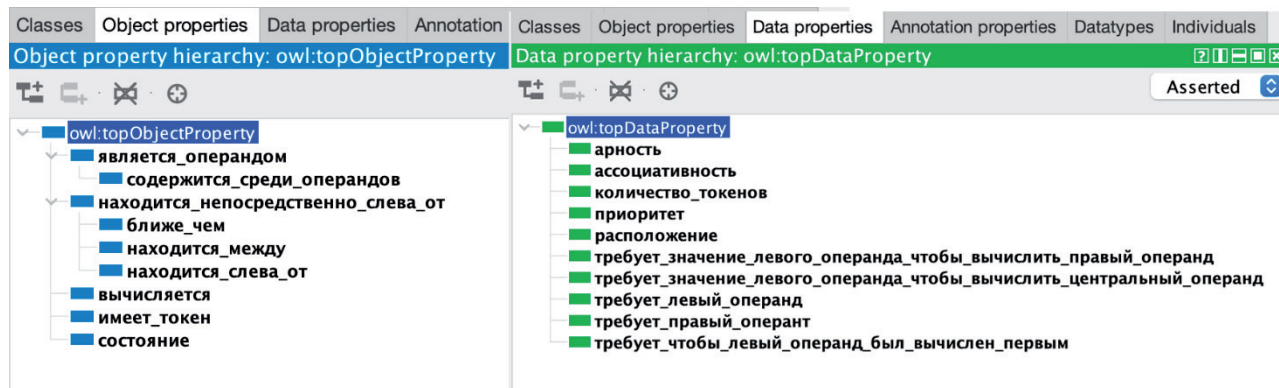


Рисунок 3 – Типы отношений для выражения на языке программирования на примере C++ (выполнено в редакторе *Protege*)

Дерево мыслительного процесса основано на описании нескольких словарей: классы объектов, свойства класса, свойства объекта, связи, вопросы и действия. Классы определяют виды объектов, которые содержатся в формулировке упражнения и в его решении. Свойства класса - данные, значения которых одинаковы для всех объектов данного класса. Свойства объекта - данные, значения которых могут отличаться для разных объектов одного и того же класса. Связи предназначены для соединения двух объектов, на их основе можно вычислять новые связи. Словарь вопросов и словарь действий содержат виды вопросов и действий для конкретного дерева.

Дерево мыслительного процесса для задачи порядка вычисления выражения имеет четыре ветви (B1-B4), которые позволяют получить ответы на соответствующие вопросы: были ли вычислены полностью вложенные операторы (B1); были ли вычислены полностью операторы, являющиеся операндами слева (B2) и справа (B3); не влияют ли на вычисление вышестоящие операторы со строгим порядком вычисления операндов (B4). Разработанное дерево содержит 23 узла вопросов, 7 узлов действий, 3 узла ветвления, 2 узла цикла, 22 зелёных узла-листа (обозначающих корректность решения) и 12 красных (обозначающих различные способы сделать ошибки). Например, необходимые словари для рассмотрения ветви B2, которая определяет текущий конкурирующий оператор слева и взаимный порядок вычисления выбранного обучаемым оператора и конкурирующего оператора, показаны в таблице 1.

Для построения рассматриваемой ветви дерева необходимо определить порядок действий, чтобы ответить на вопрос: может ли в данный момент на текущем шаге вычислен выбранный оператор? Пусть XI - токен, который выбран на текущем шаге решения задачи, X - оператор, который соответствует выбранному токenu. Если выбранный оператор требует вычисления левого операнда, то в исходном выражении необходимо найти конкурирующий оператор Y - не вычисленный слева от X оператор, удовлетворяющий условию $Y : является(Y, оператор) \wedge состояние(Y, 'не_вычислен') \wedge слева_от(Y, X)$, и соответствующий ему слева от XI токен $YI : является(YI, токен) \wedge относится_к(YI, Y) \wedge слева_от(YI, XI)$. Далее возможны четыре ситуации: либо Y охватывает X (B2.1), либо X находится в скобках, в кото-

рых нет Y (B2.2), либо, наоборот, Y в скобках, в которых нет X (B2.3), либо скобок вовсе нет (B2.4). Если для первых двух ситуаций (B2.1, B2.2) ответ положительный, то X может быть вычислен на текущем шаге решения задачи; в третьей ситуации (B2.3) положительный ответ означает, что X вычислен быть не может; в четвёртой ситуации (B2.4) решение принимается на основе приоритетов X и Y , а в случае одинаковых приоритетов - на основе ассоциативности X . Рассмотренная ветвь решения показана на рисунке 4.

Для каждого красного узла дерева составлены шаблоны обратной связи. Например, если на текущем шаге решения задачи из двух операторов с одинаковым приоритетом ошибочно выбран находящийся правее оператор до вычисления оператора, находящегося левее, шаблон обратной связи для такой ошибки имеет вид: « $\{val('X', 'u')\}$ не может быть вычислен, поскольку сначала должен быть вычислен $\{val('Y', 'u')\}$ слева от него - эти операторы имеют одинаковый приоритет и вычисляются слева направо (левоассоциативны)». В

Таблица 1 – Выдержка из словарей необходимых для рассмотрения ветви B2

Название словаря	Содержимое словаря
Действия	Найти <ограничения> <класс объекта>
Классы	- токен - элемент - операнд - оператор - скобки (элемент)
Свойства класса	- количество токенов (элемент), целое число: 1-2 - требует левый операнд (оператор), логическое: да/нет - требует правый операнд (оператор), логическое: да/нет - требует внутренний операнд (оператор), логическое: да/нет - приоритет (оператор), линейная шкала: зависит от языка - ассоциативность (оператор), перечисляемое: левая, правая, не ассоциативная
Свойства объекта	- состояние (элемент), перечисляемое: не вычислено, вычислено, использовано, пропущено - вычисляется (элемент), перечисляемое: да, нет
Отношения между объектами	- <элемент> имеет токен <токен> (<токен> относится к <элементу>) - <токен1> находится слева (меньше)/справа(больше) <токен2> - <токен1> находится между <токен2> и <токен3> - <токен1> ближе <токен2> чем <токен3> <элемент> является операндом <оператора>

данном шаблоне « $\{val('X', 'u')\}$ » и « $\{val('Y', 'u')\}$ » являются подстановками, на место которых при генерации обратной связи должна быть добавлена информация о названии оператора и его позиции для поиска соответствующего оператора в исходном выражении. Всего разработанный ИТ содержит 8 шаблонов обратной связи для ошибок, 14 для подсказок, 331 для наводящих вопросов на русском языке, столько же на английском.

ИТ работает в режимах использования обучаемым и преподавателем. Для создания упражнения необходимо задать выражения (в виде строки, разделяя операторы и операнды пробелами) на одном из поддерживаемых ИТ языков программирования (см. рисунок 5).

Можно ограничить количество доступных обучаемому подсказок или полностью их отключить в зависимости от назначения упражнения: обучение или проверка знаний. После создания упражнения преподавателю доступен постоянный адрес (*URL*) этого упражнения, который можно отправлять обучаемым. Доступен просмотр статистики по выполнению созданных преподавателем упражнений. Преподавателю не нужно вводить правильные ответы, ИТ находит их, используя БЗ ПрО и машину вывода.

Работа с задачей начинается с обработки её условия. После разделения выражения, являющегося условием задачи, на токены машина вывода по правилам ПрО, хранящимся в БЗ, строит дерево выражения, указывающее операнды операций. На основе дерева, добавляя информацию о зависимости порядка выполнения операций, для операций со строгим порядком вычисления операндов строится граф отношения «должен быть вычислен перед», представляющий собой ориентированный ациклический граф, который описывает все правильные порядки вычисления и причины всех зависимостей, которые будут использованы для генерации поясняющей обратной связи.

При проверке ответа обучаемого ошибка определяется как нарушение отношения «должен быть вычислен перед» в графе, а тип правила ПрО, который использовался при генерации связи, указывает на необходимое

объяснение. Подсказки могут быть сгенерированы с помощью графа путём выбора операции, вычислению которой ничто не препятствует; объяснение в этом случае опирается на причины, почему соседние невычисленные операции не мешают вычислять данную операцию.



Рисунок 4 – Пример ветви дерева мыслительного процесса для определения «был ли вычислен конкурирующий оператор слева»

Для решения задачи необходимо выбирать операции выражения в том порядке, в котором они вычисляются. Если операция выбрана правильно, она выделяется зелёным фоном и помечается порядком её выполнения в выражении, чтобы облегчить дальнейшее решение задачи. Если операция выбрана раньше, чем она может быть вычислена, она выделяется красным цветом, а под выражением отображаются сообщения с поясняющей обратной связью (см. рисунок 6). Под каждой операцией указана её позиция в выражении и в поясняющих сообщениях так, что определить, о какой конкретно операции идёт речь, не составит труда. ИТ распознаёт случаи, когда выражение имеет несколько возможных порядков вычисления.

ИТ может определить шесть видов ошибок:

- 1) вычисление операции первой с более низким приоритетом;
- 2) вычисление двух операций с одинаковым приоритетом и левой ассоциативностью справа налево;

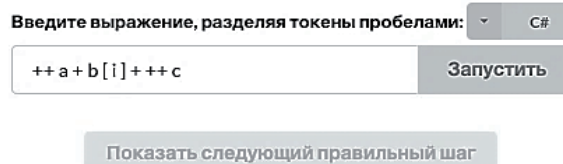


Рисунок 5 – Пример создания упражнения в интерфейсе преподавателя

- 3) вычисление двух операций с одинаковым приоритетом и правой ассоциативностью слева направо;
- 4) вычисление операции с центральным операндом (т.е. операции с двумя токенами, между которыми располагается её операнд, например, квадратных скобок, вызова функции или условной операции) до завершения вычисления операций внутри неё;
- 5) вычисление операции, имеющей операнд в скобках, до полного вычисления подвыражения в этих скобках;
- 6) неправильный порядок вычисления операндов операции со строгим порядком вычисления операндов (например, операции логического ИЛИ, логического И, запятая и условная операция в языке программирования C++ всегда заканчивают вычисление своего левого операнда до начала вычисления остальных операндов).

Для каждой ошибки ИТ генерирует сообщение на основе шаблона с позициями всех соответствующих операторов (см. рисунок 6). Ошибки с номерами 4 и 5 являются похожими с точки зрения формальной модели ПрО, но для большинства начинающих программистов такое определение является слишком сложным, поэтому сообщения об ошибках для них выводятся разными. На рисунке 6 первая и вторая выбранные операции (операция «++» в позиции 1 и квадратная скобка в позиции 5) оказались правильными, но затем ошибочно выбрана операция «+» в позиции 8. Два оставшихся оператора должны быть вычислены до неё по разным причинам: операция «++» в позиции 9 должна быть вычислена ранее, потому что её приоритет выше чем у «+», а операция «+» в позиции 3 должна быть вычислена перед операцией «+» в позиции 8, потому что операция «+» является левоассоциативной. ИТ показывает обучаемому все причины, чтобы он мог проанализировать свою ошибку.

Полезной функцией ИТ является отображение следующего правильного шага с пояснением, почему этот шаг является правильным. Отсутствие подсказок может приводить к попытке решить задачу перебором возможных вариантов, что не является конструктивным для освоения материала. Для получения подсказки обучаемый должен выбрать соответствующую кнопку. Поясняющее сообщение подсказки принимает во внимание две ближайших операции, которые ещё не были вычислены (слева и справа от той, которая была выбрана) и описывает, почему выбранная операция может быть вычислена на текущем шаге.

Пример использования подсказки показан на рисунке 7 - в данном случае операция «+» справа ещё не должна выполняться, потому что операция «+» является левоассоциативной. Ситуация до выбора подсказки имеет два правильных варианта следующего шага: операция «+» в позиции 3 и операция «++» в позиции 9.

Выбирайте операторы в порядке их выполнения: C#

++/1 1	a 2	+ 3	b 4	[/2 5	i 6	] 7	+/3 8	++ 9	c 10
-----------	--------	--------	--------	----------	--------	--------	----------	---------	---------

операция ++ в позиции 9 должна выполняться раньше, чем операция + в позиции 8, потому что операция ++ имеет более высокий приоритет

операция + в позиции 3 должна выполняться раньше, чем операция + в позиции 8, потому что операция + имеет левую ассоциативность и вычисляется слева направо

Показать следующий правильный шаг

Рисунок 6 – Пример поясняющей обратной связи в интерфейсе обучаемого после совершения ошибки

Выбирайте операторы в порядке их выполнения: C#

++/1 1	a 2	+/3 3	b 4	[/2 5	i 6	] 7	+ 8	++ 9	c 10
-----------	--------	----------	--------	----------	--------	--------	--------	---------	---------

Оператор + на позиции 3 выполняется

после оператора ++ на позиции 1 : Оператор + имеет более низкий приоритет , чем оператор ++
после оператора [на позиции 5 : Оператор + имеет более низкий приоритет , чем оператор [

Показать следующий правильный шаг

Рисунок 7 – Пример использования подсказки в интерфейсе обучаемого при решении задачи

При совершении ошибки ИТ предлагает помочь разобраться в её причинах с помощью наводящих вопросов. Модуль наводящих вопросов реализован в виде чат-бота, который ведёт диалог с обучаемым. Тексты наводящих вопросов генерируются на основе шаблонов, аналогичных шаблонам обратной связи. Шаблоны соответствуют узлам дерева мыслительных процессов и переходам между ними, т.е. проверяются как знания метода решения задачи (отражённые в переходах дерева), так и фактические знания по теме (выполнение действий в узлах). Обучаемому предлагается на выбор несколько вариантов ответа. В зависимости от вопроса в качестве ответа можно выбрать один вариант из предложенных либо выбрать несколько вариантов. ИТ анализирует полученный ответ и может продолжить диалог и задать следующий наводящий вопрос или дать итоговый вывод. В любой момент можно завершить диалог с чат-ботом и продолжить решать задачу.

Для ошибочной ситуации, показанной на рисунке 6, вариант диалога, когда обучаемый верно ответил на вопрос чат-бота, может выглядеть, как показано на рисунке 8. В этом случае ИТ оценивает данный ответ на наводящий вопрос как верный и сообщает об этом. Наводящие вопросы и ответы на них генерируются на основе соответствующих узлов дерева мыслительного процесса (первый вариант ответа на рисунке 8 соответствует узлу с проверкой ассоциативности на рисунке 4 и т.д.).

Помочь разобраться в причинах ошибки?

Давайте разберемся.

Какой оператор может мешать выполнению оператора + на позиции 8 слева?

оператор + на позиции 3

Верно.

Почему вы считаете, что левый операнд оператора + на позиции 8 не требует дальнейших вычислений?

Из-за ассоциативности оператора + и оператора +

Из-за соотношения приоритетов оператора + и оператора +

Из-за роли скобок в выражении

Потому что слева от оператора + на позиции 8 находятся только вычисленные операторы

Потому что оператор + на позиции 8 не требует левого операнда

Спасибо, я разобрался

Рисунок 8 – Пример верного ответа на наводящий вопрос

Помочь разобраться в причинах ошибки?

Почему вы считаете, что левый операнд оператора + на позиции 8 не требует дальнейших вычислений?

Потому что слева от оператора + на позиции 8 находятся только вычисленные операторы

Давайте разберемся.

Мы уже говорили о том, что слева от оператора + на позиции 8 есть потенциально мешающий оператор - это оператор + на позиции 3.

Как определяется порядок вычисления двух конкурирующих операторов?

Необходимо рассмотреть влияние скобок на взаимодействие между оператором + на позиции 8 и оператором + на позиции 3.

Необходимо сравнить приоритеты оператора + и оператора +

Необходимо проверить, какова ассоциативность оператора + и оператора +

Правый оператор всегда выполняется первым

Левый оператор всегда выполняется первым

Спасибо, я разобрался

Рисунок 9 – Пример неверного ответа на наводящий вопрос

Если обучаемый неверно ответил на наводящий вопрос, ИТ распознает это и генерирует следующий наводящий вопрос в зависимости от совершённой ошибки (см. рисунок 9). Предложенные ИТ варианты ответов соответствуют новому вопросу.

Разработанный программный код связывает интерфейс пользователя с ОМ. ИТ представляет собой веб-приложение, базирующееся на веб-фреймворке *Ruby On Rails*, а интерфейс разработан с использованием библиотеки *Semantic UI*. Разработанное приложение доступно в сети Интернет. Клиент обменивается с сервером данными в формате *JSON* посредством *AJAX-запросов*. Созданные упражнения и статистика

их решений хранятся на сервере в БД *PostgreSQL*.

3 Оценка эффективности разработанного ИТ

Для оценки эффективности разработанного ИТ при изучении программирования проведён эксперимент среди бакалавров и магистров факультета информатики и вычислительной техники Волгоградского государственного технического университета. В эксперименте приняли участие 30 студентов. Участникам было предложено самостоятельно воспользоваться обучающим тестом и ИТ в любом порядке. Обучающий тест содержал 12 вопросов с различными по сложности выражениями на языке C++, где необходимо было выбрать следующий невыполненный оператор из списка предложенных. Для сравнения с обучающим тестом были предоставлены десять упражнений в ИТ, содержащих выражение на языке C++.

Первые пять задач в ИТ простые:

$(a + b) * c + d$ (требуется только знание приоритетов операций),

$(a + b) * c * d$ (требуется знание приоритетов и ассоциативности операций),

$a = b = 0$ (вводит правоассоциативную операцию),

$a < 0 \ \&\& \ b > 0$ (операция логического И имеет строгий порядок вычисления операндов),

$a < 0 ? b = 0 : c = 0$ (тернарная условная операция).

Следующие пять выражений сложные:

$* ++ a - b$ (вводит унарный оператор разыменования указателя и префиксный инкремент),

$a ++ \parallel b > 0 \ \&\& \ c -- \parallel d < c$ (требуется знать порядок вычисления логических операторов),

$a = \& b \rightarrow c$ (требуется знать приоритеты операторов обращения по адресу и взятия адреса),

$! * a ++$ (требуется знать порядок вычисления префиксных и постфиксных унарных операторов),

$a > b \parallel c < d \ \&\& \ (e - f > g \parallel h > e - f)$ (требуется знать порядок вычисления логических операторов).

Студенты успешно выполнили все упражнения без помощи преподавателя. После выполнения упражнений студентам было предложено заполнить анкету. Большинство из участников отметили разработанный ИТ более полезным (см. рисунок 10) и хотели бы использовать аналогичные инструменты при изучении других тем. К положительным сторонам разработанного ИТ студенты отнесли возможность получить поясняющую обратную связь сразу после совершения ошибки. Основными пожеланиями участников эксперимента было добавление в ИТ теоретического материала по изучаемым понятиям ПрО.

Какой способ, на ваш взгляд, лучше подходит для самостоятельного изучения темы "Порядок вычисления выражений"?

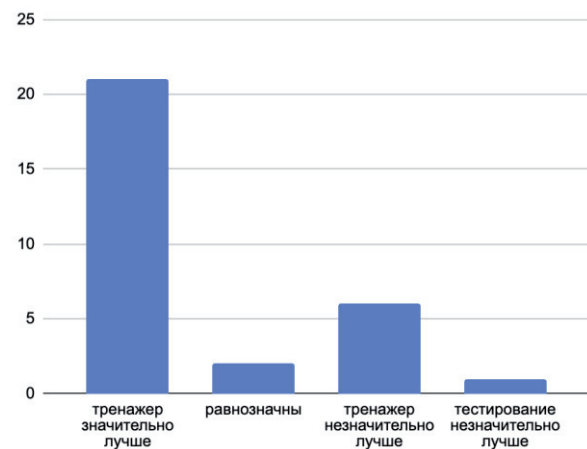


Рисунок 10 – Отзывы обучающихся о работе с интеллектуальным тренажёром

Заключение

Разработанный ИТ может быть полезен изучающим программирование. В текущей версии ИТ поддерживает освоение выражений на языках программирования C++, C# и Python. Достоинством ИТ является анализ каждого шага решения задачи и генерация объяснений совершённых обучающимися ошибок; доступны подсказки следующего правильного шага, если обучаемый находится в затруднении.

Метод построения ИТ на основе онтологии ПрО позволяет разработать тренажёр, который автоматически генерирует поясняющую обратную связь обучаемому в зависимости от правил ПрО, нарушенных в процессе решения задачи. Применение деревьев мыслительного процесса при разработке ИТ позволило добавить возможность задавать обучаемому наводящие вопросы, когда он совершил ошибку. Система наводящих вопросов и переходов между

ними генерируется из ОМ решения задачи, что освобождает разработчиков тренажера от ручной работы по составлению вопросов.

Изложенный в статье метод может быть использован для разработки ИТ для различных ПрО. Помимо описанного в статье разработаны тренажеры по изучению таких тем, как управляющие операторы, выражения доступа к данным и области видимости объектов.

Авторский вклад

Сычёв О.А. - концептуализация, управление проектом, проектирование и тестирование ПО, валидация данных, редактирование текста статьи. Пенской Н.А. - разработка ПО, сбор и верификация данных, редактирование текста статьи. Терехов Г.В. - разработка и тестирование ПО, сбор данных, визуализация, написание исходного текста статьи.

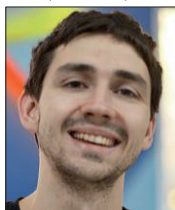
Список источников

- [1] **Papadakis S., Kalogiannakis M., Zaranis N.** Developing fundamental programming concepts and computational thinking with scratchjr in preschool education: a case study. *International Journal of Mobile Learning and Organisation*. 2016; 10(3): 187–202. DOI:10.1504/IJMLO.2016.077867.
- [2] **Rahmat M., Shahrani S., Latih R.** Major Problems in Basic Programming that Influence Student Performance. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2012; 59: 287–296. DOI:10.1016/j.sbspro.2012.09.277.
- [3] **Basu S., Biswas G., Sengupta P., Dickes A., Kinnebrew J.S., Clark D.** Identifying middle school students' challenges in computational thinking-based science learning. *Research and Practice in Technology Enhanced Learning*. 2016; 11(1): 1-35. DOI:10.1186/s41039-016-0036-2.
- [4] **Ramabu T., Sanders I., Schoeman M.** Manipulatives for Teaching Introductory Programming to Struggling Students: A Case of Nested-decisions. In *Proceedings of the 13th International Conference on Computer Supported Education (CSEDU 2021)*. 2021; 1: 505–510. DOI: 10.5220/0010477505050510.
- [5] **Pierrakeas C., Xenos M., Panagiotakopoulos C., Vergidis D.** A comparative study of dropout rates and causes for two different distance education courses. *International Review of Research in Open and Distance Learning*. 2004; 5(2): 1-15. DOI: 10.19173/irrodl.v5i2.183.
- [6] **Хаблюева С.Р., Каргиева З.К.** Анализ мобильных технологий для организации учебного процесса школ. *Вестник Северо-Осетинского государственного университета имени К. Л. Хетагурова*. 2022; (4): 190-197.
- [7] **Соловов А.В.** Электронное обучение: проблематика, дидактика, технология. Самара: «Новая техника», 2006. 462 с.
- [8] **Mitrovic A., Koedinger K.R., Martin B.** A comparative analysis of cognitive tutoring and constraint-based modeling. *Lecture Notes in Artificial Intelligence* (Subseries of Lecture Notes in Computer Science). 2003;2702: 313–322. DOI: 10.1007/3-540-44963-9_42.
- [9] **Aleven V., Koedinger K.** An effective metacognitive strategy: Learning by doing and explaining with a computer-based Cognitive Tutor. *Cognitive Science*. 2002; 26(2): 147–179. DOI: 10.1207/s15516709cog2602_1.
- [10] **Sorva J., L'önnberg J., Malmi L.** Students' ways of experiencing visual program simulation. *Computer Science Education*. 2013; 23(3): 207–238. DOI:10.1080/08993408.2013.807962.
- [11] **Kollmansberger S.** Helping students build a mental model of computation. In *Proceedings of the Fifteenth Annual Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education, ITiCSE '10*. 2010;15:128–131. DOI: 10.1145/1822090.1822127.
- [12] **Levy R., Ben-Ari M., Uronen P.** The jeliot 2000 program animation system. *Computers & Education*. 2003; 40(1): 1–15. DOI: 10.1016/S0360-1315(02)00076-3.
- [13] **Сычёв О.А., Стрельцов В.О.** Использование шаблонов в виде регулярных выражений в тренировочных и контрольных тестовых вопросах с открытым ответом. *Открытое образование*. 2015; 2(109): 38-45. DOI: 10.21686/1818-4243-2015-2(109-38-45).
- [14] **Углев В.А., Сычёв О.А., Аникин А.В.** Интеллектуальный анализ цифрового следа при оценке контрольно-измерительных материалов для поддержки принятия решений в образовательном процессе. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. 2022; 15(1): 121-136. DOI: 10.17516/1999-494X-0378.
- [15] **Горисев С.А., Койнов А.В., Куземчик В.Д.** Интеллектуальный лингвопроцессорный комплекс "КЛИОС" для обучения РКИ. *Современные проблемы науки и образования*. 2013; 6: 23-31.
- [16] **Рыбина Г.В.** Интеллектуальная технология построения обучающих интегрированных экспертных систем: новые возможности. *Открытое образование*. 2017; 21(4): 43-57. DOI: 10.21686/1818-4243-2017-4-43-57.

- [17] **Hosseini R., Brusilovsky P.** Javaparser: A fine-grain concept indexing tool for java problems. In Workshops Proceedings of AIED. 2013; 1009: 60–63.
- [18] **McBride B.** Jena: a semantic web toolkit. *IEEE Internet Computing*. 2002; 6(6): 55–59. DOI: 10.1109/MIC.2002.1067737.
- [19] **Крыгин А.И., Гумеров М.Р., Москаленко Н.А., Сычёв О.А.** Фреймворк для разработки интеллектуальных обучающих систем на основе моделей предметных областей в виде деревьев решений. *Двадцать первая Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ-2023)*. 2023; Т.2: 206–217.
- [20] **Хотелов Д.А., Радыгин В.Ю., Меркушева А.С.** Разработка системы мониторинга безопасности для кластера информационных систем, базирующихся на платформе RUBY ON RAILS. *Безопасность информационных технологий*. 2018; 25(3): 88–100. DOI: 10.26583/bit.2018.3.09.
- [21] **Мизюков Г.С.** Проектирование LC/NC платформы на базе фреймворка Laravel. *Инженерный вестник Дона*. 2022; 11(95): 200–207.
- [22] **Sychev O.A., Penskoj N.A., Terekhov G.V.** A Tool to Teach Expressions with Feedback About Broken Laws // SIGCSE 2022 : Proceedings of the 53rd ACM Technical Symposium on Computer Science Education (Providence, RI, USA, March 3-5, 2022) Association for Computing Machinery (ACM). [USA], 2022. Vol.2. P.1158. DOI: 10.1145/3478432.3499082.

Сведения об авторах

Сычёв Олег Александрович, 1979 г. рождения. Окончил Волгоградский государственный университет (ВолГУ) в 2002 г., к.т.н. (2005), доцент кафедры программного обеспечения автоматизированных систем ВолгГТУ. В списке трудов около 200 работ в области электронных образовательных систем и искусственного интеллекта. ORCID: 0000-0002-7296-2538; Author ID (РИНЦ): 447111; Author ID (Scopus): 57203852158; Researcher ID (WoS): M-4897-2015.



oasychev@gmail.com ✉

Пенской Никита Андреевич, 1995 г. рождения. Окончил ВолГУ в 2018 г. Аспирант кафедры программного обеспечения автоматизированных систем ВолгГТУ. В списке трудов около 10 работ в области интеллектуальных обучающих систем. ORCID: 0000-0002-4443-3399. nik95penik@yandex.ru.



Терехов Григорий Владимирович, 1993 г. рождения. Окончил ВолГУ в 2016 г. Старший преподаватель кафедры программного обеспечения автоматизированных систем ВолгГТУ. В списке трудов более 30 работ в области электронных образовательных систем. ORCID: 0000-0002-0289-1834; Author ID (РИНЦ): 1050906; Author ID (Scopus): 57224992574; Researcher ID (WoS): GWC-8187-2022. grvltter@gmail.com.



Поступила в редакцию 09.02.2024, после рецензирования 2.12.2024. Принята к публикации 17.12.2024.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-67-81

A method for developing intelligent simulators based on ontology of the subject domain

© 2025, O.A. Sychev ✉, N.A. Penskoj, G.V. Terekhov

Volgograd State Technical University (VolSU), Volgograd, Russia

Abstract

In academic disciplines, students are required to learn many new concepts, which necessitates extensive training with feedback. An intelligent simulator enables students to practice solving simple problems while receiving explanations for their mistakes, allowing teachers to focus on addressing more complex issues during lessons. This paper presents a method for developing intelligent simulators based on the ontology of the subject domain, implemented as web applica-

tions suitable for both classroom and extracurricular use. Representing the problem and the subject area model in RDF format enables logical inference using the Apache Jena Reasoner inference engine. An example is provided of an intelligent simulator designed for learning the order of operations in expressions, supporting the C++, C#, and Python programming languages. The simulator can explain errors, generate explanatory hints, and engage in educational dialogue through guiding questions. The simulator was tested with undergraduate and graduate students of the Faculty of Electronics and Computer Engineering at Volgograd State Technical University. Most students found the simulator to be more useful than traditional training tests. It can be employed both for independent study and as part of the educational process in classroom settings.

Keywords: intelligent simulator, training, domain ontology, order of expression evaluation, introductory courses, programming.

For citation: Sychev O.A., Penskov N.A., Terekhov G.V. A method for developing intelligent simulators based on ontology of the subject domain [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(1): 67-81. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-1-67-81.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures

Figure 1 – Component diagram of the intelligent simulator

Figure 2 – The top level of the ontology hierarchy of an expression in a programming language using C++ as an example

Figure 3 – Relationship types for expression in programming language using C++ as an example

Figure 4 – Example of a branch of the thought process tree to determine «whether the competing operator to the left has been evaluated»

Figure 5 – Example of creating a learning problem using the teacher interface

Figure 6 – Example of explanatory feedback in the student's interface after making an error

Figure 7 – An example of using a hint in the student's interface when solving a problem

Figure 8 – Example of a correct answer to a guiding question

Figure 9 – Example of an incorrect answer to a guiding question

Figure 10 – Feedback from students about working with the intelligent simulator

Table 1 - Excerpt from the dictionaries required for consideration of branch B2

References

- [1] Papadakis S, Kalogiannakis M, Zaranis N. Developing fundamental programming concepts and computational thinking with scratchjr in preschool education: a case study. *International Journal of Mobile Learning and Organization*. 2016; 10(3): 187–202. DOI:10.1504/IJMLO.2016.077867.
- [2] Rahmat M, Shahrani S, Latih R. Major Problems in Basic Programming that Influence Student Performance. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2012; 59: 287–296. DOI:10.1016/j.sbspro.2012.09.277.
- [3] Basu S, Biswas G, Sengupta P, Dickes A, Kinnebrew JS, Clark D. Identifying middle school students' challenges in computational thinking-based science learning. *Research and Practice in Technology Enhanced Learning*. 2016; 11(1): 1-35. DOI:10.1186/s41039-016-0036-2.
- [4] Ramabu T, Sanders I, Schoeman M. Manipulatives for Teaching Introductory Programming to Struggling Students: A Case of Nested-decisions. In *Proceedings of the 13th International Conference on Computer Supported Education (CSEDU 2021)*. 2021; 1: 505–510. DOI: 10.5220/0010477505050510.
- [5] Pierrakeas C, Xenos M, Panagiotakopoulos C, Vergidis D. A comparative study of dropout rates and causes for two different distance education courses. *International Review of Research in Open and Distance Learning*. 2004; 5(2): 1-15. DOI: https://doi.org/10.19173/irrodl.v5i2.183.
- [6] Khablieva SR, Kargieva ZK. Analysis of mobile technologies for organizing the educational process of schools [In Russian]. *Vestnik of North Ossetian State University named after K.L. Khetagurov*. 2022; (4): 190-197.
- [7] Solovov AV. E-learning: issues, didactics, technology [In Russian]. Samara: New technology. 2006. 462 p.
- [8] Mitrovic A, Koedinger KR, Martin B. A comparative analysis of cognitive tutoring and constraint-based modeling. *Lecture Notes in Artificial Intelligence* (Subseries of Lecture Notes in Computer Science). 2003: 2702: 313–322. DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-44963-9_42.
- [9] Aleven V, Koedinger K. An effective metacognitive strategy: Learning by doing and explaining with a computer-based Cognitive Tutor. *Cognitive Science*. 2002; 26(2): 147–179. DOI: https://doi.org/10.1207/s15516709cog2602_1.

- [10] **Sorva J, L'önnberg J, Malmi L.** Students' ways of experiencing visual program simulation. *Computer Science Education*. 2013; 23(3): 207–238. DOI:10.1080/08993408.2013.807962.
- [11] **Kollmansberger S.** Helping students build a mental model of computation. In *Proceedings of the Fifteenth Annual Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education*, ITiCSE '10. 2010; 15: 128–131. DOI: <https://doi.org/10.1145/1822090.1822127>.
- [12] **Levy R, Ben-Ari M, Uronen P.** The jeliot 2000 program animation system. *Computers & Education*. 2003; 40(1): 1–15. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-1315\(02\)00076-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1315(02)00076-3).
- [13] **Sychev OA, Streltsov VO.** Use of regular expressions as templates in formative and summative open answer questions [In Russian]. *Otkrytoe obrazovanie*. 2015; 2(109): 38–45. DOI: [https://doi.org/10.21686/1818-4243-2015-2\(109-38-45\)](https://doi.org/10.21686/1818-4243-2015-2(109-38-45)).
- [14] **Uglov VA, Sychev OA, Anikin AV.** Intelligent analysis of digital footprint during assessment of control and measuring materials to support decision-making during learning process [In Russian]. *Journal of Siberian Federal University Engineering & Technologies*. 2022; 15(1): 121–136. DOI: 10.17516/1999-494X-0378.
- [15] **Gorisev SA, Koynov AV, Kuzemchik VD.** Intelligent tutoring system "KLIOS" based on the linguistic processor for studying russian as a foreign language [In Russian]. *Modern Problems of Science and Education*. 2013; (6): 23–31.
- [16] **Rybina GV.** Intelligent technology for construction of tutoring integrated expert systems: new aspects [In Russian]. *Otkrytoe obrazovanie*. 2017; 21(4): 43–57. DOI: <https://doi.org/10.21686/1818-4243-2017-4-43-57>.
- [17] **Hosseini R, Brusilovsky P.** Javaparser: A fine-grain concept indexing tool for java problems. In *Workshops Proceedings of AIED*. 2013; 1009: 60–63.
- [18] **McBride B.** Jena: a semantic web toolkit. *IEEE Internet Computing*. 2002; 6(6): 55–59. DOI: 10.1109/MIC.2002.1067737.
- [19] **Krygin AI, Gumerov MR, Moskalenko NA, Sychev OA.** A framework for developing intelligent tutoring systems based on domain models in the form of decision trees [In Russian]. *XXI Russian conference on artificial intelligence (RCAI-2023)*. 2023; 1: 206–217.
- [20] **Khotelov DA, Radygin VY, Merkusheva AS.** Development of the security monitoring system for cluster of information systems based on the ruby on rails framework [In Russian]. *Bezopasnost' Informatsionnykh Tekhnologii*. 2018; 25(3): 88–100. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2018.3.09>.
- [21] **Miziukov GS.** Designing an LC/NC platform based on the Laravel framework [In Russian]. *Engineering journal of Don*. 2022; 11(95): 200–207.
- [22] **Sychev OA, Penskov NA, Terekhov GV.** A Tool to Teach Expressions with Feedback About Broken Laws // SIGCSE 2022 : Proceedings of the 53rd ACM Technical Symposium on Computer Science Education (Providence, RI, USA, March 3-5, 2022) Association for Computing Machinery (ACM). [USA], 2022. Vol.2. P.1158. DOI: 10.1145/3478432.3499082.

About the authors

Oleg Aleksandrovich Sychev (b. 1979), graduated from the VolSU in 2002, Candidate of Technical Sciences (Engineering) (2005), Associate Professor at Software Engineering Department, VolSU. Author of more than 200 scientific papers in the field of learning management systems and AI. ORCID: 0000-0002-7296-2538; Author ID (RSCI): 447111; Author ID (Scopus): 57203852158; Researcher ID (WoS): M-4897-2015. oasychev@gmail.com. ✉.

Nikita Andreevich Penskov (b. 1995) graduated from the VolSU in 2018, a postgraduate student of the Department of Software Automated Systems, VolSU. He is a co-author of about 10 scientific papers in the field of intelligent tutoring systems. ORCID: 0000-0002-4443-3399. nik95penik@yandex.ru.

Grigory Vladimirovich Terekhov (b. 1993) graduated from the VolSU in 2016, a postgraduate student of the Department of Software Automated Systems, VolSU. Author of more than 30 scientific papers in the field of learning management systems. ORCID: 0000-0002-0289-1834; Author ID (RSCI): 1050906; Author ID (Scopus): 57224992574; Researcher ID (WoS): GWC-8187-2022. grvltter@gmail.com.

Received February 9, 2024. Revised December 2, 2024. Accepted December 17, 2024.



Сравнительная оценка подходов к подготовке бакалавров по авиационным двигателям

© 2025, А.С. Гвоздев ✉, В.С. Мелентьев, И.Ф. Лейковский

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия

Аннотация

Представлены предварительные результаты сравнительной оценки двух современных подходов в обучении бакалавров на основе традиционных видов занятий и обучения с использованием иммерсивных технологий по критерию эффективности усвоения знаний обучающимися по направлению 24.03.05 Двигатели летательных аппаратов. В качестве иммерсивной образовательной среды использована платформа «Виртуальный павильон для изучения конструкции авиационных двигателей», представляющая собой совокупность взаимосвязанных учебных пространств: виртуального ангара, учебной лаборатории, моторного класса, мастерской-тренажёра. Платформа оснащена: инструментарием для взаимодействия с объектами при выполнении практических заданий; интегрированными в среду информационно-техническими базами данных по изучаемым двигателям и их интерактивными макетами в виде цифровых копий двигателей, представленных в Центре истории авиационных двигателей Самарского университета. На основе методов тестирования сделана попытка оценки качества освоения обучающимися учебного материала по дисциплине «Введение в специальность». По результатам проведённого анализа можно заключить, что применение иммерсивных технологий в изучении сложных технических объектов позволит сократить применение традиционных средств изучения конструкций двигателей на основе чертежей, схем, разрезных макетов и натуральных образцов в пользу виртуальных тренажёров, лабораторий, библиотек и др., включая дистанционное обучение.

Ключевые слова: виртуальная реальность, иммерсивные технологии обучения, авиационные двигатели, оценка качества обучения, тестирование, учебный тренажёр.

Цитирование: Гвоздев А.С., Мелентьев В.С., Лейковский И.Ф. Сравнительная оценка подходов к подготовке бакалавров по авиационным двигателям. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №1(55). С.82-95. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-82-95.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В области высшего образования отмечается рост востребованности технологий виртуальной реальности (VR) [1-4]. Проекты, основанные на иммерсивных технологиях, активно внедряются в учебных заведениях нашей страны и за рубежом [1, 5-8]. Применение таких технологий основано на включении в учебный процесс виртуального окружения [9]. Это способствует повышению интереса обучающихся к изучаемому предмету, позволяет получить опыт присутствия, увеличивая вероятность запоминания подаваемой информации.

В ряде работ, включая диссертационные исследования¹, отмечается, что классические концепции обучения, основанные на подаче материала в текстовой, иллюстративной, схема-

¹ Millican T. Virtual Reality in Higher Education: A Case Study at the Air University's Squadron Officer College: Academic dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy: defended on 07.05.2017. Auburn, Alabama, 2017. 271 p.

Жук Ю.А. Дидактические условия использования дисплейных форм наглядности в обучении студентов: автореф. дис. ...кандид. пед. наук: 13.00.01 / Жук Юлия Александровна. СПб. 2010. 22 с.

Гнедых Д.С. Эффективность усвоения учебной информации студентами в условиях электронного обучения: дис. ...канд. пед. наук: 19.00.07 / Гнедых Дарья Сергеевна. СПб., 2015. 237 с.

тической форме - в электронном обучении приобретают новую специфику, оказывая неоднозначное влияние на эффективность усвоения учебного материала [10-14]. Это означает, что выявленные в традиционном обучении закономерности могут по-разному проявлять себя при использовании в учебном процессе технологий ВР.

В отчёте [15] приведена оценка влияния иммерсивных методов обучения на академическую успеваемость, эффективность усвоения материала и долговременную память студентов. Результаты тестирования показали, что группа «ВР-студентов» продемонстрировала оценки на 27% выше, чем группа, изучавшая аналогичный материал обычным способом. Кроме этого, показатели группы «ВР-студентов» по уровню запоминания информации на 32% превосходили показатели контрольной группы [15].

В статье [16] отмечено, что даже плохо успевающие «ВР-студенты» давали на 40...50% больше правильных ответов после изучения темы, в сравнении с контрольной группой [16].

В статье [17] показано применение разработанного ВР-приложения для поддержки проектирования самолёта в рамках учебной дисциплины. Отмечаются «положительные результаты применения ВР в обучении техническим дисциплинам, и делается вывод о том, что «ВР даёт больше наглядности и больше визуального представления об изучаемом объекте».

В данной статье предпринята попытка выполнить сравнительную оценку эффективности применения в образовательном процессе ВР-технологий по отношению к традиционным методам обучения на примере выполнения лабораторных работ по изучению конструкции двигателей летательных аппаратов обучающимися по направлению 24.03.05 «Двигатели летательных аппаратов»² (профили «Виртуальный инжиниринг в проектировании авиационных двигателей» и «Организация и управление производством») в рамках дисциплины «Введение в специальность».

1 Материалы и методы

Эксперимент проводился в течение весеннего семестра 2023-2024 учебного года на базе двух учебных групп бакалавров. Обучающиеся были разделены на опытную (ВР) и контрольную (Классика) подгруппы. Каждая из подгрупп, в соответствии с учебным планом², выполнила четыре лабораторных работы. В качестве индивидуального задания студенты контрольной группы изучали один из двигателей, представленных в ангаре Центра истории авиационных двигателей Самарского университета. Испытуемые из опытной группы работали с ограниченной номенклатурой двигателей, имеющихся в ВР-среде. Две наиболее сложные лабораторные работы выбраны в качестве эксперимента. В процессе выполнения лабораторных работ опытная и контрольная группы менялись местами. Таким образом, у всех обучающихся была возможность попробовать свои силы в ВР.

Для организации учебного процесса в ВР-среде разработан виртуальный тренажёр - учебная лаборатория по изучению конструкции двигателей («Виртуальный павильон»), представляющий собой ВР-подобие учебного ангара Центра истории авиационных двигателей Самарского университета и моторных классов кафедры с интерактивными виртуальными макетами двигателей, снабжённых интегрированными базами данных по их техническому

² Основная профессиональная образовательная программа высшего образования «Виртуальный инжиниринг в проектировании авиационных двигателей» программы бакалавриата по направлению подготовки 24.03.05 «Двигатели летательных аппаратов» (очная форма обучения, набор 2023 г): утв. учёным советом Самарского университета, протокол №10 от 28.04.2023. URL: https://ssau.ru/docs/sveden/education/OOP_240305-2023-O-PP-4y00m-23.pdf.

Основная профессиональная образовательная программа высшего образования «Организация и управления производством» программы бакалавриата по направлению подготовки 24.03.05 «Двигатели летательных аппаратов» (очная форма обучения, набор 2023 г): утв. учёным советом Самарского университета, протокол №10 от 28.04.2023. URL: https://ssau.ru/docs/sveden/education/OOP_240305-2023-O-PP-4y00m-13.pdf.

описанию. При разработке «Виртуального павильона» учитывались не только функциональные и графические составляющие интерфейса, а также психолого-педагогические особенности этой среды, руководствуясь рекомендациями, изложенными в [18, 19]. В соответствии с концепцией ВР был переработан и дополнен учебно-методический материал, а именно: пособия для выполнения лабораторных работ и некоторые макеты двигателей, которые традиционно используются преподавателями при изучении конструкции, для возможности взаимодействия с ними через иммерсивную среду «Виртуального павильона». Эта адаптация проводилась для демонстрации с использованием ВР шлемов.

В качестве примера в таблицах 1 и 2 представлен сценарный план практического занятия по теме «Камеры сгорания (КС) газотурбинного двигателя (ГТД)»: общий для опытной и контрольной групп (таблица 1) и различающийся для этих групп (таблица 2). Фрагменты работы обучающихся опытной группы в иммерсивной среде представлены на рисунке 1.

Таблица 1 – Общий для опытной и контрольной групп фрагмент сценарного плана занятия

Этап занятия	Содержание занятия. Деятельность преподавателя	Деятельность обучающихся
1. Сообщение темы и цели занятия	Тема занятия: «Камеры сгорания (КС) газотурбинных двигателей (ГТД)». Цель: ознакомить обучающегося с назначением, принципом действия, устройством, особенностями конструктивных схем КС авиационных ГТД, основных деталей, изготовлением и обеспечением надёжной работы КС.	Обе группы используют для работы тетради: выделяют тему, обозначают цели.
2. Постановка учебной задачи	Задание обучающимся: 1. Ознакомиться с теоретическим материалом, изложенном в учебном пособии. 2. Кратко сформулировать и занести в тетрадь принцип действия, устройство и особенности конструктивных схем КС ГТД. 3. Изобразить конструктивные схемы КС с необходимыми обозначениями.	Уясняют учебные задачи. Задают вопросы преподавателю.
3. Изложение нового материала	Рассмотрение вопросов учебного материала: 1. Назначение КС. 2. Понятие о процессе горения топлива. 3. Особенности рабочего процесса в КС ГТД. 4. Конструктивные схемы КС. 5. Классификация КС. 7. Состав и основные элементы конструкции КС и др.	Обе группы составляют конспект теоретической части лабораторной работы на основе лекции преподавателя. Задают вопросы преподавателю.
7. Процедура тестирования	Объяснение цели и задач теста по пройденному материалу на тему «КС ГТД». Раздача обучающимся комплектов диагностического материала. Время прохождения тестирования 30 минут.	Обе группы в письменном виде выполняют тест по пройденному материалу.

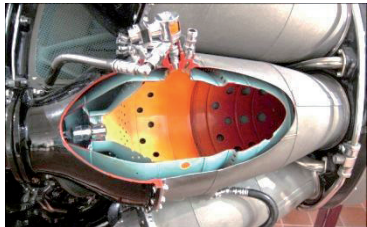
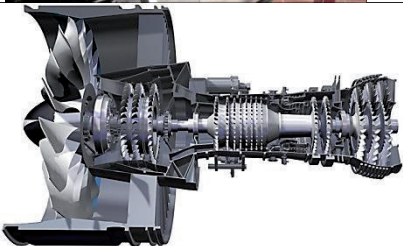
В качестве основных критериев эффективности усвоения были выбраны общий уровень усвоения учебного материала обучающимися и динамика изменений процесса сохранения полученных знаний с течением времени. Показателями усвоения и его результатом являлись комплекты тестовых заданий, разработанных на основе изложенного на практических занятиях учебно-методического материала с учётом таксономии Блума [20]. Согласно классификации, предложенной в [21], их можно отнести к традиционным бланковым монопредметным тестам нормативно-ориентированного типа. Вопросы тестов, имеющих как закрытый, так и открытый вид, были составлены таким образом, чтобы опытная и контрольная группы обучающихся оказались в равных условиях, и ни одна из них не имела преимуществ, связанных с концепцией их подготовки.

Структура тестов в большей степени соответствует концепции алгоритмизации в теории усвоения, предложенной в [22]. Согласно ей, в тестах присутствуют вопросы всех трёх уровней усвоения: опознание ($\alpha=1$), воспроизведение ($\alpha=2$), преобразование для применения в нетиповых ситуациях ($\alpha=3$). Однако основную массу составляют вопросы второго уровня ($\alpha=2$) на воспроизведение по памяти ранее усвоенной информации применительно к типовым ситуациям (таблица 3).

Таблица 2 – Фрагмент сценарного плана занятия, различающийся для опытной и контрольной групп

Этап занятия	Содержание занятия. Деятельность преподавателя	Деятельность обучающихся
4. Закрепление изученного материала. Работа в паре над выполнением практического задания	Постановка практического задания для закрепления материала: «Классика». В соответствии с индивидуальным заданием преподавателя, необходимо ознакомиться с конструкцией КС двигателя, используя его макет, плакаты, чертежи и техническое описание. Записать в тетрадь её параметры и основные классификационные признаки. Изобразить в рабочей тетради схему КС, отметить её конструктивные элементы. Записать: тип КС; параметры для максимального (взлётного) режима, определённые по плакату и/или информационной табличке у макета двигателя: степень повышения давления на входе в КС, расход воздуха, тягу двигателя или мощность двигателя и др. «VR». Задание выполняется в VR-среде. Преподаватель даёт указания и контролирует результат выполнения задания через подключенный параллельно монитор или LCD-проектор. Примерный перечень задач: 1. Ознакомиться с основами работы в VR-среде «Виртуальный павильон» с помощью методического пособия (для обучающихся, впервые работающих в VR). 2. Собрать отдельно КС двигателя. Отметить, из каких деталей она состоит. 3. Определить, какой тип КС. Показать, где в КС происходят процессы распыления топлива, его испарения, смешения паров топлива с воздухом и воспламенения горючей смеси. 4. Показать топливные форсунки. Где они расположены? Сколько их на двигателе? 5. Используя инструмент «Разрез/сечение», показать, как в двигателе устроен воспламенитель. 6. Показать диффузор и завихритель. Для чего они предназначены? 7. Запустить и проанализировать анимацию протекания рабочих процессов в КС.	«Классика». Обучающиеся группы получают на проработку КС один из типовых двигателей, представленных в ангаре Центра истории авиационных двигателей Самарского университета в виде разрезного макета. Анализируют конструкцию в соответствии с содержанием задания, заносят необходимую информацию для отчёта в тетрадь. «VR». Обучающиеся проходят инструктаж по технике безопасности при работе в VR. При необходимости, знакомятся или повторяют основы работы в иммерсивной среде «Виртуальной павильон» с помощью пособия «Применение иммерсивных технологий для изучения двигателей». Работая в паре, по очереди выполняют задания из перечня: один находится в иммерсивной среде, другой контролирует качество графического материала (скриншоты в VR) для отчёта, затем меняются местами.
5. Физминутка	Только «VR». Контроль выполнения обучающимися рекомендуемого комплекса физических упражнений физкультминуток для снятия общего переутомления и усталости глаз при работе в VR-среде из Приложения учебного пособия.	«VR». По мере необходимости, выполняют один из комплексов физических упражнений, рекомендуемых в пособии.
6. Подведение итогов	Только «Классика». Контроль выполнения в тетрадях индивидуального задания.	«Классика». Сдают на проверку выполненный отчёт по лабораторной работе, отвечают на вопросы преподавателя.

Таблица 3 – Примеры тестовых вопросов на разные уровни усвоения

Уровень усвоения	Содержание вопроса	
Первый ($\alpha=1$)	Одна из главных характеристик компрессора это: а) степень понижения давления в ступени π_T ; б) степень повышения давления в ступени π_K^*	
Второй ($\alpha=2$)	Определить тип КС, представленной на рисунке справа:	
Третий ($\alpha=3$)	Используя полученные сведения о каскаде турбореактивного двигателя, определите и укажите на рисунке области расположения и связи структурных элементов в каскадах компрессора низкого давления и компрессора высокого давления данного двигателя:	

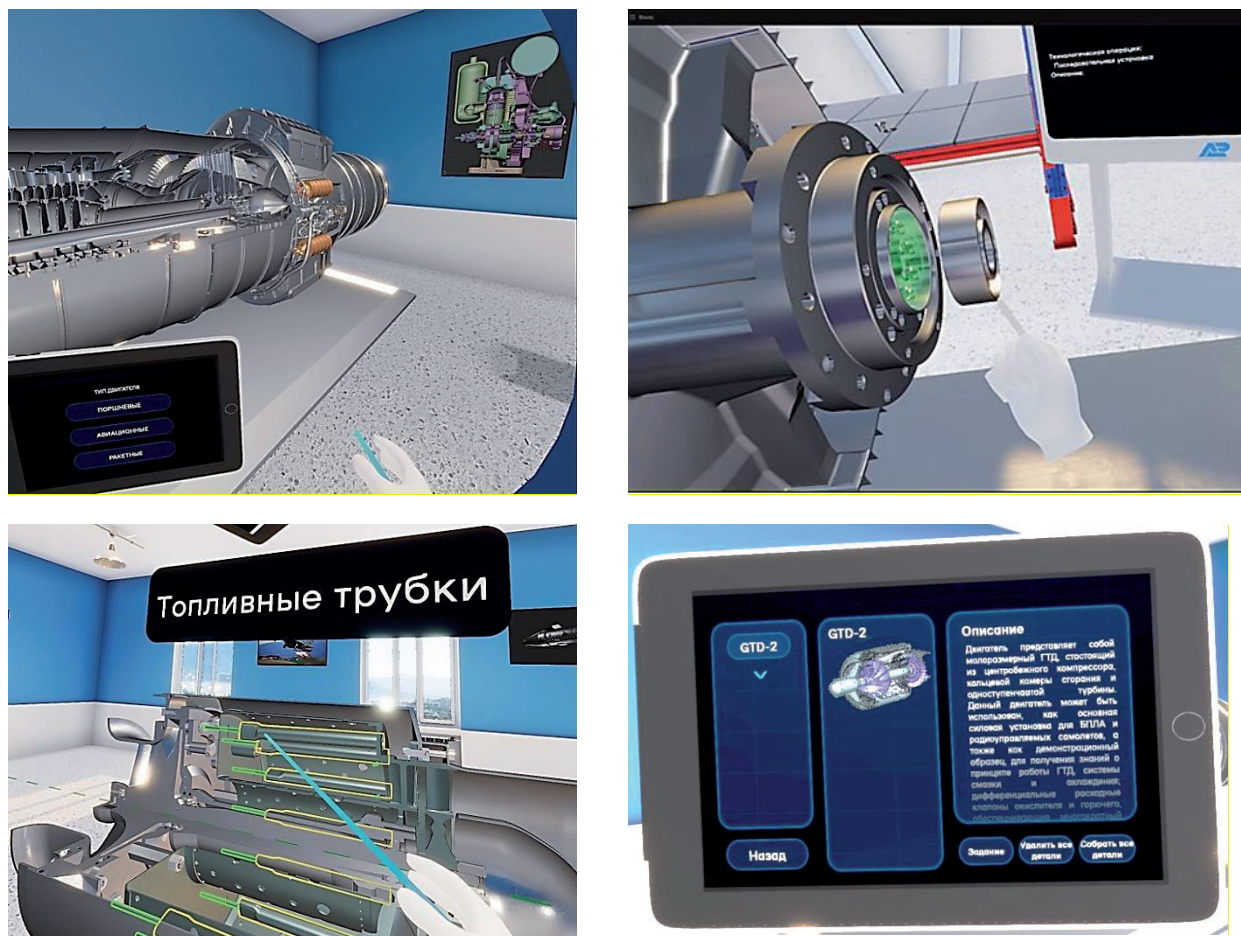


Рисунок 1 – Примеры взаимодействия обучающихся с объектами изучения в иммерсивной среде «Виртуального павильона»

Для извлечения требуемых аналитических данных вопросы тестов были дополнительно стратифицированы по следующим пяти признакам:

- I. Определение конструктивного элемента компрессора (или КС) в составе двигателя.
- II. Узнаваемость конструктивного элемента компрессора (или КС) без привязки к конкретному двигателю.
- III. Определение количественного или структурного состава узла (агрегата) компрессора (или КС).
- IV. Терминологические вопросы конструкции компрессора (или КС).
- V. Теоретические вопросы, связанные с конструкцией компрессора (или КС).

Для получения картины в динамике методика тестирования включает две стадии [23]:

- моментальная оценка усвоения материала, когда тест проводился непосредственно после подачи учебного материала и выполнения обучающимися практической части задания (А-тест);
- оценка остаточных знаний, когда аналогичный тест выполнялся студентами спустя две недели (В-тест).

Обеим группам был предложен диагностический курс, состоящий из четырёх тестов – по два на каждую лабораторную работу: «Компрессор ГТД» (22 вопроса), «КС ГТД» (18 вопросов). Принятая шкала оценки: процент правильных ответов от 0 до 100.

В работе использован средний балл³ обучающегося, который условно принят за показатель, отражающий уровень освоения учебного материала и степень заинтересованности в эксперименте. Для каждого обучающегося принималось во внимание отношение к обучению

³ Средний балл обучающегося рассчитывался как среднее арифметическое результатов успешно сданных за предыдущую (осень 2023–24 учебного года) сессию экзаменов.

в целом и средний показатель его успеваемости в университете, характеризующие общий уровень знаний. Для этого экспертной группой преподавателей в течение семестра проводились индивидуальные беседы и наблюдение за испытуемыми на занятиях. В качестве корректирующего параметра принимался средний балл по результатам предыдущей экзаменационной сессии (он указан в столбце 2 таблицы 4).

Таблица 4 – Характеристика обучающихся и их распределение по тестовым группам⁴

Обучающийся	Успеваемость	А-Компрессор	В-Компрессор	А-КС	В-КС
M1	3,25	ВР	-	-	-
F1	5	ВР	ВР	ВК-1	ВК-1
M2	3,12	ВР	ВР	АЛ-31Ф	АЛ-31Ф
M3	3,5	ВР	ВР	Р11Ф-300	Р11Ф-300
M4	4	РД-45	РД-45	ВР	ВР
M5	3,6	НК-8	НК-8	ВР	ВР
M6	3,4	НК-8	НК-8	Д-36	Д-36
M7	4	JUMO-004	JUMO-004	ВР	ВР
M8	3,3	Без ИЗ	-	-	-
F2	3,7	ТВ2-117	-	ВР	ВР
F3	4	ВР	ВР	ТВ2-117	ТВ2-117
F4	4,6	ВР	ВР	НК-8	НК-8
M9	4,3	НК-8	НК-8	ВР	-
M10	3	НК-8	НК-8	ВР	-
M11	3,3	РД-45	-	-	-
F5	4,3	Без ИЗ	Без ИЗ	ВР	-

Предполагалось, что если обучающийся не аттестован по другим предметам, имеет низкие экзаменационные оценки, отстаёт от учебного графика, проявляет иные формы отсутствия интереса к обучению в целом, то нет оснований считать данного студента заинтересованным в качественном изучении предмета «Введение в специальность» и в добросовестном выполнении предложенных диагностических тестов. Высока вероятность того, что результаты тестирования такого студента не отражают степень понимания им материала. Поэтому при обработке результатов теста, в случае выявления «сомнительных» показателей (выполнение теста в течение слишком короткого времени или наличие явных дублей в ответе), принималось решение об исключении такого ответа.

Согласно рекомендациям [22, 24-26] диагностический материал проверен на соответствие общим требованиям к тестам по критериям валидности, определённости, однозначности и надёжности. Содержательная и функциональная валидность обеспечивалась выбором: тестовых вопросов из текста, рекомендованного для подготовки лабораторных работ в методическом пособии, используемом обучающимися на занятиях; разрезных и ВР-макетов двигателей, которые рассматривались и обсуждались на вводной - лекционной части практических занятий; плакатов, чертежей и конструктивно-силовых схем, касающихся выполнения этих лабораторных работ, и предварительно рассмотренных совместно с преподавателем.

Для выполнения требований определённости и однозначности разработан комплект диагностического материала, используемый в качестве эталона и применяемый при анализе и обработке результатов тестирования, утверждена оценочная шкала. В процессе тестирования

⁴ Обозначение «М#» соответствует обучающемуся-юноше, «F#» - обучающемуся-девушке. «ВР» означает, что в рамках данной лабораторной работы обучающийся относился к опытной группе. В ином случае, обучающийся относился к контрольной группе и работал над двигателем указанного в таблице типа. Отметка «Без ИЗ» означает, что обучающийся на момент выполнения теста индивидуальное задание (ИЗ) по лабораторной работе не получал и, как правило, причислялся к контрольной группе. Средний балл успеваемости всей группы обучающихся составил 3,8. Обозначения, выделенные **жирным шрифтом**, относятся к маркам изучаемых ГТД.

среди обучающихся не было зафиксировано случая затруднения с пониманием смысла тестовых заданий.

Оценка надёжности диагностического материала проверялась методом раздельного коррелирования по критерию Пирсона с учётом поправки Спирмена-Брауна, а также методом Кьюдера-Ричардсона [25, 26]. Для этого во втором случае процентная оценочная шкала теста приведена к дихотомическому виду по критериям: 0...49% - неверно; 50...100% - верно. Оба метода показали удовлетворительный уровень надёжности, соответствующий значениям 0,78 (0,83) для первого теста и 0,73 (0,72) – для второго теста, для экспериментальной и контрольной групп, соответственно.

2 Обсуждение результатов

Исходя из ответов на А-тест по теме «Компрессор ГТД», можно сделать следующие выводы. Наименьшую сложность у испытуемых обеих групп вызвали вопросы на проверку теоретических знаний конструкции компрессора: 82,5% в опытной группе и 80% - в контрольной. Вопросы на определение структурного состава узлов компрессора или на подсчёт количества его ступеней вызывали больше трудностей у контрольной группы (48,3%). У опытной показатель составил 64,5%. Трудности с пониманием у студентов контрольной группы возникли по вопросам на определение элементов конструкции компрессора в составе двигателя и его вспомогательных систем (клапанов перепуска, регулируемых направляющих аппаратов), как по чертежам, так и с помощью разрезных макетов. Опытная группа, хотя и испытала определённые сложности с ответами на этот тип вопросов, всё же смогла показать лучшие результаты: 45,9 против 27,5%. По остальным группам вопросов ситуацию в контрольной и опытной группах, в целом, можно считать паритетной. Диаграмма распределения средних баллов по данному тесту представлена на рисунке 2.

Теоретические вопросы, которые хотя и слабо отражают картину сравнения учебной подготовки традиционным способом и с использованием ВР, введены в тест с целью определения общего уровня понимания студентами темы занятия. Учитывая высокие показатели обеих групп по этим типам вопросов, можно предположить, что тема была освоена обучающимися на удовлетворительном уровне. При анализе ответов контрольной группы отмечена тенденция к формулировке «Ответ на вопрос не представлен», что может свидетельствовать о невозможности обучающихся сопоставить полученный лекционный материал с примерами реальных технических объектов, представленных в Центре истории авиационных двигателей Самарского университета, где проводились занятия.

Проверка остаточных знаний по теме «Компрессор ГТД» (В-тест) проведена спустя две недели после планового занятия. При этом зафиксирован рост уровня кривой накопления информации в опытной группе с 68,5 до 70,3% и его снижение в контрольной группе: с 58,4 до 56,9%, что коррелирует с методом оценки Г. Эббингауза и методом интервального повторения [27]. Диаграмма средних баллов испытуемых по данному тесту приведена на рисунке 3.

Анализ ответов на А-тест по теме «КС ГТД» выявил следующие закономерности. Обучающиеся из опытной группы, в отличие от контрольной, в своём большинстве затруднились ответить на вопрос, представленный в тесте в виде двухмерного чертежа, на котором требовалось отметить внутренний корпус основной КС. Средние показатели опытной группы по этому вопросу составили 12,5% против 55% в контрольной. Это обстоятельство может свидетельствовать о недостаточном применении инструмента «Разрез/Сечение» при выполнении практического задания в ВР-пространстве студентами опытной группы, т.к. 2D-чертежи в иммерсивной среде отдельно не представлены.

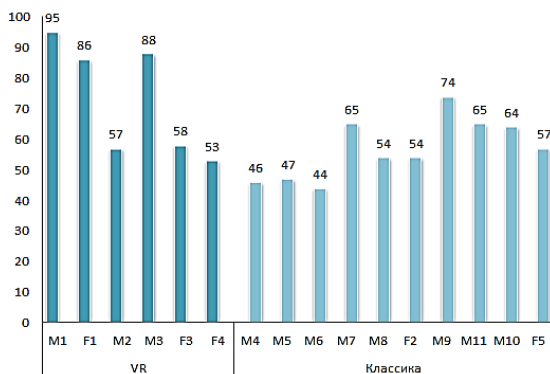


Рисунок 2 – Диаграмма распределения среднего балла (в %) А-теста по теме «Компрессор газотурбинного двигателя»



Рисунок 3 – Диаграмма распределения среднего балла (в %) В-теста по теме «Компрессор газотурбинного двигателя»

Разрезные макеты двигателей в ангаре Центра истории авиационных двигателей Самарского университета снабжены чертежом продольного разреза и конструктивно-силовой схемой двигателя. Правильные ответы на вопросы по определению количественного и структурного состава КС распределились в следующем процентном соотношении: 34,6% в опытной группе и 41,5% - в контрольной. Это может объясняться тем, что в VR-среде пока отсутствуют образцы двигателей, имеющих форсажные камеры. Следовательно, оценить количество КС и конструктивный облик форсажных КС двигателя, представленного в А-тесте, испытуемым опытной группы было затруднительно. При этом студенты контрольной группы в рамках практического задания чаще работали с разрезными макетами двигателей именно этого типа (АЛ-31Ф, Р11Ф-300). Отсюда важно соблюсти равенство условий сравнения разных подходов.

Большинство вопросов теоретического характера, за исключением определения правильного порядка исторической последовательности типов КС, также как и в теме «Компрессор ГТД», не вызвали каких-либо затруднений у студентов обеих групп. По остальным типам вопросов ситуацию в контрольной и опытной группах, в целом, можно считать паритетной. В ответах испытуемых обеих групп наблюдалось снижение на 58% тенденции к формулировке «Ответ на вопрос не представлен». Диаграмма средних баллов по данному тесту приведена на рисунке 4.

Анализ остаточных знаний по теме «КС ГТД» проводился спустя две недели с помощью В-теста. Диаграмма средних баллов по данному тесту представлена на рисунке 5. В ответах испытуемых обнаружили те же ошибки, что и выявленные в ходе предыдущего тестирования. Однако, в целом, обе группы показывают тенденцию к возрастанию уровня накопления информации: с 62,9 до 65,3% в опытной и с 63,7 до 69,4% - в контрольной. Кроме того, в ответах испытуемых обеих групп выявлено 28%-е снижение тенденции к формулировке «Ответ на вопрос не представлен» (по техническим причинам из 7 обучающихся опытной группы в В-тесте приняли участие только 4).

Сводные диаграммы по всему курсу тестирования, отражающие динамику среднего балла по всем четырём тестам для каждого из обучающихся, приведены на рисунке 6, где А- и В- – это результаты выполненных обучающимся А- и В-тестов по темам «Компрессор ГТД» и «КС ГТД», соответственно. Общий средний балл рассчитывался как среднее арифметическое по всем выполненным тестам (в диапазоне от 1 до 4). Качество усвоения материала опытной группой по обоим темам оценивалось в процентном соотношении, как разница между показателями А-теста и В-теста в сравнении с аналогичными показателями контрольной группы.

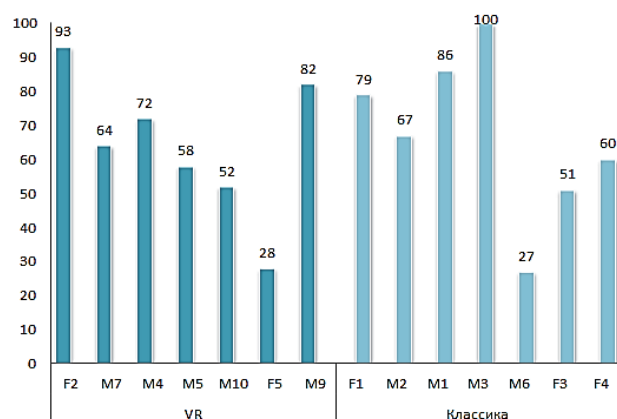


Рисунок 4 – Диаграмма распределения среднего балла (в %) А-теста по теме «Камера сгорания газотурбинного двигателя»

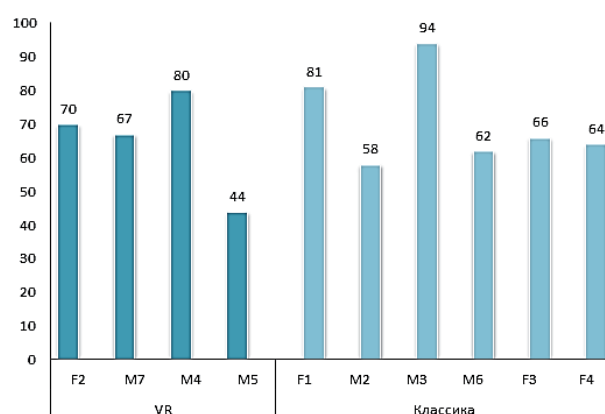


Рисунок 5 – Диаграмма распределения среднего балла (в %) В-теста по теме «Камера сгорания газотурбинного двигателя»

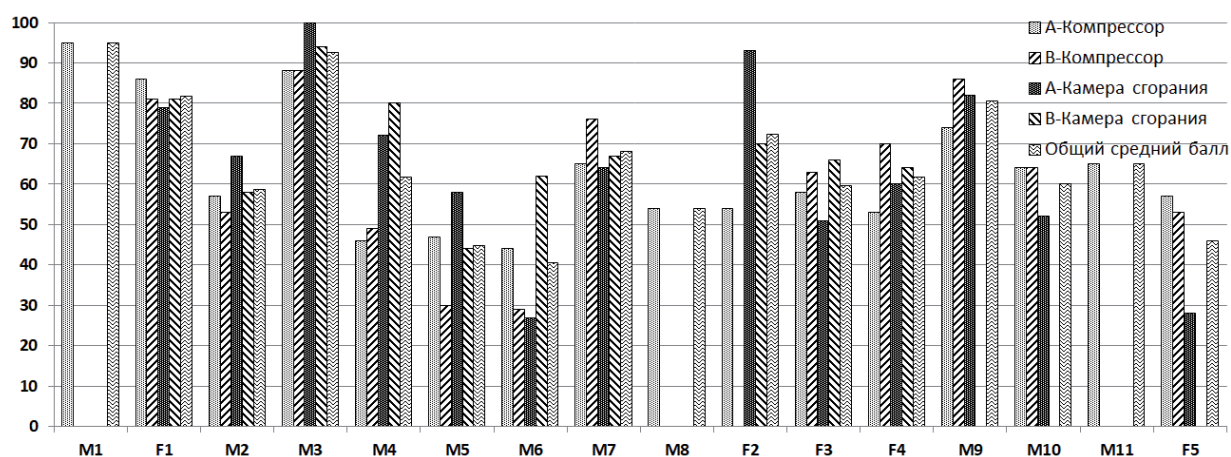


Рисунок 6 – Сводная диаграмма распределения среднего балла (в %) по всему курсу тестирования

Заключение

В работе приводятся результаты начального этапа исследовательских работ. Для окончательных выводов пока недостаточно располагаемого объема достоверных данных. Этим обстоятельством может объясняться существенное различие между представленными результатами и полученными в работах [15-16]. В статье сделана попытка сравнить два подхода с точки зрения подачи разнотипной учебной информации, выявляя их сильные и слабые стороны, с целью составления в будущем обоснованных рекомендаций для методистов-интеграторов электронных образовательных сред по соотношению классических и VR-подходов в перспективной системе подготовки обучающихся. Учитывая небольшой исходный объем данных, приведённые результаты носят предварительный характер (рисунок 7). Целесообразно учитывать общую успеваемость обучающегося, что позволяет понять, является ли итоговый балл следствием влияния концепции обучения или же это отражение общего уровня знаний и личностной организации студента⁵.

⁵ В процессе эксперимента вскрыты проблемы организационного характера, заключающиеся в отсутствии специально оборудованной площадки под VR, недостаточном количестве комплектов VR-оборудования, необходимости их установки, подключения и настройки. Эти операции сокращают время пребывания студентов в иммерсивной среде при выполнении практического задания, тем самым, не позволяя раскрыть весь потенциал применения VR при обучении.

Выявлена необходимость расширения номенклатуры VR-объектов в «Виртуальном павильоне» в соответствии с номенклатурой аналогичных объектов Центра истории авиационных двигателей Самарского университета, рассматриваемых при традиционной учебной подготовке. Целесообразен перевод печатных носителей в электронную образовательную среду, что позволит автоматизировать процесс анализа [17].

По завершении курса тестирования обучающимися, выполнившим практические задания в VR-среде, предложено пройти анкетирование о работе в иммерсивной среде, высказать замечания и пожелания разработчикам «Виртуального павильона». Анализ анкет показал, что все участники положительно оценивают свой опыт погружения в VR, отмечают повышение интереса к предмету и улучшение понимания конструкции сложных технических объектов.

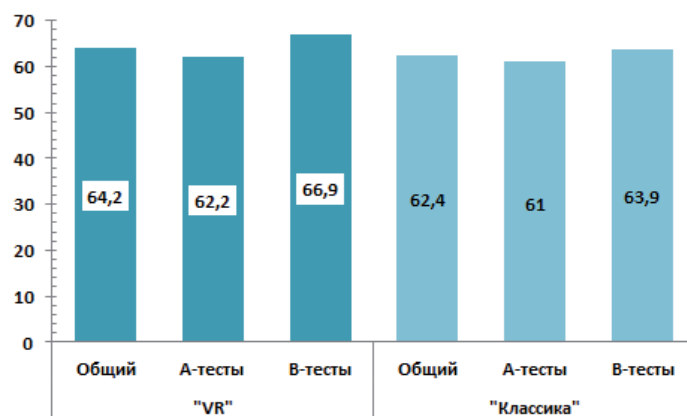


Рисунок 7 – Диаграмма общего среднего балла (в %) опытной (VR) и контрольной (Классика) групп

Авторский вклад

Гвоздев А.С. — концепция, методология, анализ данных, валидация, формулировка выводов, написание текста статьи. Мелентьев В.С. — планирование этапов исследования, сбор и систематизация данных, обобщение результатов, редактирование текста статьи. Лейковский И.Ф. — программное обеспечение и визуализация, редактирование текста статьи.

Список источников

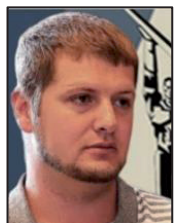
- [1] Носова А. Обучение будущего: заменит ли виртуальная студия учителей и учебники? [Электронный ресурс] Сетевое издание RB.RU. 2019. <https://rb.ru/longread/VR-education/>.
- [2] Берестнева О.Г., Лызин И.А., Тихомиров А.А., Корняков М.В., Джафари Г., Дуга С.В., Куулар Э.К., Труфанов А.И., Петрова Л.А. Сетевая концепция метадисциплинарной платформы конструирования множественных реальных и виртуальных миров. *Онтология проектирования*. 2022. Т.12, №2(44). С.218-230. DOI:10.18287/2223-9537-2022-12-2-218-230.
- [3] Соловов А.В., Меньшикова А.А. Перспективные направления развития электронного обучения. *Перспективные информационные технологии* (ПИТ 2017). Сб. науч. тр. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2017. С.1111-1114.
- [4] Стариченко Б. Е., Семёнова И.Н., Слепыхин А.В. О соотношении понятий электронного обучения в высшей школе. *Образование и наука*. 2014. № 9. С. 51-68.
- [5] Соловов А.В., Мищук В.Т. Интеллектуальные тренажеры и виртуальные лаборатории: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. 59 с.
- [6] Fabris Ch., Rathner J., Fong A., Sevigny Ch. Virtual Reality in Higher Education. *International Journal of Innovation in Science and Mathematics Education*. 2019. 27. 69-80. DOI:10.30722/IJISME.27.08.006.
- [7] Riner, Ashley & Hur, Jung & Kohlmeier, Jada. Virtual Reality Integration in Social Studies Classroom: Impact on Student Knowledge, Classroom Engagement, and Historical Empathy Development. *Journal of Educational Technology Systems*. 51. 004723952211325. 10.1177/00472395221132582.
- [8] Сергеев С.Ф. Методология проектирования тренажёров с иммерсивными обучающими средами. *Научно-технический вестник Санкт-Петербургского гос. ун-та информационных технологий, механики и оптики*. 2011. №1(71). С. 109–114.
- [9] Семенова Г.В. Опыт применения технологий дополненной и виртуальной реальностей в образовательном процессе. *Известия Тульского государственного университета. Педагогика*. 2022. Вып. 1. С.57-63.
- [10] Пономарев Я.А. Знания, мышление и умственное развитие. М.: Просвещение. 1967. 264 с.

- [11] **Роберт И.В.** Современные информационные технологии в образовании: дидактические проблемы; перспективы использования. М.: ИИО РАО. 2010. 140 с.
- [12] **Якиманская И.С.** Технология личностно-ориентированного образования. М.: Сентябрь, 2000. 176 с.
- [13] **Рубинштейн С.Л.** Основы общей психологии. СПб.: Питер, 2005. 723 с.
- [14] **Бадмаева Н.Ц.** Мотивационные факторы формирования мыслительных и мнемических способностей. Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2000. 175 с.
- [15] A Case Study - The Impact of VR on Academic Performance [Research report]. Beijing Bluefocus E-Commerce Co., Ltd; Beijing iBokan Wisdom Mobile Internet Technology Training Institutions. 2016. https://download.lenovo.com/km/media/attachment/case_study_impact_of_vr_20161125.pdf
- [16] **Селиванов В.В., Селиванова Л.Н.** Эффективность использования виртуальной реальности при обучении в юношеском и взрослом возрасте. *Непрерывное образование: XXI век*. Научный электронный журнал. 2015. №1 (9). <https://lll21.petrstu.ru/journal/article.php?id=2729>.
- [17] **Borgest N.M., Vlasov S.A., Glibotsky D.S.** Development and Application of an Application with Augmented Reality Technology for Training Future Aircraft Designers. *Proceedings - 2023 International Russian Smart Industry Conference, SmartIndustryCon 2023*. 2023. P.387-391.
- [18] **Чернова О.В., Шендрик И.Г.** Проектирование образовательной среды: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2008. 93 с.
- [19] **Овчинникова К.Р.** Дидактическое проектирование учебного курса в вузе как возможность опережающего управления интеллектуальным развитием студента. *Alma mater. Вестник высшей школы*. 2013. №6. С.46-52.
- [20] **Bloom B.S., Engelhart M.D., Furst E.J.** ... [at al.] Taxonomy of educational objectives: The classification of educational goals / David McKay Company, 1956. Vol. Handbook I: Cognitive domain. 216 p.
- [21] **Аванесов В.С.** Композиция тестовых заданий. Учебная книга для преподавателей вузов, учителей школ, аспирантов и студентов педвузов. М.: Адепт, 1998. 217 с.
- [22] **Соловов А.В.** Методические основы электронных учебников: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. 68 с.
- [23] **Коменский Я.А.** Дидактические принципы: отрывки из "Великой дидактики". М: Учпедгиз, 1940. 91 с.
- [24] **Соловов А.В., Меньшикова А.А.** Системно-дидактический анализ цифровых образовательных ресурсов. *Образование в современном мире: риски и перспективы цифровизации*. Сб. научн. тр. Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2023. С.121-126.
- [25] **Михайлычев Е.А.** Дидактическая тестология. М.: Народное образование, 2001. 432 с.
- [26] **Ким В.С.** Тестирование учебных достижений: монография. Уссурийск: Издательство УГПИ, 2007. 214 с.
- [27] **Немов Р.С.** Психология: В 3 кн. 4-е изд. М.: Гуманит. изд. центр ВЛАДОС, 2003. Кн. 1: Общие основы психологии. 688 с.

Сведения об авторах



Гвоздев Александр Сергеевич, 1983 г. рождения. Окончил Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королёва (СГАУ) в 2006 г., к.т.н. (2011). Доцент кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов Самарского университета. В списке научных трудов более 50 работ, в том числе 11 учебно-методических пособий и 8 патентов. Author ID (РИНЦ): 735719; Author ID (Scopus): 56472535600. gvozdev.as@ssau.ru. ✉.



Мелентев Владимир Сергеевич, 1984 г. рождения. Окончил СГАУ в 2006 г., к.т.н. (2011). Доцент кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов Самарского университета. В списке научных трудов более 40 работ в области САПР. Author ID (РИНЦ): 735722; Author ID (Scopus): 56472780100; Researcher ID (WoS): E-7639-2014. melentev.vs@ssau.ru.



Лейковский Илья Фимович, 1985 г. рождения. Окончил Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королёва в 2018. Заведующий учебной лабораторией кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, руководитель Интерактивного комплекса опережающей подготовки инженерных кадров на основе современных цифровых технологий "Иммерсивные технологии в двигателестроении" nig391@inbox.ru.

Поступила в редакцию 12.11.2024, после рецензирования 21.12.2024. Принята к публикации 10.01.2025.



Comparative assessment of approaches to training bachelor's students in aircraft engine design

© 2025, A.S. Gvozdev ✉, V.S. Melentjev, I.F. Leykovskyy

Samara University (Samara National Research University named after academician S.P. Korolev), Samara, Russia

Abstract

The paper presents preliminary results of a comparative assessment of two modern approaches to bachelor's degree training: traditional classroom methods and training with immersive technologies, evaluated by the criterion of knowledge acquisition efficiency in the field of 24.03.05 Aircraft Engines. The platform "Virtual pavilion for studying of aircraft engines design" was used as an immersive educational environment. It is a set of interconnected educational spaces: a virtual hangar, a training laboratory, an engine design class and a workshop-simulator. The platform is equipped with tools for interacting with objects during practical tasks, IT databases aintegrated into the environment with information about the studied engines, and their interactive models as digital replicas of engines displayed in the Center for the History of Aircraft Engines at Samara University. An attempt was made to assess the quality of students' learning in the discipline "Introduction to the Specialty" using testing methods. The analysis results suggest that employing immersive technologies in studying complex technical objects can reduce reliance on traditional methods such as drawings, diagrams, cutaway models, and full-scale samples. Instead, virtual simulators, laboratories, libraries, and other tools, including those supporting distance learning, can be increasingly utilized.

Keywords: virtual reality, immersive learning technologies, aircraft engines, learning quality assessment, testing, training simulator.

For citation: Gvozdev AS, Melentjev VS, Leykovskyy IF. Comparative assessment of approaches to training bachelor's students in aircraft engine design [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(1): 82-95. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-1-82-95.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures and tables

Figure 1 - Examples of interaction between students and objects of study in an "Virtual pavilion" immersive environment

Figure 2 - Distribution diagram of the average score (%) of the A-test about "Compressor of gas turbine engine" topic

Figure 3 - Distribution diagram of the average score (%) of the B-test about "Compressor of gas turbine engine" topic

Figure 4 - Distribution diagram of the average score (%) of the A-test about "Combustion chamber of gas turbine engine" topic

Figure 5 - Distribution diagram of the average score (%) of the B-test about "Combustion chamber of gas turbine engine" topic

Figure 6 - Summary diagram of the distribution of the average score (%) for the entire testing course

Figure 7 - Diagram of the overall average score (%) into the experimental ("VR") and control ("Classic") groups

Table 1 - Collective fragment of the lesson plan scenario for the experimental and control groups

Table 2 - A fragment of lesson plan scenario that differs for the experimental and control groups

Table 3 - Examples of test questions for different levels of knowledge acquisition

Table 4 - Characteristics of students and their distribution among test groups

References

- [1] *Nosova A.* The Future of Education: Will the Virtual Studio Replace Teachers and Textbooks? Source [In Russian]. <https://rb.ru/longread/VR-education/>.
- [2] *Berestneva OG, Ly'zin IA, Tixomirov AA, Korniyakov MV, Dzhaferi G, Duga SV, Kuular EK, Tru-fanov AI, Petrova LA.* Network concept of a metadisciplinary platform for constructing multiple real and virtual worlds. [In Russian]. *Ontology of designing*. 2022; 12(2): 218-230. DOI:10.18287/2223-9537-2022-12-2-218-230.

- [3] **Solovov AV, Men'shikova AA.** Promising directions for the development of e-learning. *Promising information technologies* (PIT 2017). Collection of scientific papers [In Russian]. Samara: Publ. Samara University, 2017. P.1111-1114.
- [4] **Starichenko BE, Semyonova IN, Slepuxin AV.** About the relationship between the concepts of e-learning in higher education [In Russian]. *Education and Science*. 2014; 9: 51-68.
- [5] **Solovov AV, Mishhuk VT.** Intelligent simulators and virtual laboratories: textbook. [In Russian]. Samara: Publ. of Samara state aerospace university, 2007. 59 p.
- [6] **Fabris Ch, Rathner J, Fong A, Sevigny Ch.** Virtual Reality in Higher Education. *International Journal of Innovation in Science and Mathematics Education*. 2019. 27. 69-80. 10.30722/IJISME.27.08.006.
- [7] **Riner A, Hur J, Kohlmeier J.** Virtual Reality Integration in Social Studies Classroom: Impact on Student Knowledge, Classroom Engagement, and Historical Empathy Development. *Journal of Educational Technology Systems*. 51. 004723952211325. DOI:10.1177/00472395221132582.
- [8] **Sergeev SF.** Methodology for designing simulators with immersive learning environments. [In Russian]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2011; 1(71): 109–114.
- [9] **Semenova GV.** Experience of using augmented and virtual reality technologies in the educational process [In Russian]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Pedagogika*. 2022; 1: 57 - 63.
- [10] **Ponomarev YaA.** Knowledge, cogitation and mental stature. [In Russian]. Moscow: Prosveshchenie. 1967. 264 p.
- [11] **Robert IV.** Modern information technologies in education: didactic problems; prospects of use. [In Russian]. Moscow: IIO RAO. 2010. 140 p.
- [12] **Yakimanskaya IS.** Technology of personality-oriented education [In Russian]. Moscow: Sentyabr', 2000. 176 p.
- [13] **Rubinshteyn SL.** Fundamentals of General Psychology [In Russian]. SPb.: Piter, 2005. 723 p.
- [14] **Badmaeva NCz.** Motivational factors in the formation of cogitation and mnemonic abilities [In Russian]. Ulan-Ude': Publ. VSGTU, 2000. 175 p.
- [15] A Case Study - The Impact of VR on Academic Performance [Research report]. Beijing Bluefocus E-Commerce Co., Ltd; Beijing iBokan Wisdom Mobile Internet Technology Training Institutions. 2016. URL: https://download.lenovo.com/km/media/attachment/case_study_impact_of_vr_20161125.pdf
- [16] **Selivanov VV, Selivanova LN.** Efficiency of using virtual reality in education during adolescence and adulthood [In Russian]. *Continuous education: XXI century. Scientific electronic journal*. 2015. No. 1 (9). <https://lll21.petsu.ru/journal/article.php?id=2729>.
- [17] **Borgest NM, Vlasov SA, Glibotsky DS.** Development and Application of an Application with Augmented Reality Technology for Training Future Aircraft Designers. *Proceedings - 2023 International Russian Smart Industry Conference, SmartIndustryCon 2023*. P.387-391.
- [18] **Chernova OV, Shendrik IG.** Design of educational environment: textbook [In Russian]. Ekaterinburg: Publ. RGPPU, 2008. 93 p.
- [19] **Ovchinnikova KR.** Didactic design of a university course as an opportunity for advanced management of student's intellectual development [In Russian]. *Alma mater. Bulletin of Higher School*. 2013; 6: 46-52.
- [20] **Bloom BS.** Taxonomy of educational objectives: The classification of educational goals / B.S. Bloom, M.D. Engelhart, E. J. Furst ... [at al.]. David McKay Company, 1956. Vol. Handbook I: Cognitive domain. 216 p.
- [21] **Avanesov VS.** Composition of test tasks. A textbook for university lecturers, school teachers, postgraduate students and students of pedagogical universities [In Russian]. Moscow: Adept, 1998. 217 p.
- [22] **Solovov AV.** Methodological foundations of electronic textbooks: textbook [In Russian]. Samara: Publ. SSAU, 2007. 68 p.
- [23] **Komenskij YaA.** Didactic principles: excerpts from the "The great didactic (Didactica magna)" [In Russian]. Moscow: Uchpedgiz, 1940. 91 p.
- [24] **Solovov AV, Men'shikova AA.** Systemic and didactic analysis of digital educational resources [In Russian]. Education in the modern world: risks and prospects of digitalization. Collection of scientific papers. Samara: Publ. Samara University, 2023. P.121-126.
- [25] **Mikhailichev EA.** Didactic testology [In Russian]. Moscow: Narodnoe obrazovanie, 2001. 432 p.
- [26] **Kim VS.** Testing of educational achievements: monograph [In Russian]. Ussuriysk: Publ. UGPI, 2007. 214 p.
- [27] **Nemov RS.** Psychology: General foundations of psychology [In Russian]. Moscow: Humanitarian Publishing Center VLADOS, 2003. 688 p.

About the authors

Alexander Sergeevich Gvozdev (b. 1983) graduated from the Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev in 2006, PhD (2011). He is an Associate Professor of the Aircraft Engines Design Department at Sa-

mara University. He is a co-author of about 50 research papers, including 11 educational and methodological manuals and 8 patents. Author ID (RSCI): 735719; Author ID (Scopus): 56472535600. gvozdev.as@ssau.ru ✉.

Vladimir Sergeevich Melentjev (b. 1984) graduated from the Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev in 2006, PhD (2011). He is an Associate Professor of the Aircraft Engines Design Department at Samara University. Advanced Engineering Aerospace School "Integrated Technologies by the creation of Aerospace Equipment", senior research fellow. He is a co-author of about 40 scientific articles and abstracts in the field of CAD and vibration protection. Author ID (RSCI): 735722; Author ID (Scopus): 56472780100; Researcher ID (WoS): E-7639-2014. melentev.vs@ssau.ru.

Ilya Fimovich Leykovskyy (b. 1985) graduated from the Samara National Research University named after academician S.P. Korolev in 2018. Head of the educational laboratory of the Aircraft Engines Design Department, Director of the Interactive Complex for advanced training of engineering personnel based on modern digital technologies "Immersive Technologies in engine building". nig391@inbox.ru.

Received November 12, 2024. Revised December 21, 2024. Accepted December 25, 2024.

ИНЖИНИРИНГ ОНТОЛОГИЙ

УДК 004.056

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-96-113



Обнаружение и объяснение аномалий в промышленных системах Интернета вещей на основе автокодировщика

© 2025, Д.А. Левшун, Д.С. Левшун, И.В. Котенко ✉

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН),
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В промышленных системах Интернета вещей объяснение аномалий может помочь выявить узкие места и способствовать оптимизации процессов. В статье предлагается подход к обнаружению аномалий при помощи автокодировщика и их объяснению на основе метода аддитивных объяснений Шепли. Результатом объяснения аномалий является предоставление набора признаков данных в промышленных системах Интернета вещей, более всего повлиявших на обнаружение аномальных случаев. Новизна предложенного подхода заключается в способности определять вклад отдельных признаков для выбранных образцов данных и вычислять средний вклад для всей выборки в виде рейтинга признаков. Оценка предлагаемого подхода проводится на наборах данных промышленного Интернета вещей с различным количеством признаков и объемом данных. Итоговая F -мера обнаружения аномалий достигает 88-93%, что превосходит рассмотренные в статье аналоги. Показано, как объяснимый искусственный интеллект может помочь раскрыть причины аномалий в отдельных образцах и в выборке данных. В качестве теоретической значимости предложенного подхода можно выделить то, что анализ аномалий помогает разобраться в работе интеллектуальных моделей обнаружения, позволяя выявлять факторы, влияющие на их выводы, и открывая ранее незамеченные закономерности. На практике предложенный метод может улучшить понимание текущих процессов для операторов систем безопасности, способствуя выявлению угроз и обнаружению ошибок в данных.

Ключевые слова: информационная безопасность, обнаружение аномалий, промышленные системы Интернета вещей, автокодировщик, объяснимый искусственный интеллект.

Цитирование: Левшун Д.А., Левшун Д.С., Котенко И.В. Обнаружение и объяснение аномалий в промышленных системах Интернета вещей на основе автокодировщика. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №1(55). С.96-113. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-1-96-113.

Финансирование: исследование выполнено за счёт гранта Санкт-Петербургского научного фонда № 23-РБ-01-09.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Технологии Интернета вещей (умного города, умных зданий, заводов, ферм и др.) призваны осуществлять сбор и анализ данных со всех объектов инфраструктуры, контролировать их работу и управлять ими [1, 2]. В промышленной области промышленные системы Интернета вещей (ИСИВ) позволяют увеличить эффективность производственных процессов, снизить затраты и обеспечить более высокую степень автоматизации. Подобные системы представляют собой сеть взаимосвязанных устройств (датчиков и систем), используемых для сбора, передачи и анализа данных.

В то время как экономическая выгода от интеллектуализации очевидна, обратная сторона этого процесса заключается в значительном увеличении ущерба, который может быть при-

чинён посредством информационных атак¹. Процесс интеллектуализации объектов критически важной инфраструктуры далёк от завершения, а решения по защите подобных объектов не успевают за темпом их технологического развития. Это создаёт разрыв между возможностями атакующих и защитных мер.

В то же время существует большое количество средств защиты информации, основанных на методах искусственного интеллекта (ИИ) [3, 4]. Большинство передовых технологий, таких как глубокие нейронные сети (НС), работают в режиме «чёрного ящика», когда причины принятия решения относительно состояния безопасности остаются неизвестными. В данном случае большим подспорьем для операторов систем безопасности становится объяснимый ИИ (ОИИ) [5]. Объяснение отклонений в данных ИСИБ позволяет различить выбросы² и аномалии³, специфичные для этой предметной области. Механизм обнаружения аномалий с использованием ОИИ способен выделить как аномалии, заслуживающие внимания с точки зрения поведения системы, так и выбросы из-за редкости значений в данных, не интересные с точки зрения её безопасности. Определение причин отклонений может сократить объём проверки, выполняемой экспертами. ОИИ может использовать различные методы, чтобы предоставить информацию о том, какие факторы способствовали возникновению аномалии.

В этой статье предложен подход к обнаружению аномалий при помощи автокодировщика (АК)⁴ и их объяснению на основе метода аддитивных объяснений Шепли (*SHapley Additive exPlanations, SHAP*) [6]. Модель АК используется для реконструкции входных данных от датчиков ИСИБ. Целью объяснения аномалий является предоставление набора признаков, которые способствуют ошибке реконструкции аномальных случаев.

1 Методы обнаружения аномалий

1.1 Обнаружение аномалий на основе интеллектуальных методов

Как правило, обнаружение атак осуществляется системами обнаружения вторжений, которые используют известные сигнатуры атак и ищут аномалии в виде отклонений от нормального поведения. Масштаб и разнообразие данных часто приводят к тому, что создавать «ручные» правила обнаружения атак и уязвимостей становится непрактичным. Использование машинного обучения позволяет искать закономерности в больших наборах данных и обучаться на них, чтобы предотвратить аналогичные атаки и динамически реагировать на изменение поведения ИСИБ.

Среди методов машинного обучения для обнаружения атак в ИСИБ часто применяются методы классификации: метод k -ближайших соседей [7], метод опорных векторов [8], скрытые марковские модели [9] и др. Традиционное машинное обучение зависит от экспертов, которые создают иерархию признаков данных. Для глубокого машинного обучения не всегда требуется наличие размеченного набора данных, оно способно использовать неструктурированные данные и автоматически определять особенности, которые отличают один образец от других. По этой причине широкое распространение получили глубокие НС для обнаружения атак [10, 11]. Сравнительно простым вариантом такой архитектуры являются глубокие НС с

¹ Информационная атака — это преднамеренное действие, направленное на нарушение работы компьютерных систем, сетей или цифровых устройств с целью нанесения ущерба.

² Выброс — в статистике результат измерения, выделяющийся из общей выборки.

³ Аномалия — это отклонение поведения системы от стандартного (ожидаемого). Они могут включать выбросы, а также охватывать более широкий спектр несоответствий, таких как временные изменения или неожиданные тенденции. Все выбросы могут быть аномалиями, но не все аномалии являются выбросами.

⁴ Автокодировщик (англ. *Autoencoder, AE*) — специальная архитектура искусственных НС, состоящая из двух частей: кодировщика (англ. *encoder*) и декодировщика (англ. *decoder*).

прямой связью для обнаружения вторжений. Но таким моделям часто не хватает способности обучаться на предыдущих входных данных и предыдущих итерациях обучения. Свёрточные НС (*Convolutional Neural Network, CNN*) позволяют анализировать структурированные данные [12]. Временные зависимости помогают учитывать рекуррентные НС, в частности с блоками долговременной краткосрочной памяти (*Long Short-Term Memory, LSTM*) [13].

При обучении моделей обнаружения аномалий получение большого количества маркированных аномальных данных, как это требуется при обучении с учителем, может быть трудоёмким, поскольку требуется ручная работа эксперта в предметной области. В результате полностью контролируемое обнаружение аномалий часто непрактично [14]. Ряд исследований направлен на применение методов обучения без учителя, для которых не требуются предварительные знания о вредоносной активности.

Известной моделью подобного типа является АК, который представляет собой глубокую НС для реконструкции входа (входных данных). АК формирует данные в более низкой размерности (кодирование) и реконструирует данные в исходной размерности (декодирование), т.е. восстанавливает оригинальные данные. Ошибка реконструкции – это мера, которая используется для оценки качества работы АК (и других моделей, которые могут восстанавливать данные). Ошибка реконструкции определяется как разница между оригинальными и восстановленными данными.

Для обнаружения аномалий АК анализирует функцию идентичности нормальных экземпляров, которые соответствуют ожидаемым или типичным образцам. Эти данные представляют собой поведение или характеристики, которые модель считает стандартными, и на основе которых она будет определять, что является аномалией. Аномалии имеют высокую погрешность (ошибку) реконструкции, что и способствует их обнаружению. На таких принципах работают инструменты *RANSynCoder* [15] и *InterFusion* [16]. В [17] проводится сравнение ряда АК, включая вариационный АК (*Variational AE, VAE*) и неполный АК с *CNN-1D* с методом главных компонент обнаружения аномальной активности в ИСИБ.

В качестве кодера и декодера также могут использоваться рекуррентные НС, что даёт преимущество при анализе временных рядов. Например, такой подход реализован в *LSTM-FWED (LSTM Encoder-Decoder Feature Weight)* [18]. АК может быть включён в генеративно-состязательную сеть (*Generative Adversarial Network, GAN*), как это сделано в *USAD* [19], или объединён с графовой НС, как в *FuSAGNet* [20].

1.2 Объяснимое обнаружение аномалий

Система ОИИ пытается описать своё поведение, чтобы сделать его более понятным для людей. ОИИ позволяет исследователям и разработчикам анализировать, какие факторы влияют на результаты работы моделей.

Интерпретируемость модели можно разделить на две категории: глобальную и локальную. Глобальная интерпретируемость означает, что пользователи могут понять модель непосредственно из её общей структуры. Локальная интерпретируемость проверяет входные данные и пытается выяснить, почему модель принимает определённое решение. Примерами глобальных моделей ОИИ можно назвать нейронно-аддитивную модель (*Neural Additive Model, NAM*) [21] и объяснимую сеть глубокого доверия (*Deep Belief Networks, DBN*) [22]. Примерами локальных моделей являются *TRUST (Transparency Relying Upon Statistical Theory)* [23], *LIME (Local Interpretable Model-Agnostic)* [24] и *SHAP* [6]. Ряд моделей совместно используют глобальную и локальную интерпретации, например, [25, 26].

Методы ОИИ подразделяются на методы апостериорного объяснения и методы предварительного объяснения. Методы апостериорного объяснения используются для объяснения производительности модели после её обучения [27, 28]. Методы предварительного объясне-

ния используются для объяснения производительности модели до её обучения, например, *LIME*. Данная модель аппроксимирует предсказания моделей чёрного ящика и обучается на локальной суррогатной модели для интерпретации отдельных прогнозов.

Большинство исследований об объяснениях вредоносной активности посвящены моделям, обучаемым с учителем, т.е. на заранее размеченных данных. Так, для обнаружения атак в [29] модели глубокого обучения объединяются с *SHAP*, который позволяет оценить вклад каждого признака в предсказание модели на основе теории игр. В [30] предложен подход к объяснению конкретной аномалии путём создания для неё случайного леса и дальнейшего извлечения правил, которые объясняют классификацию этой аномалии.

Модели для обнаружения аномалий, как правило, основаны на обучении без учителя. Объяснение результатов подобных моделей встречается реже, чем для моделей, основанных на обучении с учителем [31]. В [32] проводится анализ градиентов, «вносимых» каждым признаком конкретного экземпляра данных, которые можно получить из вариационного АК посредством автоматического дифференцирования⁵. Объяснимое обнаружение аномалий в [33] осуществляется на основе метода главных компонент и векторов Шепли, которые используются для объяснения полученных ошибок реконструкции. Схожим образом в [31, 34-36] объясняются при помощи метода *SHAP* ошибки реконструкции, полученные АК для выявления аномалий. Перечисленные подходы позволяют выделить признаки данных, которые наиболее важны с точки зрения их влияния на ошибку реконструкции для конкретного экземпляра данных.

2 Предлагаемый подход

Предлагается использовать АК в качестве модели обучения без учителя для обнаружения аномалий на основе полученных ошибок реконструкции данных. В обучении без учителя алгоритмы предназначены для выявления скрытых структур в данных без явных указаний на то, что искать. Ошибка реконструкции при этом представляет собой разницу между входным и выходным (реконструированным) значением. Экземпляры данных с ошибкой реконструкции, превышающий установленный для нормы порог, считаются аномальными. Целью модели ОИИ является определение признаков, оказывающих наибольшее влияние на результаты работы модели. Для этого модель ОИИ на основе *SHAP* вычисляет вектор Шепли для реконструированных признаков и связывает их с истинными значениями входных данных.

Предлагаемый подход включает следующие этапы.

2.1 Предобработка данных

После сбора данных для обучения модели необходимо провести их предобработку, включая удаление пропусков и дубликатов, нормализацию, кодирование категориальных признаков и разделение на обучающую и тестовую выборки. Подготовленные входные данные для модели ОИИ представляют собой набор векторов признаков (экземпляров):

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\},$$

$$x_i = \{f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{iM}\}$$

где x_i – i -ый вектор признаков, N – число векторов (длина набора данных), f_{ij} – значение j -того признака для i -ого вектора, M – число признаков данных.

Можно выделить множества значений отдельных признаков:

$$F_j = \{f_{1j}, f_{2j}, \dots, f_{Nj}\}.$$

⁵ Автоматическое дифференцирование – это способ вычисления производной функции, заданный программно. Этот вид дифференцирования опирается на правило дифференцирования сложной функции, представление функции в виде последовательности элементарных операций и перегрузке программных инструкций (функций, операторов).

2.2 Подготовка модели реконструкции данных

На данном этапе определяется модель АК, включая выбор архитектуры, определение слоёв, настройку функции потерь и оптимизатора. В данном подходе предлагается использовать АК с полносвязными слоями. Размер входного слоя кодера и выходного слоя декодера соответствуют числу признаков (M).

Выбираются и оптимизируются следующие гиперпараметры модели: количество скрытых слоёв кодера, количество нейронов на скрытых слоях, размер скрытого пространства, функция активации на скрытых слоях и функция активации на выходном слое. Для этого предлагается использовать алгоритм байесовской оптимизации [37]. Множество искомых гиперпараметров модели обозначается как множество λ , а пространство поиска этих гиперпараметров – как множество Λ , так что $\lambda \in \Lambda$. Функцию оптимизации β можно представить как $\beta: (X, \Lambda) \rightarrow \Phi_\lambda$, где Φ_λ – итоговая модель реконструкции данных с гиперпараметрами λ .

2.3 Обучение модели реконструкции данных

Обучение осуществляется на основе АК на нормальных данных. Кодировщик принимает входные данные и преобразует их в сжатое представление или латентное пространство. Декодировщик принимает сжатое представление и пытается восстановить исходные данные. Во время обучения АК минимизирует разницу между исходными и восстановленными данными, используя функцию потерь. Процесс реконструкции данных при помощи модели АК можно представить в следующем виде:

$$\Phi(x_i) = x'_i = \{f'_{i1}, f'_{i2}, \dots, f'_{iM}\}, \quad \Phi: X \rightarrow X',$$

где x_i – входной вектор данных, $x_i \in X$; x'_i – выходной (реконструированный) вектор данных, $x'_i \in X'$, X' – множество выходных векторов.

Можно выделить множества значений отдельных реконструированных признаков:

$$F'_j = \{f'_{1j}, f'_{2j}, \dots, f'_{Nj}\}.$$

2.4 Вычисление пороговых значений для обнаружения аномалий

На этом этапе определяется ошибка реконструкции нормальных данных. В качестве показателя предлагается использовать значение среднеквадратичной ошибки реконструкции. Для каждого вектора данных:

$$\varepsilon_i = |x_i - x'_i| = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M (f_{ij} - f'_{ij})^2, \quad i = 1..N.$$

Для отдельных признаков:

$$\xi_j = |F_j - F'_j| = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_{ij} - f'_{ij})^2, \quad j = 1..M.$$

Таким образом, для исходного набора данных получается множество ошибок реконструкции отдельных экземпляров $E = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_N\}$ и ошибки реконструкции признаков данных $R = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_M\}$, где $\varepsilon_i = \varepsilon(x_i, x'_i)$ – ошибка реконструкции для i -того вектора данных.

Для определения порогового значения на обучающих данных используется метод 90-го перцентиля, чтобы смягчить влияние выбросов в нормальных данных: $P(E \leq \delta) \geq 0.9$, где $P(E)$ – вероятностная мера, задающая распределение E , δ – пороговое значение ошибки реконструкции.

2.5 Обнаружение аномалий на тестовых данных

На данном этапе проводится сопоставление полученных ошибок прогнозирования с пороговым значением для выявления аномальных выбросов:

$$y_i = 1, \text{ если } \varepsilon_i \geq \delta, \text{ иначе } 0, \quad \varepsilon_i \in E,$$

где $y_i \in (0,1)$ – метка состояния безопасности для вектора признаков, значение 1 соответствует аномалии, а 0 – норме.

Для входного набора данных X результатом обнаружения является множество:

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}.$$

Отдельно можно выделить подмножество аномальных экземпляров:

$$X^* = \{x_i \mid y_i = 1\}, \quad i = 1..n,$$

где n – количество аномальных образцов.

2.6 Выбор признаков с наибольшими ошибками реконструкции

Для этого необходимо определить упорядоченное множество:

$$R' = \{\xi_{(1)}, \xi_{(2)}, \dots, \xi_{(M)}\},$$

для которого:

$$\xi_{(1)} \geq \xi_{(2)} \geq \dots \geq \xi_{(M)}, \quad \xi_{(j)} \in R.$$

Здесь индекс в скобках обозначает порядковый номер, где $\xi_{(1)}$ – значение наибольшей ошибки реконструкции.

Выбирается подмножество r , которое содержит наибольшую ошибку реконструкции для m признаков: $r = \{\xi_{(1)}, \xi_{(2)}, \dots, \xi_{(m)}\}$, $m \leq M$, $r \subseteq R'$.

2.7 Вычисление векторов Шепли для выбранных признаков

Для объяснения модели реконструкции необходимо определить модель объяснения Ω . Чтобы объяснить единичный случай x_i , модель использует упрощённые входные данные z и отображение h , такое, что $x = h(z)$, $z \in \{0, 1\}$. Таким образом, модель использует собственное упрощённое представление входных данных.

Для каждого признака из множества r необходимо объяснить, какие признаки (кроме выбранного) привели к ошибке реконструкции. Влияние каждого признака на реконструкцию определяется значением Шепли, которое описывает, как распределить общий выигрыш (или полезность) между участниками кооперативной игры. Значение Шепли для игрока определяется как среднее значение его предельного вклада по всем возможным порядкам входа игроков в игру. В данном случае число упорядоченных игроков равно M (число признаков). Пусть s подмножество j первых игроков (признаков) в этом упорядочении. В качестве характеристической функции кооперативной игры выступает модель АК, обозначенная как Φ . Тогда вклад j -го игрока определяется как разница между $\Phi(s)$ и $\Phi(s \setminus j)$, где $\Phi(s)$ – результат реконструкции по выбранному подмножеству признаков, а $\Phi(s \setminus j)$ – результат реконструкции по выбранному подмножеству признаков, исключая j -ый признак. Предыдущие разности вычисляются для всех возможных подмножеств $s \subseteq F \setminus \{j\}$, где $F \setminus \{j\}$ – множество всех признаков, за исключением j -го.

Значение Шепли для j -го признака вектора данных x_i при этом вычисляется как [6]:

$$\varphi_{ij}(\Phi, x_i) = \sum_{s \subseteq F_i \setminus \{j\}} \frac{|s|!(M - |s| - 1)!}{M!} [\Phi(s) - \Phi(s \setminus j)],$$

где символом «!» обозначена функция факториала, а символом $||$ – размер множества.

Разница значений $\Phi(s)$ и $\Phi(s \setminus j)$ определяет, как интересующий j -ый признак способствует реконструкции данных в заданном подмножестве признаков. Функцию модели ОИИ можно определить в форме линейной функции:

$$\Omega(z_i) = \varphi_{i0} + \sum_{j=1}^M \varphi_{ij} z_i,$$

где φ_{i0} – значение Шепли, при котором подмножество признаков является пустым.

Вектор Шепли – это вектор значений Шепли для всех игроков в игре. Для каждого признака в множестве r вычисляются векторы, которые содержат значения Шепли для всех признаков, помимо выбранного. Для этого исходная модель АК изменяется путём обнуления веса выбранного признака: Φ^k , $k = 1..m$. Так модель объяснения принимает на вход модель Φ^k и векторы данных x_i , предсказывает целевое значение k -го признака и определяет вектор Шепли. Результатом этого шага является матрица $\mathbf{V}$ (размером $m \times M$), в которой каждая строка представляет вектор Шепли для одного признака с наибольшей ошибкой реконструкции:

$$\mathbf{V}_i = \left(\varphi_{ij}(\Phi^k, x_i) \right)_{k=1, j=1}^{m, M},$$

Для каждого признака определяется среднее абсолютное значение Шепли. В результате получается вектор:

$$V_i = \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iM}\},$$

$$v_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \left| \varphi_{ij}(\Phi^k, x_i) \right|, \quad j = 1..M.$$

Для выборки данных таким образом можно получить множество векторов:

$$\{V_1, V_2, \dots, V_N\}.$$

2.8 Определение общего вклада признаков в обнаружение аномалий

Наивысшее значение Шепли соответствует наибольшему его вкладу в полученную ошибку реконструкции, т.е. впоследствии в результат обнаружения аномалий. Для каждого вектора V_i значения Шепли ранжируются от наибольшего к наименьшему:

$$v_{i(1)} \geq v_{i(2)} \geq \dots \geq v_{i(M)}, \quad v_{i(j)} \in V_i.$$

Здесь индексы (1)..(M) соответствует рейтингу признаков, где признак под индексом (1) соответствует наибольшему вкладу, а (M) – наименьшему.

Для всей выборки определяется средний рейтинг признаков по всем аномальным образцам и составляется множество:

$$G = \{g_1, g_2, \dots, g_M\},$$

$$g_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (j), \quad j=1..M,$$

где (j) – рейтинг j -го признака для i -го образца.

Данный рейтинг и определяет общий вклад каждого признака в результат обнаружения аномалий на всей выборке.

3 Экспериментальная оценка

Задачей поставленных экспериментов является оценка эффективности подхода к объяснимому обнаружению аномалий в ИСИБ с целью повышения надёжности и безопасности производственных процессов. Входными данными являются показатели датчиков ИСИБ, а выходными – набор показателей качества, таких как аккуратность, точность, полнота и F -мера обнаружения аномалий, а также средний рейтинг общего вклада признаков.

3.1 Наборы данных

В качестве экспериментальных наборов данных используются *BATADAL*⁶ [38] и *HAI*⁷ [39]. Выбор обусловлен намерением сравнить подход к объяснимому обнаружению аномалий на данных ИСИБ с различным количеством признаков и объёмом данных. Указанные наборы часто используются на практике при оценке подходов к обнаружению аномалий в промышленных системах.

⁶ *BATADAL* (*BAT*ile of the *Attack* *Detection* *Algorithms*). <https://www.batadal.net/data.html>.

⁷ *HAI* (*Hardware-in-the-loop-based Augmented Industrial control system*). <https://github.com/icsdataset/hai>.

Набор данных *BATADAL* собран на основе показателей индустриальной системы для распределения воды. Хранение и распределение воды по узлам спроса гарантируется семью резервуарами, уровень воды в которых запускает работу одного клапана и одиннадцати насосов, распределённых по пяти насосным станциям. Насосы, клапаны и датчики уровня воды в резервуарах подключены к девяти программируемым логическим контроллерам, которые расположены в непосредственной близости от монитора контроля гидравлических компонентов. Набор *BATADAL* содержит показатели 42 датчиков и актуаторов. Размер нормальной выборки составляет 8 761, а выборки с аномалиями – 4 177 экземпляров.

Наборы данных *HAI* за 2020 (*HAI* 1.0) и 2021 (*HAI* 2.0) годы собраны на испытательном стенде промышленной системы управления, на котором имитируется выработка электроэнергии паровыми турбинами и гидроаккумулирующими электростанциями. Технологический процесс испытательного стенда разделён на четыре процесса: процесс котла (P1), процесс турбины (P2), процесс очистки воды (P3) и аппаратно-программное моделирование (P4). Набор данных *HAI* 1.0 содержит записи 59 точек сбора (показателей датчиков, положения клапанов и т.д.) в выборке 550 800 экземпляров нормальных и 295 000 – аномальных данных. Набор данных *HAI* 2.0 содержит записи 78 точек сбора в выборке 921 603 экземпляров нормальных и 402 005 – аномальных данных. С подробной структурой испытательных стендов и полным наименованием признаков можно ознакомиться в [38, 39]. Далее упоминаются отдельные элементы систем в том виде, в котором они приведены в оригинальных источниках. Технические подробности опущены.

3.2 Параметры моделей реконструкции данных

Размер входного слоя АК (n_{input}) соответствует количеству признаков данных. Для оптимизации гиперпараметров архитектуры АК для каждого набора данных используется байесовский оптимизатор библиотеки *KerasTuner*⁸. Области поиска составляют:

- количество скрытых слоёв (n_{layers}) – 1, 2 или 3;
- количество нейронов на скрытых слоях (n_{units}) – 64, 35, 32, 28 или 25;
- размер скрытого пространства ($encoding_dim$) – 32, 31 или 21;
- функция активации на скрытых слоях ($hidden_afunc$) – $\tanh$ ⁹ или $relu$ ¹⁰;
- функция активации на выходном слое ($output_afunc$) – $\tanh$ или $relu$.

Параметры обучения на наборе данных *BATADAL*: размер пакета¹¹ – 32; скорость обучения – 0.001; число эпох – 500. Параметры обучения на наборах данных *HAI*: размер пакета – 64; скорость обучения – 0.001; число эпох – 50. Чтобы ускорить расчёт *SHAP*, используется метод кластеризации *k-средних*. Число кластеров установлено в 100, а параметр m принят равным 5.

Описанный подход реализован с использованием языка *Python*.

3.3 Аналоги для сравнения

В качестве подходов к обнаружению аномалий для сравнения полученных результатов выбраны следующие подходы, основанные на методах обучения без учителя:

- *USAD* [19] – подход к обнаружению аномалий, основанный на двух АК в архитектуре *GAN*;
- *VAE* [17] – подход к обнаружению аномалий с использованием вариационного АК;
- *RANSynCoder* [15] – подход к обнаружению аномалий, включающий самонастройку признаков для случайного выбора наборов входных признаков и построения нескольких АК для реконструкции данных временного ряда;
- *InterFusion* [16] – подход к обнаружению аномалий, который основан на использовании иерархического *VAE* с двумя стохастическими скрытыми переменными, каждая из которых изучает низкоразмерные межметрические или временные вложения;
- *FuSAGNet* и *SAE* [20] – подход к обнаружению аномалий, который объединяет разреженный АК и графовую НС, явно моделируя взаимосвязи внутри многомерных временных рядов.

⁸ *KerasTuner*. https://keras.io/keras_tuner/.

⁹ *Гиперболический тангенс* (англ. *tanh*) – функция активации, которая преобразует входные значения в диапазоне от -1 до 1 на основе гиперболического тангенса.

¹⁰ *Линейный выпрямитель* (англ. *Rectified Linear Unit, ReLU*) – это нелинейная функция активации, которая преобразует входное значение в значение от 0 до положительной бесконечности (если входное значение меньше или равно 0, то *ReLU* выдаёт 0, в противном случае – входное значение).

¹¹ *В глубоком обучении пакет* (или батч) – это подмножество данных, которое используется для обучения модели за один шаг обновления весов.

- *LSTM-FWED* [18] – подход к обнаружению аномалий на основе кодера-декодера *LSTM* с защитой веса признаков от состязательных атак.

3.4 Показатели качества

В качестве функции потерь для всех наборов данных и моделей используется средне-квадратичная ошибка. Показателями качества обнаружения аномалий является аккуратность (*ACC*), точность (*P*), полнота (*R*) и *F*-мера (*F1*):

$$ACC = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}, \quad P = \frac{TP}{TP + FP}, \quad R = \frac{TP}{TP + FN}, \quad F1 = \frac{2TP}{2TP + FP + FN},$$

где *TP* – количество правильно классифицированных аномальных образцов; *TN* – количество правильно классифицированных нормальных образцов; *FP* – количество нормальных образцов, ошибочно классифицированных как аномальные образцы; *FN* – количество аномальных образцов, ошибочно классифицированных как нормальные.

Каждый показатель фокусируется на различных аспектах производительности модели. Аккуратность показывает общую долю правильных предсказаний, но зависит от сбалансированности классов. Точность важна, когда необходимо минимизировать количество ложноположительных результатов, а полнота – когда нужно максимизировать количество правильно идентифицированных положительных случаев. *F*-мера объединяет точность и полноту в одну метрику, что позволяет лучше оценить баланс между ними.

3.5 Результаты

В результате оптимизации гиперпараметров на нормальной выборке получены модели АК, описание архитектуры которых представлено в таблице 1. Целью оптимизации являлась минимизация ошибки реконструкции нормальных данных.

Таблица 1 – Описание архитектуры итоговых моделей автокодировщиков

Модель	<i>n_input</i>	<i>n_layers</i>	<i>n_units</i>	<i>encoding_dim</i>	<i>hidden_afunc</i>	<i>output_afunc</i>
АК-1	32	3	35, 28, 21	21	tanh	tanh
АК-2	58	1	31	31	tanh	tanh
АК-3	78	2	64, 32	32	tanh	tanh

В таблице 2 представлены результаты обнаружения аномалий на выбранных наборах данных. Результаты аналогов для набора данных *BATADAL* взяты из [38], для *HAI* 1.0 из [20], а для *HAI* 2.0 из [40].

Для каждого набора данных выбрано 5 признаков с наибольшей ошибкой реконструкции (в скобках приведён перевод наименований признаков из оригинального описания соответствующих наборов данных):

- *BATADAL* – *S_V2* (статус клапана *V2*), *P_J14* (давление сочленения *J14*), *S_PU4* (статус насоса *PU4*), *F_PU6* (поток насоса *PU6*) и *F_PU7* (поток насоса *PU7*);
- *HAI* 1.0 – *P2_SIT01* (текущая частота вращения турбины), *P1_PCV02Z* (текущее положение клапана *PCV02*), *P1_PCV02D* (команда для положения клапана *PCV2*), *P1_FCV03D* (команда для положения клапана *FCV03*) и *P1_FCV03Z* (текущее положение клапана *FCV03*);
- *HAI* 2.0 – *P2_VT01* (сигнал фазовой задержки ключевого фазового зонда), *P1_PCV02Z* (текущее положение клапана *PCV02*), *P2_SIT01*, *P2_SIT02* (текущая частота вращения турбины) и *P1_PCV02D* (команда для положения клапана *PCV2*).

Вектор Шепли для каждого признака можно изобразить в виде графика (см. рисунок 1). Из рисунка видно, как признак с наибольшей ошибкой реконструкции для экземпляра с наибольшей ошибкой влияет на предсказание модели, приближая его к ожидаемому значению. Тёмно-серыми значениями (слева) выделены признаки, которые приближают получен-

ное значение образца к ожидаемому (выделен полужирным), а серыми справа – отдаляющие признаки. Снизу (на графиках - а, б, в) приведены наименования признаков и их значения для выбранного экземпляра. Положительный вклад имеют признаки, которые увеличивают предсказание целевого признака (S_V2 для *BATADAL*, $P2_SIT01$ для *HAI 1.0* и $P2_VT01$ для *HAI 2.0*) и приближают предсказание к ожидаемому значению. Отрицательный вклад имеют признаки, которые уменьшают предсказание модели.

Таблица 2 – Результаты обнаружения аномалий

Набор данных	Модель	<i>ACC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F1</i>
<i>BATADAL</i>	AK-1	0.9725	0.8919	0.8720	0.8818
	<i>VAE</i> [17]	–	0.9630	0.7620	0.8510
	<i>LSTM-FWED</i> [18]	0.9396	0.9228	0.4740	0.6293
<i>HAI 1.0</i>	AK-2	0.9931	0.9435	0.9112	0.9271
	<i>FuSAGNet</i> [20]	–	0.8679	0.7479	0.8034
	<i>SAE</i> [20]	–	0.7839	0.6566	0.7239
	<i>USAD</i> [19].	–	0.0932	0.1335	0.1098
<i>HAI 2.0</i>	AK-3	0.9963	0.8699	0.9808	0.9220
	<i>RANSynCoder</i> [15]	–	0.8910	0.7760	0.8290
	<i>InterFusion</i> [16]	–	0.7440	0.8390	0.7890
	<i>USAD</i> [19].	–	0.7600	0.4800	0.5880

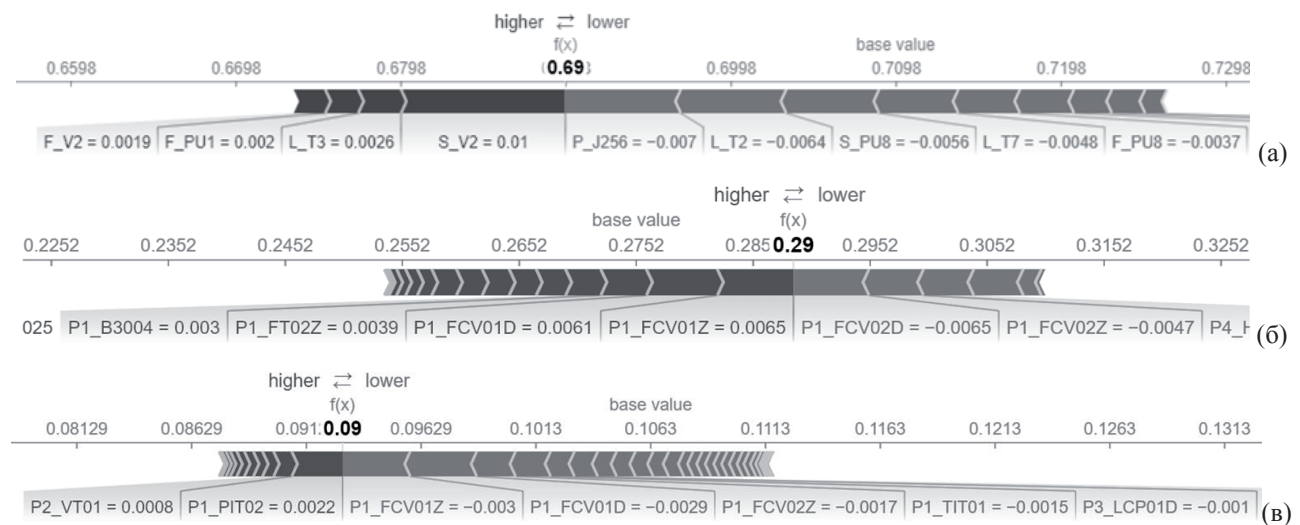


Рисунок 1 – Вектор Шепли для одного образца и признака: (а) S_V2 набора данных *BATADAL*, (б) $P2_SIT01$ набора данных *HAI 1.0*, (в) $P2_VT01$ набора данных *HAI 2.0*

Определён вектор средних значений Шепли для каждого образца данных. На рисунке 2 представлен график десяти признаков с наибольшим вкладом для экземпляра с высшей ошибкой реконструкции, т.е. первые 10 значений вектора средних значений Шепли V_i , $i = 234$ для *HAI 1.0* и $i = 653$ для *HAI 2.0*. Вычислены значения среднего рейтинга каждого признака по всем аномальным экземплярам. На рисунке 3 представлен вклад признаков в обнаружение аномалий на наборе данных *BATADAL*, на рисунке 4 – на наборе данных *HAI 1.0*, на рисунке 5 – на наборе данных *HAI 2.0*.

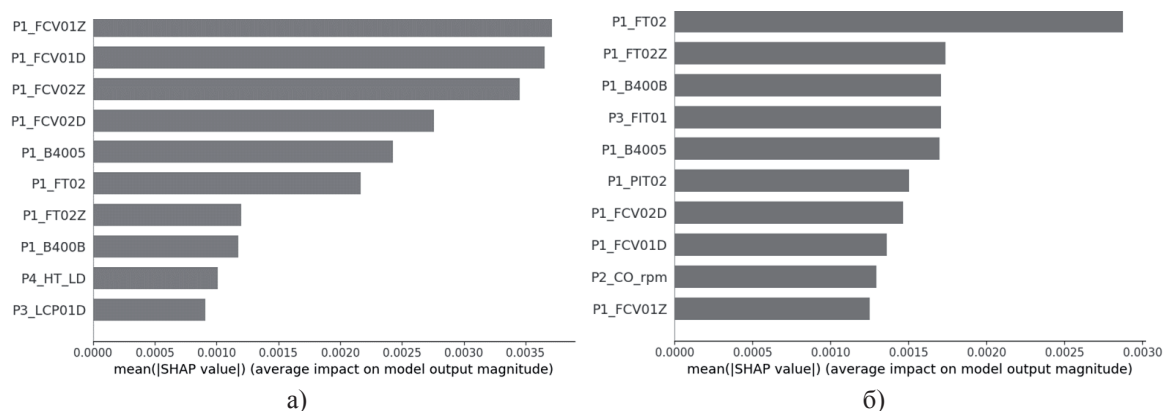


Рисунок 2 – Вклад признаков в ошибку реконструкции для одного образца набора данных (а) *HAI 1.0* и (б) *HAI 2.0*

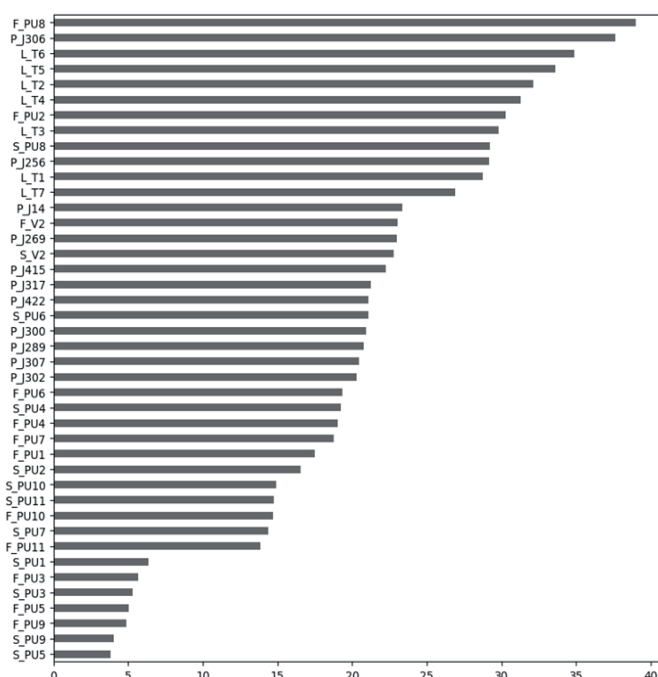


Рисунок 3 – Вклад признаков в ошибку реконструкции на аномальных образцах набора данных *BATADAL*

3.6 Анализ результатов

Предложенный подход позволил получить наибольшую полноту обнаружения аномалий для всех экспериментальных наборов данных 87-98%, а точность обнаружения 87-94%, уступая не более 7% подходам, использованным в [15, 17]. При этом гармоничное среднее по *F*-мере для АК-1, 2 и 3 выше, чем у аналогов (88-93%), что свидетельствует о сбалансированном результате по полноте и точности обнаружения аномалий. Это позволяет минимизировать ложноположительные срабатывания и не пропустить положительные случаи. В задачах обнаружения аномалий значимость ложноположительных и ложноотрицательных срабатываний может значительно различаться.

Например, пропуск аномалии может иметь серьезные последствия, в то время как ложное срабатывание может быть менее критичным. В производственных процессах пропуск аномалий может привести к поломке оборудования или снижению качества продукции и вызвать значительные финансовые потери. Ложные срабатывания могут привести к ненужным действиям, таким как блокировка процессов, вызов служб безопасности или др. В системах, где критически важно обнаруживать угрозы, часто принимается решение о повышении чувствительности к аномалиям, даже если это может привести к большему количеству ложных срабатываний.

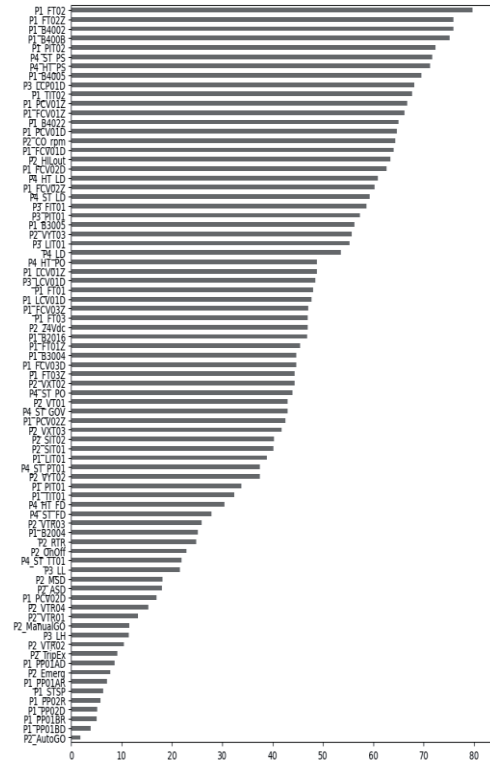


Рисунок 5 – Вклад признаков в ошибку реконструкции на аномальных образцах набора данных HAI 2.0

Использование векторов Шепли позволяет продемонстрировать влияние признаков на полученный результат реконструкции. Например, на рисунке 1б можно видеть, что в равной степени (значение Шепли ± 0.0065) на текущую частоту вращения турбины стенда *HAI* влияют текущее положение клапанов FCV01 (P1_FCV01Z) и FCV02 (P1_FCV02D). Значения данных признаков имеют наибольший вклад в ошибку реконструкции экземпляра данных в целом (см. рисунок 2).

Наибольший вклад в обнаружение аномалий на наборе данных *HAI* 1.0 вносят признаки P1_FCV01Z (текущее положение клапана FCV01), P1_B3004 (заданное значение уровня воды), P1_FCV01D (команда для положения клапана FCV01).

Объяснение аномалий помогает исследователям лучше понять поведение интеллектуальных моделей обнаружения, выявить факторы, влияющие на их выводы, и открыть незамеченные ранее закономерности. На практике предложенный подход может способствовать

лучшему пониманию текущих процессов в системах безопасности, помогая обнаруживать угрозы и ошибки в данных.

Заключение

В статье описан подход к обнаружению аномалий при помощи АК и их объяснению на основе метода *SHAP*. АК обучается без учителя, исследуя функцию идентичности данных для реконструкции нормальных экземпляров. В отличие от аналогов, в разработанном подходе предлагается определять вклад признаков для отдельных образцов аномалий и вычислять средний вклад для всей выборки. Понимание того, какие признаки способствуют аномалиям, может помочь в улучшении моделей и алгоритмов для более точного обнаружения аномалий.

Оценка качества предлагаемого подхода проведена на известных наборах данных (*BATADAL*, *HAI 1.0* и *HAI 2.0*). По итоговой *F*-мере обнаружения достигнут результат в 88-93%, который превосходит рассмотренные аналоги. Показано, как ОИИ может помочь раскрыть причины аномалий в отдельных образцах, и в выборке данных.

Авторский вклад

Котенко И.В. – выбор и постановка задачи исследования; Левшун Д.А., Левшун Д.С. – выбор решений; Левшун Д.А. – программная реализация и проведение экспериментов; Левшун Д.А., Левшун Д.С., Котенко И.В. – обсуждение результатов экспериментов, анализ полученных результатов.

Список источников

- [1] *Levshun D., Chevalier Y., Kotenko I., Chechulin A.* Design and verification of a mobile robot based on the integrated model of cyber-Physical systems. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2020. Vol.105. P.102151. DOI: 10.1016/j.simpat.2020.102151.
- [2] *Федорченко Е.В., Новикова Е.С., Котенко И.В., Гайфулина Д.А., Тушканова О.Н., Левшун Д.С., Мелешко А.В., Муренин И.Н., Коломеец М.В.* Система измерения защищенности информации и персональных данных для устройств интернета вещей. *Вопросы кибербезопасности*. 2022. №5. С.28-46. DOI: 10.681/2311-3456-2022-5-28-46.
- [3] *Levshun D., Kotenko I.* A survey on artificial intelligence techniques for security event correlation: models, challenges, and opportunities. *Artificial Intelligence Review*. 2023. Vol.56(8). P.8547-8590. DOI: 10.1007/s10462-022-10381-4.
- [4] *Котенко И.В., Левшун Д.А.* Методы интеллектуального анализа системных событий для обнаружения многошаговых кибератак: использование методов машинного обучения. *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2023. №3. С. 3-15. DOI: 10.14357/20718594230301.
- [5] *Nwakanma C.I., Ahakonye L.A.C., Njoku J.N., Odirichukwu J.C., Okolie S.A., Uzundu C., Kim D.S.* Explainable Artificial Intelligence (XAI) for Intrusion Detection and Mitigation in Intelligent Connected Vehicles: A Review. *Applied Sciences*. 2023. Vol.13(3). P.1252. DOI: 10.3390/app13031252.
- [6] *Lundberg S.M., Lee S.I.* A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in neural information processing systems*. 2017. Vol.30. P.1-10. DOI: 10.48550/arXiv.1705.07874.
- [7] *Yang H., Liang S., Ni J., Li H., Shen X.S.* Secure and efficient k NN classification for industrial Internet of Things. *IEEE Internet of Things Journal*. 2020. Vol.7(11). P.10945-10954. DOI: 10.1109/JIOT.2020.2992349.
- [8] *Hosseinzadeh M., Rahmani A.M., Vo B., Bidaki M., Masdari M., Zangakani M.* Improving security using SVM-based anomaly detection: issues and challenges. *Soft Computing*. 2021. Vol.25(4). P.3195-3223. DOI: 10.1007/s00500-020-05373-x.
- [9] *Khan M.A., Abuhasel K.A.* An evolutionary multi-hidden Markov model for intelligent threat sensing in industrial internet of things. *The Journal of Supercomputing*. 2021. Vol.77(6). P.6236-6250. DOI:10.1007/s11227-020-03513-6.
- [10] *Illy P., Kaddoum G., de Araujo-Filho P.F., Kaur K., Garg S.* A hybrid multistage DNN-based collaborative IDPS for high-risk smart factory networks. *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2022. Vol.19(4). P.4273-4283. DOI: 10.1109/TNSM.2022.3202801.

- [11] **Nandanwar H., Katarya R.** Deep learning enabled intrusion detection system for Industrial IOT environment. *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 249. P.123808. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.123808.
- [12] **Setitra M.A., Fan M., Agbley B.L.Y., Bensalem Z.E.A.** Optimized MLP-CNN model to enhance detecting DDoS attacks in SDN environment. *Network*. 2023. Vol.3(4). P.538-562. DOI: 10.3390/network3040024.
- [13] **Hasan T., Malik J., Bibi I., Khan W.U., Al-Wesabi F.N., Dev K., Huang G.** Securing industrial internet of things against botnet attacks using hybrid deep learning approach. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*. 2022. Vol.10(5). P.2952-2963. DOI: 10.1109/TNSE.2022.3168533.
- [14] **Pang G., Shen C., Cao L., Hengel A.V.D.** Deep learning for anomaly detection: A review. *ACM computing surveys (CSUR)*. 2021. Vol.54(2). P.1-38. DOI: 10.1145/3439950.
- [15] **Abdulaal A., Liu Z., Lancewicki T.** Practical Approach to Asynchronous Multivariate Time Series Anomaly Detection and Localization. In.: *Proc. of the 27th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*. 2021. P.2485-2494. DOI: 10.1145/3447548.3467174.
- [16] **Li Z., Zhao Y., Han J., Su Y., Jiao R., Wen X., Pei D.** Multivariate Time Series Anomaly Detection and Interpretation using Hierarchical Inter-Metric and Temporal Embedding. In.: *Proc. of the 27th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*. 2021. P.3220-3230. DOI: 10.1145/3447548.3467075.
- [17] **Kravchik M., Shabtai A.** Efficient cyber attack detection in industrial control systems using lightweight neural networks and PCA. *IEEE transactions on dependable and secure computing*. 2021. Vol.19(4). P.2179-2197. DOI: 10.1109/TDSC.2021.3050101.
- [18] **Liu Y., Xu L., Yang S., Zhao D., Li X.** Adversarial sample attacks and defenses based on LSTM-ED in industrial control systems // *Computers & Security*. 2024. Vol. 140. P.103750. DOI: 10.1016/j.cose.2024.103750.
- [19] **Audibert J., Michiardi P., Guyard F., Marti S., Zuluaga M.A.** USAD: Unsupervised Anomaly Detection on Multivariate Time Series. In.: *Proc. of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*. 2020. P. 3395-3404. DOI: 10.1145/3394486.3403392.
- [20] **Han S., Woo S.S.** Learning sparse latent graph representations for anomaly detection in multivariate time series. In.: *Proc. of the 28th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*. 2022. P.2977-2986. DOI: 10.1145/3534678.3539117.
- [21] **Utkin L., Konstantinov A.** An Extension of the Neural Additive Model for Uncertainty Explanation of Machine Learning Survival Models // *Cyber-Physical Systems: Intelligent Models and Algorithms*. Cham : Springer International Publishing, 2022. P.3-13. DOI: 10.1007/978-3-030-95116-0_1.
- [22] **Chen Q., Pan G., Chen W., Wu P.** A novel explainable deep belief network framework and its application for feature importance analysis. *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21(22). P.25001-25009. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3084846.
- [23] **Zolanvari M., Yang Z., Khan K., Jain R., Meskin N.** TRUST XAI: Model-agnostic explanations for ai with a case study on iiot security. *IEEE Internet of Things Journal*. 2023. Vol.10(4). P.2967-2978. DOI: 10.1109/JIOT.2021.3122019.
- [24] **Ribeiro M.T., Singh S., Guestrin C.** "Why should i trust you?" Explaining the predictions of any classifier. In.: *Proc. of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*. 2016. P.1135-1144. DOI: 10.1145/2939672.2939778.
- [25] **Liu M., Shi J., Cao K., Zhu J., Liu S.** Analyzing the training processes of deep generative models. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*. 2017. Vol.24(1). P.77-87. DOI: 10.1109/TVCG.2017.2744938.
- [26] **Wang P.Y., Galhotra S., Pradhan R., Salimi B.** Demonstration of generating explanations for black-box algorithms using Lewis. In.: *Proc. of the VLDB Endowment*. 2021. Vol.14(12). P.2787-2790. DOI: 10.14778/3476311.3476345.
- [27] **Moradi M., Samwald M.** Post-hoc explanation of black-box classifiers using confident item sets. *Expert Systems with Applications*. 2021. Vol.165. P.113941. DOI: 10.1016/j.eswa.2020.113941.
- [28] **Nourani M., Roy C., Block J. E., Honeycutt D. R., Rahman T., Ragan E., Gogate V.** Anchoring bias affects mental model formation and user reliance in explainable ai systems. In.: *Proc. of the 26th International Conference on Intelligent User Interfaces*. 2021. P.340-350. DOI: 10.1145/3397481.3450639.
- [29] **Abou El Houda Z., Brik B., Senouci S.M.** A novel iot-based explainable deep learning framework for intrusion detection systems. *IEEE Internet of Things Magazine*. 2022. Vol.5(2). P.20-23. DOI: 10.1109/IOTM.005.2200028.
- [30] **Kopp M., Pevný T., Holeňa M.** Anomaly explanation with random forests. *Expert Systems with Applications*. 2020. Vol.149. P.113187. DOI: 10.1016/j.eswa.2020.113187.
- [31] **Antwarg L., Miller R.M., Shapira B., Rokach L.** Explaining anomalies detected by autoencoders using Shapley Additive Explanations // *Expert systems with applications*. 2021. Vol. 186. P.115736. DOI: 10.1016/j.eswa.2020.113187.

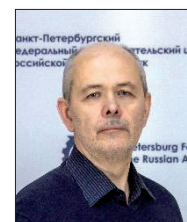
- [32] **Nguyen Q.P., Lim K.W., Divakaran D.M., Low K.H., Chan M.C.** Gee: A gradient-based explainable variational autoencoder for network anomaly detection. In.: *Proc of the 2019 IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS)*. 2019. P.91-99. DOI: 10.1109/CNS.2019.8802833.
- [33] **Takeishi N.** Shapley values of reconstruction errors of PCA for explaining anomaly detection. In.: *Proc of the 2019 international conference on data mining workshops (ICDMW)*. 2019. P.793-798. DOI: 10.1109/ICDMW.2019.00117.
- [34] **Roshan K., Zafar A.** Utilizing XAI technique to improve autoencoder based model for computer network anomaly detection with shapley additive explanation (SHAP). *International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC)*. 2021. Vol.13(6). P.1-20. DOI: 10.5121/ijcnc.2021.13607.
- [35] **Huong T.T., Bac T.P., Ha K.N., Hoang N.V., Hoang N.X., Hung N.T., Tran K.P.** Federated learning-based explainable anomaly detection for industrial control systems. *IEEE Access*. 2022. Vol.10. P.53854-53872. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3173288.
- [36] **Mathuros K., Venugopalan S., Adepu S.** WaXAI: Explainable Anomaly Detection in Industrial Control Systems and Water Systems. In.: *Proceedings of the 10th ACM Cyber-Physical System Security Workshop*. 2024. P.3-15. DOI: 10.1145/3626205.3659147.
- [37] **Snoek J., Larochelle H., Adams R. P.** Practical bayesian optimization of machine learning algorithms. *Advances in neural information processing systems*. 2012. Vol.25. P.1-9. DOI: 10.48550/arXiv.1206.2944.
- [38] **Taormina R., Galelli S., Tippenhauer N. O., Salomons E., Ostfeld A., Eliades D. G.** Battle of the attack detection algorithms: Disclosing cyber attacks on water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2018. Vol.144(8). P.04018048. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000969.
- [39] **Shin H.K., Lee W., Yun J.H., Min B.G.** Two ICS security datasets and anomaly detection contest on the HIL-based augmented ICS testbed. In.: *Proceedings of the 14th Cyber Security Experimentation and Test Workshop*. 2021. P.36-40. DOI: 10.1145/3474718.3474719.
- [40] **Kim B., Alawami M.A., Kim E., Oh S., Park J., Kim H.** A comparative study of time series anomaly detection models for industrial control systems. *Sensors*. 2023. Vol.23(3). P.1310. DOI: 10.3390/s23031310.

Сведения об авторах



Левшун Диана Альбертовна, 1995 г. рождения. С отличием окончила бакалавриат Оренбургского государственного университета (2017) и магистратуру Университета ИТМО в 2019 г. Младший научный сотрудник лаборатории проблем компьютерной безопасности СПб ФИЦ РАН. В списке научных трудов около 70 работ в области информационной безопасности и искусственного интеллекта. ORCID: 0000-0002-5266-8649; Author ID (РИНЦ): 968755; Author ID (Scopus): 58114512500; Researcher ID (WoS): ABG-9837-2020. gaifulina@comsec.spb.ru.

Левшун Дмитрий Сергеевич, 1993 г. рождения. Выпускник СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (2017), к.т.н. (2021). Старший научный сотрудник лаборатории проблем компьютерной безопасности СПб ФИЦ РАН. Доцент СПбГУТ и Европейского университета в Санкт-Петербурге. В списке научных трудов более 100 работ в области информационной безопасности, проектирования защищенных систем, Интернета вещей, искусственного интеллекта, моделирования атак и атакующих. ORCID: 0000-0003-1898-6624; Author ID (РИНЦ): 840344; Author ID (Scopus): 57189306576; Researcher ID (WoS): C-1566-2018. levshun@comsec.spb.ru.



Котенко Игорь Витальевич, 1961 г. рождения. С отличием окончил Военный инженерный Краснознамённый институт им. А.Ф. Можайского в 1983 г. и Военную академию связи в 1987 г., д.т.н. (1999), профессор (2021), заслуженный деятель науки Российской Федерации (2023). Главный научный сотрудник и руководитель Лаборатории проблем компьютерной безопасности СПб ФИЦ РАН, профессор Университета ИТМО, СПбГУТ, УрФУ, Харбинского политехнического университета (КНР) и Хэйлунцзянского университета (КНР). В списке научных трудов более 800 работ в области безопасности компьютерных сетей, искусственного интеллекта, телекоммуникационных систем, включая 25 монографий, и более 100 патентов

на изобретения и зарегистрированных программ. ORCID: 0000-0001-6859-7120; Author ID (РИНЦ): 110102; Author ID (Scopus): 15925268000. ivkote@comsec.spb.ru. ✉.

Поступила в редакцию 22.10.2024, после рецензирования 2.12.2024. Принята к публикации 14.01.2025.



Detecting and explaining anomalies in industrial Internet of things systems using an autoencoder

© 2025, D.A. Levshun, D.S. Levshun, I.V. Kotenko ✉

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Abstract

In industrial Internet of Things (IoT) systems, explaining anomalies plays a crucial role in identifying bottlenecks and optimizing processes. This paper proposes an approach to anomaly detection using an autoencoder and its explanation based on the SHAP method. The purpose of the anomaly explanation is to provide a set of data features in industrial IoT systems that most significantly influence anomaly detection. The novelty of this approach lies in its ability to quantify the contribution of individual features for specific data samples and to calculate an average contribution across the dataset, providing a feature importance ranking. The proposed approach is tested on Industrial IoT datasets with varying feature counts and data volumes. The anomaly detection achieves an F-measure of 88-93%, outperforming the comparable methods discussed. The study demonstrates how explainable artificial intelligence can identify the causes of anomalies in both individual samples and datasets as a whole. The theoretical importance of the proposed approach lies in its ability to shed light on the workings of intelligent detection models, enabling the identification of factors influencing their outcomes and uncovering previously unnoticed patterns. In practice, this method enhances security system operators' understanding of ongoing processes, aiding in threat identification and error detection within data.

Keywords: information security, anomaly detection, industrial IoT systems, autoencoder, explainable artificial intelligence.

For citation: Levshun DA, Levshun DS, Kotenko IV. Detecting and explaining anomalies in industrial Internet of things systems using an autoencoder [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(1): 96-113. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-1-96-113.

Financial Support: The study was supported by the grant of the St. Petersburg Science Foundation No. 23-ПБ-01-09.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures and tables

- Figure 1 - Shapley value for one sample and feature: (a) S_V2 of BATADAL dataset, (b) P2_SIT01 of HAI 1.0 dataset, (c) P2_VT01 of HAI 2.0 dataset
 Figure 2 - Contribution of features to reconstruction error for one sample of (a) HAI 1.0 and (b) HAI 2.0 dataset
 Figure 3 - Contribution of features to reconstruction error on anomalous samples of the BATADAL dataset
 Figure 4 - Contribution of features to reconstruction error on anomalous samples of the HAI 1.0 dataset
 Figure 5 - Contribution of features to reconstruction error on anomalous samples of the HAI 2.0 dataset
 Table 1 - Description of the architecture of the final models of autoencoders
 Table 2 - Anomaly detection results

References

- [1] Levshun D, Chevalier Y, Kotenko I, Chechulin A Design and verification of a mobile robot based on the integrated model of cyber-Physical systems. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2020; 105: 102151. DOI: 10.1016/j.simpat.2020.102151.
- [2] Fedorchenko EV, Novikova ES, Kotenko IV, Gaifulina DA, Tushkanova ON, Levshun DS, Meleshko AV, Murenin IN, Kolomeec MV. The security and privacy measuring system for the internet of things devices [In Russian]. *Voprosy kiberbezopasnosti*. 2022; 5: 28-46. DOI: 10.681/2311-3456-2022-5-28-46.
- [3] Levshun D, Kotenko I. A survey on artificial intelligence techniques for security event correlation: models, challenges, and opportunities. *Artificial Intelligence Review*. 2023; 56(8): 8547-8590. DOI: 10.1007/s10462-022-10381-4.
- [4] Kotenko IV, Levshun DA. Methods of intelligent system event analysis for multistep cyber-attack detection: using machine learning methods [In Russian]. *Iskusstvennyy Intellekt i Prinyatie Resheniy*. 2023; 3: 3-15. DOI: 10.14357/20718594230301.

- [5] **Nwakanma CI, Ahakonye LAC, Njoku JN, Odirichukwu JC, Okolie SA, Uzundu C, Kim DS.** Explainable Artificial Intelligence (XAI) for Intrusion Detection and Mitigation in Intelligent Connected Vehicles: A Review. *Applied Sciences*. 2023; 13(3): 1252. DOI: 10.3390/app13031252.
- [6] **Lundberg SM, Lee SI.** A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in neural information processing systems*. 2017; 30: 1-10. DOI: 10.48550/arXiv.1705.07874.
- [7] **Yang H, Liang S, Ni J, Li H, Shen XS.** Secure and efficient k-NN classification for industrial Internet of Things. *IEEE Internet of Things Journal*. 2020; 7(11): 10945-10954. DOI: 10.1109/IIOT.2020.2992349.
- [8] **Hosseinzadeh M, Rahmani A M, Vo B, Bidaki M, Masdari M, Zangakani M** Improving security using SVM-based anomaly detection: issues and challenges. *Soft Computing* 2021; 25(4): 3195-3223. DOI: 10.1007/s00500-020-05373-x.
- [9] **Khan M A, Abuhasel K A.** An evolutionary multi-hidden Markov model for intelligent threat sensing in industrial internet of things. *The Journal of Supercomputing*. 2021; 77(6): 6236-6250. DOI:10.1007/s11227-020-03513-6.
- [10] **Illy P, Kaddoum G, de Araujo-Filho, P F, Kaur K, Garg S.** A hybrid multistage DNN-based collaborative IDPS for high-risk smart factory networks. *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2022; 19(4): 4273-4283. DOI: 10.1109/TNSM.2022.3202801.
- [11] **Nandanwar H, Katarya R.** Deep learning enabled intrusion detection system for Industrial IOT environment. *Expert Systems with Applications*. 2024; 249: 123808. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.123808.
- [12] **Setitra MA, Fan M, Agbley BLY, Bensalem ZEA.** Optimized MLP-CNN model to enhance detecting DDoS attacks in SDN environment. *Network*. 2023; 3(4): 538-562. DOI: 10.3390/network3040024.
- [13] **Hasan T, Malik J, Bibi I, Khan W U, Al-Wesabi F N, Dev K, Huang G.** Securing industrial internet of things against botnet attacks using hybrid deep learning approach. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*. 2022; 10(5): 2952-2963. DOI: 10.1109/TNSE.2022.3168533.
- [14] **Pang G, Shen C, Cao L, Hengel AVD.** Deep learning for anomaly detection: A review. *ACM computing surveys (CSUR)*. 2021; 54(2): 1-38. DOI: 10.1145/3439950.
- [15] **Abdulaal A, Liu Z, Lancewicki T.** Practical Approach to Asynchronous Multivariate Time Series Anomaly Detection and Localization. In: *Proc of the 27th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*. 2021; 2485-2494. DOI: 10.1145/3447548.3467174.
- [16] **Li Z, Zhao Y, Han J, Su Y, Jiao R, Wen X, Pei D.** Multivariate Time Series Anomaly Detection and Interpretation using Hierarchical Inter-Metric and Temporal Embedding. In: *Proc of the 27th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*. 2021; 3220-3230. DOI: 10.1145/3447548.3467075.
- [17] **Kravchik M, Shabtai A.** Efficient cyber attack detection in industrial control systems using lightweight neural networks and PCA. *IEEE transactions on dependable and secure computing*. 2021; 19(4): 2179-2197. DOI: 10.1109/TDSC.2021.3050101.
- [18] **Liu Y, Xu L, Yang, S, Zhao D, Li X.** Adversarial sample attacks and defenses based on LSTM-ED in industrial control systems. *Computers & Security*. 2024; 140: 103750. DOI: 10.1016/j.cose.2024.103750.
- [19] **Audibert J, Michiardi P, Guyard F, Marti S, Zuluaga MA.** USAD: Unsupervised Anomaly Detection on Multivariate Time Series. In: *Proc of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*; 2020 P 3395-3404. DOI: 10.1145/3394486.3403392.
- [20] **Han S, Woo SS.** Learning sparse latent graph representations for anomaly detection in multivariate time series. In: *Proc of the 28th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*. 2022; 2977-2986. DOI: 10.1145/3534678.3539117.
- [21] **Utkin L, Konstantinov A.** An Extension of the Neural Additive Model for Uncertainty Explanation of Machine Learning Survival Models. *Cyber-Physical Systems: Intelligent Models and Algorithms* Cham : Springer International Publishing. 2022; 3-13. DOI: 10.1007/978-3-030-95116-0_1.
- [22] **Chen Q, Pan G, Chen W, Wu P.** A novel explainable deep belief network framework and its application for feature importance analysis. *IEEE Sensors Journal*. 2021; 21(22): 25001-25009. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3084846.
- [23] **Zolanvari M, Yang Z, Khan K, Jain R, Meskin N.** TRUST XAI: Model-agnostic explanations for ai with a case study on iiot security. *IEEE Internet of Things Journal*. 2023; 10(4): 2967-2978. DOI: 10.1109/IIOT.2021.3122019.
- [24] **Ribeiro M T, Singh S, Guestrin C.** "Why should i trust you?" Explaining the predictions of any classifier. In: *Proc of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*. 2016; 1135-1144. DOI: 10.1145/2939672.2939778.
- [25] **Liu M, Shi J, Cao K, Zhu J, Liu S.** Analyzing the training processes of deep generative models. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*. 2017; 24(1): 77-87. DOI: 10.1109/TVCG.2017.2744938.
- [26] **Wang P Y, Galhotra S, Pradhan R, Salimi B.** Demonstration of generating explanations for black-box algorithms using Lewis. In: *Proc of the VLDB Endowment*. 2021; 14(12): 2787-2790. DOI: 10.14778/3476311.3476345.
- [27] **Moradi M, Samwald M.** Post-hoc explanation of black-box classifiers using confident itemsets. *Expert Systems with Applications*. 2021; 165: 113941. DOI: 10.1016/j.eswa.2020.113941.
- [28] **Nourani M, Roy C, Block JE, Honeycutt DR, Rahman T, Ragan E, Gogate V.** Anchoring bias affects mental model formation and user reliance in explainable ai systems. In: *Proc of the 26th International Conference on Intelligent User Interfaces*. 2021; 340-350. DOI: 10.1145/3397481.3450639.
- [29] **Abou El Houda Z, Brik B, Senouci SM.** A novel iot-based explainable deep learning framework for intrusion detection systems. *IEEE Internet of Things Magazine*. 2022; 5(2): 20-23. DOI: 10.1109/IOTM.005.2200028.
- [30] **Kopp M, Pevný T, Holeňa M.** Anomaly explanation with random forests. *Expert Systems with Applications* 2020; 149: 113187. DOI: 10.1016/j.eswa.2020.113187.
- [31] **Antwarg L, Miller R M, Shapira B, Rokach L.** Explaining anomalies detected by autoencoders using Shapley Additive Explanations. *Expert systems with applications*. 2021; 186: 115736. DOI: 10.1016/j.eswa.2020.113187.

- [32] **Nguyen QP, Lim KW, Divakaran DM, Low KH, Chan MC.** Gee: A gradient-based explainable variational autoencoder for network anomaly detection. In: Proc of the 2019 IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS). 2019; 91-99. DOI: 10.1109/CNS.2019.8802833.
- [33] **Takeishi N.** Shapley values of reconstruction errors of PCA for explaining anomaly detection. In: Proc of the 2019 international conference on data mining workshops (ICDMW). 2019; 793-798. DOI: 10.1109/ICDMW.2019.00117.
- [34] **Roshan K, Zafar A.** Utilizing XAI technique to improve autoencoder based model for computer network anomaly detection with shapley additive explanation (SHAP). International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC). 2021; 13(6): 1-20. DOI: 10.5121/ijcnc.2021.13607.
- [35] **Huong TT, Bac TP, Ha KN, Hoang NV, Hoang NX, Hung NT, Tran KP.** Federated learning-based explainable anomaly detection for industrial control systems. IEEE Access. 2022; 10: 53854-53872. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3173288.
- [36] **Mathuros K, Venugopalan S, Adepu S.** WaXAI: Explainable Anomaly Detection in Industrial Control Systems and Water Systems. In: Proceedings of the 10th ACM Cyber-Physical System Security Workshop. 2024; 3-15. DOI: 10.1145/3626205.3659147.
- [37] **Snoek J, Larochelle H, Adams R. P.** Practical bayesian optimization of machine learning algorithms. Advances in neural information processing systems. 2012; 25: 1-9.
- [38] **Taormina R, Galelli S, Tippenhauer NO, Salomons E, Ostfeld A, Eliades DG.** Battle of the attack detection algorithms: Dis-closing cyber attacks on water distribution networks. Journal of Water Resources Planning and Management. 2018; 144(8): 04018048. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000969.
- [39] **Shin HK, Lee W, Yun JH, Min BG.** Two ICS security datasets and anomaly detection contest on the HIL-based augmented ICS testbed. In: Proc. of the 14th Cyber Security Experimentation and Test Workshop. 2021; 36-40. DOI: 10.1145/3474718.3474719.
- [40] **Kim B, Alawami MA, Kim E, Oh S, Park J, Kim H.** A comparative study of time series anomaly detection models for industrial control systems. Sensors. 2023; 23(3): 1310. DOI: 10.3390/s23031310.

About the authors

Diana Albertovna Levshun (b. 1995) graduated with a bachelor's degree from Orenburg State University in 2017 and received a master's degree in 2019 from ITMO University. She is a Junior Researcher at the Laboratory of Computer Security Problems at the St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. Her list of scientific publications includes about 70 works in the field of information security and artificial intelligence. ORCID: 0000-0002-5266-8649; Author ID (RSCI): 968755; Author ID (Scopus): 58114512500; Researcher ID (WoS): ABG-9837-2020. gaifulina@comsec.spb.ru.

Dmitry Sergeevich Levshun (b 1993) graduated from Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin) in 2017, Ph.D. (2021). He is a Senior Researcher at the Laboratory of Computer Security Problems at the St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. He is an Associate Professor at the Saint Petersburg State University of Telecommunications named after prof. M.A. Bonch-Bruевич and at the European University at St. Petersburg. His list of scientific publications includes more than 100 works in the field of information security, security by design, Internet of Things, artificial intelligence, modelling of attacks and attackers. ORCID: 0000-0003-1898-6624; Author ID (RSCI): 840344; Author ID (Scopus): 57189306576; Researcher ID (WoS): C-1566-2018. levshun@comsec.spb.ru.

Igor Vitalievich Kotenko (b. 1961) graduated with honors from the St. Petersburg Academy of Space Engineering in 1983 and St. Petersburg Signal Academy in 1987, D. Sc. Eng. (1999), professor (2021), Honored Scientist of the Russian Federation (2023). Chief Researcher and Head of the Laboratory of Computer Security Problems at St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, professor at ITMO University, Saint Petersburg State University of Telecommunications, Ural Federal University, Harbin Institute of Technology (China) and Heilongjiang University (China). He is a co-author of more than 800 publications in the field of computer network security, artificial intelligence, telecommunication systems, including 25 monographs, and more than 100 patents for inventions and registered programs. ORCID: 0000-0001-6859-7120; Author ID (RSCI): 110102; Author ID (Scopus): 15925268000. ivkote@comsec.spb.ru. ✉

Received October 22, 2024, Revised December 2, 2024 Accepted January 14, 2025



Извлечение информации из текстов на основе онтологии и больших языковых моделей

© 2025, Е.А. Сидорова^{1,2}✉, А.И. Иванов², К.А. Овчинникова²

¹ Институт систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет (НГУ), Новосибирск, Россия

Аннотация

Рассматривается извлечение информации из текстов на основе онтологии предметной области и нейросетевых методов анализа текста с привлечением больших языковых моделей. Обсуждается роль эксперта при разработке и сопровождении систем на примере задачи извлечения информации из аналитических статей и при построении онтологий по компьютерной лингвистике, описывающих основные понятия, интересующие пользователя/заказчика системы. Создание онтологии сопровождается созданием словаря - терминологического ядра онтологии с дальнейшей разработкой методов извлечения новых терминов данной предметной области. Данная задача рассматривается как задача извлечения именованных сущностей, для решения которой стандартом является обучение нейросетевой модели на представительном наборе данных. Этот подход сравнивается с подходом на основе больших языковых моделей, для реализации которого разработаны лексико-синтаксические шаблоны, шаблоны инструкций для проверки гипотез относительно новых терминов-словосочетаний, инструкции для верификации результатов. Разработанные инструкции для решения задачи извлечения отношений включают вопросы оценки компетенций на естественном языке, генерируемые автоматически для каждого отношения онтологии. Новизна предлагаемого подхода заключается в интеграции онтологических, лингвистических и нейросетевых подходов для извлечения информации из текстов. Показана возможность решать задачи анализа текста и извлечения информации путём выстраивания цепочки больших языковых моделей, инструкции для которых динамически формируются на основе результатов предыдущих этапов анализа. В эксперименте достигнуты следующие оценки F1-меры: для извлечения и классификации терминов F1=0.8, для извлечения отношений F1=0.87.

Ключевые слова: извлечение информации, онтология предметной области, большие языковые модели, нейросетевые модели, разработка инструкций.

Цитирование: Сидорова Е.А., Иванов А.И., Овчинникова К.А. Извлечение информации из текстов на основе онтологии и больших языковых моделей. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №1(55). С.114-129. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-1-114-129.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

При создании систем, основанных на знаниях, появляются новые направления исследований, связанные с организацией работы со знаниями (например, экосистемы знаний [1]), новые задачи, такие как генерация запросов на основе базы знаний (БЗ), и др. Несмотря на активное внедрение интеллектуальных методов, разработка информационных систем сопряжена с рядом трудностей. В первую очередь, это решение задач, связанных с моделированием предметной области (ПрО), пополнением БЗ, своевременным обнаружением ошибок. При этом роль эксперта при разработке и дальнейшем сопровождении систем недооценивается в связи с устоявшимся мнением о возросших возможностях глубоких нейронных сетей после появления *больших языковых моделей* (БЯМ). Задачи, связанные с глубокой проработкой ПрО, анализом ошибок и разработкой способов их исправления, подготовкой качественных наборов данных не могут пока решаться полностью автоматически.

Для систематизации, хранения и поиска информации в специализированных системах часто используются графы знаний (ГЗ), онтологии, БЗ, создание которых - трудоёмкий процесс. Активно исследуется возможность автоматического создания и пополнение БЗ на основе автоматической обработки текстов (АОТ). Разработка систем АОТ в разное время опиралась на различные подходы: лингвистический, инженерный, онтологический, классическое и нейросетевое машинное обучение. Соответственно изменялись задачи эксперта при сопровождении систем АОТ – от моделирования знаний о языке и ПрО, описания процессов понимания текстов человеком/машиной до подготовки наборов данных и формулирования задач и разработки инструкций на естественном языке (ЕЯ) для генеративных моделей.

Целью работы является разработка методики создания и сопровождения информационных систем на основе онтологий, АОТ и методов извлечения информации из русскоязычных источников, интегрирующей онтологические, лингвистические и нейросетевые подходы.

1 Методы автоматизации построения онтологий

Онтология – это способ формализации знаний в какой-либо ПрО, реализованный на основе формального описания объектов, фактов и отношений между ними, и ориентированный на многократное использование для различных задач [2]. Под ГЗ понимается семантическая сеть, в которой хранится информация об объектах и взаимосвязях между ними [3]. В данной работе онтология является семантической основой представления данных ПрО, базирующаяся на логике и включающая терминологический словарь и набор утверждений о моделируемых сущностях, а ГЗ содержит экземпляры понятий и отношений заданной онтологии.

Первые методологии для создания онтологий были направлены на разработку онтологии конкретной ПрО для решения определённых задач, таких как извлечение знаний, систематизация, формализация и поиск информации [4-6]. Активно развивается подход к разработке онтологий, основанный на использовании шаблонов (паттернов) онтологического проектирования¹. Каждый шаблон представляет собой стандартизированное описание ранее созданного фрагмента онтологии, включающее в т.ч. определение и набор вопросов оценки компетентности (ВОК) на ЕЯ. Суть этих исследований заключается в разработке способов повторного использования шаблонов при создании новых онтологий.

Для создания онтологии компьютерной лингвистики (КЛ) можно обратиться к схожим по тематике материалам. Существует несколько ресурсов, посвящённых КЛ либо связанным с ней областям знаний, например, русско-английский тезаурус по КЛ² и портал по КЛ³. Известны также несколько онтологий машинного обучения, например, [7]. Для построения терминологического ядра онтологии используются методы извлечения терминов и иерархических связей между ними для создания семантических предметных словарей (ПрС) [8] или тезаурусов.

Выявление терминов в тексте относится к классу задач *распознавания именованных сущностей* [9]. В общем случае, для решения данной задачи требуется найти участки текста, содержащие термины заданной ПрО, а также определить сущности, обозначаемые этими терминами, т.е. определить тип терминов. Одни и те же сущности могут иметь разный тип в зависимости от контекста. Например, термин «*классификация*» может в одном тексте означать *Метод_исследования*, а в другом – *Задачу_исследования*, которую необходимо решить.

Для решения задачи распознавания именованных сущностей могут применяться методы с использованием синтаксических правил [10], методы машинного обучения, например, ме-

¹ Портал Ассоциации ODPa (Association for Ontology Design & Patterns). <http://ontologydesignpatterns.org>.

² Русско-английский тезаурус по компьютерной лингвистике. <https://uniserv.iis.nsk.su/thes>.

³ Портал по компьютерной лингвистике. <https://uniserv.iis.nsk.su/cl>.

тод опорных векторов или метод случайного леса. Эти методы опираются на характеристики слов, такие как принадлежность к синтаксической группе, к семантическому значению, чтобы определить правила классификации или задать расстояние между словами и разделить их на классы [11]. В большинстве случаев используются методы *глубокого обучения* или гибридные методы на их основе [12-14].

Существуют различные подходы на основе БЯМ, которые являются трансформерами, обученными на больших объёмах текстовых данных. Основой для применения БЯМ является *разработка инструкций* [15]. Суть данного подхода заключается в составлении человеком инструкции, описывающей конкретную задачу на ЕЯ. Данная инструкция подаётся на вход модели, в ответ модель генерирует текст, из которого извлекается решение задачи. Преимуществом подхода является отсутствие необходимости в обучении модели. К недостаткам подхода можно отнести сложность создания оптимальной инструкции, поскольку от её содержания и размера зависит качество работы модели (большая инструкция может привести к более низким результатам).

Подходы на основе инструкций включают разнообразные техники для создания инструкций. Например, инструкции «с нулевым примером» [16] не предполагают предоставление модели примеров. Данная техника может не подходить для сложных задач, например, когда требуется получить термины определённой области знаний и/или определить их тип. В таких случаях применяется техника с использованием «нескольких примеров» [17], позволяющая обеспечить контекстное обучение с предоставлением демонстраций решения в инструкции. Более сложной техникой является *цепочка рассуждений* [16], суть которой заключается в описании последовательности шагов рассуждения, которую необходимо выполнить для решения задачи (см. рисунок 1 слева).

Одной из стратегий для решения сложной задачи является её декомпозиция на более простые и разработка для каждой из подзадач собственного решения. Применительно к БЯМ такой подход называется *цепочка инструкций*, когда для каждого этапа создаётся отдельная инструкция и результаты предыдущих этапов могут использоваться для генерации инструкции следующего этапа. Цепочка инструкций подразумевает использование выходных данных одной модели в качестве входных данных для следующей модели и, по сути, включает несколько подсказок (см. рисунок 1 справа). Метод цепочки рассуждений использует одну, более длинную инструкцию, которая описывает пошаговый процесс рассуждений для получения ответа.

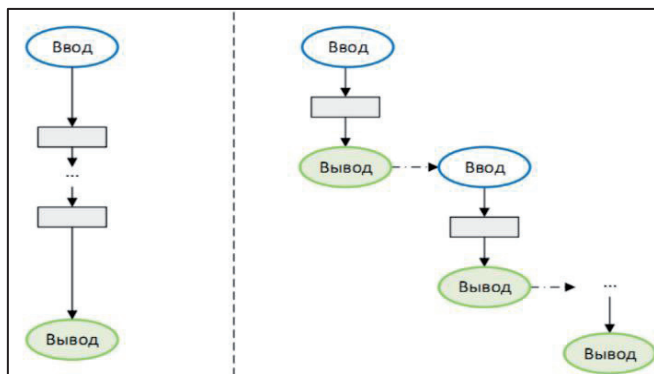


Рисунок 1 – Сравнение схем подходов на основе БЯМ

В первом случае предлагается более простое и быстрое решение с использованием всего одной БЯМ; кроме того, в сравнении со вторым подходом отсутствует накопление ошибки, характерной для применения цепочки решателей. Преимуществом второго подхода является возможность своевременно корректировать результаты при переходе от одного этапа к другому. В работе [18] показано, что для задачи реферирования текста подход на основе цепочки инструкций показывает лучшие результаты по сравнению с одной инструкцией, включающей цепочку задач, и отмечается, что данные результаты можно масштабировать на другие задачи анализа текста. Таким образом, применение методологии построения онтологий научных ПрО [19] должно обогащаться современными методами интеллектуального анализа текста на основе БЯМ.

2 Методика исследования

Предлагаемое исследование направлено на решение задачи разработки онтологии КЛ посредством АОТ и извлечения значимой информации. Методика исследования включает декомпозицию задачи извлечения информации на ряд подзадач, проведение экспериментов на текстовом корпусе, сравнительный анализ различных подходов, анализ ошибок, выдвижение гипотез для улучшения результатов и их экспериментальную оценку. Ключевым вопросом проводимых работ является экспертный анализ и оценка его роли в достижении поставленных целей.

С внедрением технологий, позволяющих извлекать знания из неструктурированных источников данных, задачи эксперта изменяются и включают:

- проектирование верхнеуровневых абстракций;
- подготовку данных для применения методов машинного обучения;
- разработку инструкций для генеративных моделей на основе БЯМ;
- валидацию и анализ полученных результатов.

Решение первой задачи необходимо для формализации структуры важной с точки зрения пользователя информации и всех необходимых данных. Для решения этой задачи используется методика разработки онтологии ПрО на основе базовой онтологии, концепты которой специализируются на более точные понятия и отношения ПрО.

Подготовка данных в задачах АОТ включает создание репрезентативного корпуса текстов ПрО, а также анализ существующих ресурсов и оценку возможности их применения для решения задач. Корпус текстов служит основой для верификации результатов на всех этапах решения задачи.

Разработка инструкций опирается на структуру онтологии, знания эксперта о сущностях ПрО и способах их описания на ЕЯ, а также на понимание основных этапов решения задачи.

Валидация и содержательный анализ получаемых результатов на каждом этапе позволяют выдвинуть гипотезы о причинах ошибок и настроить решатели путём подбора параметров моделей, корректировки инструкций, обработки специальных случаев и т.п.

Можно выделить два этапа исследования. Подготовительный этап включает задачи, которые плохо автоматизируются и решаются экспертом. Экспериментальный этап включает разработку алгоритмов решения задачи и анализ результатов.

2.1 Подготовительный этап исследования

Разработка интеллектуальной системы начинается с подготовки данных и формализации знаний о ПрО (рисунок 2а). Создаётся онтология, которая служит основой для формирования терминологического ядра онтологии – ПрС. Для её построения можно использовать готовые базовые онтологии или шаблоны онтологического проектирования для описания ключевых классов онтологий [20].

Конкретизация онтологии на определённую ПрО происходит посредством анализа корпуса текстов, который должен содержать примеры использования всех сущностей ПрО. В онтологию добавляются новые классы и редактируются уже имеющиеся.

На основе анализа грамматической структуры многословных терминов могут разрабатываться лексико-синтаксические шаблоны (ЛСШ), которые используются для генерации гипотез о словосочетаниях кандидатов в термины. ЛСШ – это структурный образец языковой конструкции, который отображает её лексические и поверхностные синтаксические свойства.

Использование подхода на основе нейросетевых моделей предполагает подготовку размеченных данных для проведения экспериментов, валидацию данных и нахождение ошибок.

Для облегчения ручной разметки тексты могут быть первично автоматически размечены, а для увеличения набора данных при необходимости могут использоваться методы перевода или перефразирования с помощью специализированных генеративных моделей [21].

Последняя задача подготовительного этапа связана с разработкой шаблонов инструкций для БЯМ, которые используются на всех экспериментальных этапах.

2.2 Алгоритмы экспериментального этапа исследования

Процесс извлечения информации включает два этапа: извлечение терминов и извлечение отношений (рисунок 2б).

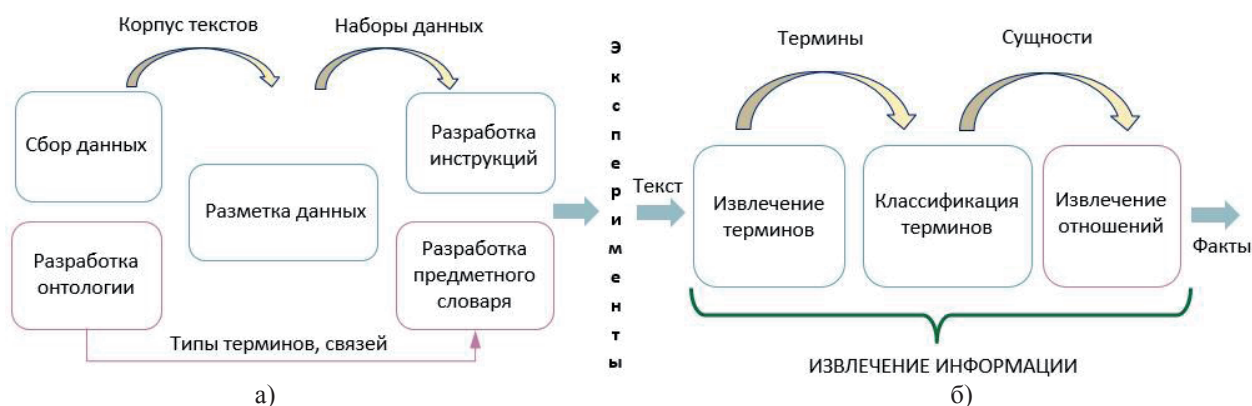


Рисунок 2 – Задачи подготовительного (а) и экспериментального (б) этапов исследования

Для извлечения терминов проводится сравнительное исследование различных подходов. Например, один подход может реализовывать классическую парадигму обучения нейросетевых моделей на наборе размеченных данных (датасетах). Другой подход может реализовывать различные техники на основе БЯМ, где наборы данных не обязательны. В первом подходе выбранная модель обучается отдельно для поиска терминов и их классификации на подготовленных наборах данных. Для поиска терминов используется набор данных с *BIO*⁴-разметкой, а для классификации – набор данных с *BIO*-разметкой, расширенной именами классов терминов [8].

В процессе поиска терминов токенизатор преобразует слово в несколько токенов, затем модель предсказывает одну из трёх меток для каждого токена: начало термина, середина термина или не термин. Итоговая метка для слова определяется как самая частая метка токенов, которые к этому слову относятся. Классификация извлечённых терминов происходит в контексте всего предложения, в котором термин выделяется специальными тегами `<term> ... </term>`. Данный подход позволяет модели передавать на вход контекст, выделяя термин, класс для которого необходимо предсказать.

Подход к извлечению терминов, предлагаемый в данной работе, заключается в комплексном использовании ЛСШ, ПрС и БЯМ (рисунок 3).

На первом этапе проводится поиск и извлечение терминоподобных слов и словосочетаний с использованием ЛСШ. Извлечённые кандидаты в термины анализируются с точки зрения их принадлежности к ПрО. Для этого осуществляется поиск семантически близких терминов в словаре, что позволяет предварительно определить наиболее подходящие классы для термина. Для каждого термина-кандидата генерируется инструкция, в которой найден-

⁴ *BIO*-разметка используется для выделения в тексте границ именованных сущностей и их типа. В-метка (*beginning*) представляется для обозначения начала интересующей сущности; I (*inside*) — для обозначения слова внутри неё; O (*outside*) — это любое слово за её пределами.

ные варианты терминов и их классы используются в качестве примеров, и с помощью БЯМ происходит уточнение класса или вывод о его отсутствии, что позволяет исключить данный термин из рассмотрения. После этого ответ модели подвергается верификации у той же или другой БЯМ.

По сравнению с подходом [8] для комплексного подхода нет необходимости создания больших наборов данных для обучения моделей, что достигается путём привлечения экспертных знаний: лингвистических моделей для генерации гипотез о наличии терминов и ПрС для генерации гипотез о классе терминов.

Предложен следующий алгоритм для извлечения и классификации терминов.

Пусть T – множество всех терминов выбранной ПрО. Для произвольной входной строки s требуется найти множество терминов $T_s \subset T$, которые в ней содержатся, причём для каждого $t \in T_s$ должен быть определён класс онтологии $c \in C$, к которому он относится, где C – множество всех классов терминов в ПрО. Таким образом, требуется построить отображение $F: S \rightarrow T \times C$.

Алгоритм 1. Общий алгоритм извлечения и классификации терминов ПрО.

Input: Строка s , БЯМ L , словарь терминов D и набор ЛСШ P

Output: Множество пар (t, c) , где $t \in s, t \in T, c \in C$

```

1: phrases  $\leftarrow P.find\_entries(s)$ 
2: for all phrase  $\in$  phrases do
3:   similar_terms  $\leftarrow D.find\_similar\_terms(phrase)$ 
4:   cls_prompt  $\leftarrow create\_cls\_prompt(s, phrase, similar\_terms)$ 
5:   class  $\leftarrow L.invoke(cls\_prompt)$ 
6:   if class = null do
7:     continue
8:   end if
9:   ver_prompt  $\leftarrow create\_ver\_prompt(s, phrase, class)$ 
10:  ver_class  $\leftarrow L.invoke(ver\_prompt)$ 
11:  if ver_class = null do
12:    continue
13:  end if
14:  yield (phrase, ver_class)
15: end for

```

Извлечение кандидатов в термины из s с помощью набора шаблонов P осуществляется функцией $find_entries$ (строка 1). Поиск кандидата $phrase$ в словаре терминов D осуществляется функцией $find_similar_terms$ (строка 3). Генерация инструкций для классификации и верификации терминов происходит в строках 4 и 9 соответственно. Вызов процедуры $invoke$ выполнения запросов к модели L - в строках 5 и 10.

На следующем этапе поиска отношений необходимо извлекать предметные связи, заданные онтологией. Это означает, что отношение между двумя терминами возможно только в том случае, если оно возможно между их классами в онтологии. Поэтому рассматриваются только те пары терминов, которые соответствуют этому условию.

Для решения данной задачи предлагает применять подход на основе БЯМ. Для каждой пары терминов формируется специальная инструкция, в которой размещается фрагмент текста (предложение или абзац), включающий эти термины, описание классов терминов, описание проверяемого типа от-

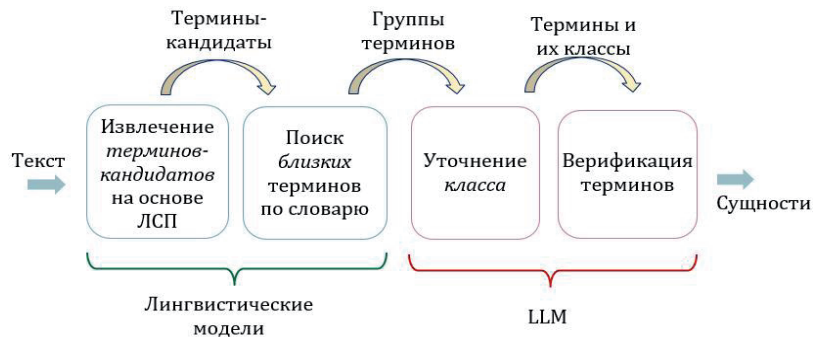


Рисунок 3 – Комплексный подход к извлечению терминов на основе больших языковых моделей (LLM)

ношения и несколько примеров желаемых ответов модели для заготовленных на этапе подготовки данных примеров. При составлении инструкций применяется техника, в которой вначале модель должна ответить, есть отношение или нет, и в случае, если оно есть, указать метку класса, к которому оно относится.

Алгоритм для извлечения отношений следующий.

Пусть $T_s \subset T$ – множество найденных терминов, полученных на предыдущем этапе. Для каждого термина известен его класс $c \in C$. Пусть множество всех классов отношений ПрО обозначено Rel . Необходимо найти все такие пары $t_1, t_2 \in T_s$, где между t_1 и t_2 есть семантическое отношение $rel \in Rel$.

Алгоритм 2. Общий алгоритм извлечения семантических отношений между терминами.

Input: $T_s \subset T$, классы терминов $C_s \subset C$, БЯМ L , онтология O

Output: $Relations = \{ (t_1, rel, t_2) \mid t_1, t_2 \in T_s, rel \in Rel \}$

```

1: term_pairs = organize_pairs (  $T_s, C_s$  )
2: for all  $(t_1, c_1, t_2, c_2) \in$  term_pairs do
3:   relation_classes  $\leftarrow O.get\_relations ( c_1, c_2 )$ 
4:   if relation_classes =  $\emptyset$  do
5:     continue
6:   end if
7:   cls_prompt  $\leftarrow$  create_cls_prompt (  $s, t_1, t_2, relation\_classes$  )
8:   rel  $\leftarrow L.invoke ( cls\_prompt )$ 
9:   if rel = null do
10:    continue
11:   end if
12:   yield  $(t_1, rel, t_2)$ 
13: end for
```

Процедура *organize pairs* обеспечивает перебор всех возможных пар, найденных в текстовом фрагменте терминов и их классов (строка 1). Получение множества возможных семантических отношений между двумя классами онтологии O осуществляется функцией *get_relations* (строка 3). Генерация инструкций для проверки наличия отношения между терминами в заданном контексте s и выполнение запросов к модели L отражено в строках 7 и 8 соответственно.

3 Построение онтологии компьютерной лингвистики

Для проведения исследования собран корпус текстов с русскоязычного веб-сайта Хабр⁵, связанных с направлением КЛ, объёмом около 1,5 тысячи текстов. Отбор необходимых статей происходил на основе собранного списка хабов⁶. На основе данного корпуса проводился анализ ПрО. Выбор источника определялся его актуальностью, постоянным обновлением содержания и наличием материалов, отражающих современные тенденции развития данной области. В качестве базовой онтологии использовалась онтология научной ПрО [19], содержащая 11 классов (*Деятельность, Задача, Информационный ресурс, Метод исследования, Объект исследования, Организация, Предмет исследования, Публикация, Раздел науки, Результат или продукт, Событие*) и 92 отношения.

При конкретизации онтологии на область КЛ использовались корпусные методы анализа собранных текстов, а также рассмотренные выше ресурсы той же направленности^{2,3}. В результате, во-первых, удалены некоторые классы и отношения, относящиеся к научной деятельности, а не к знаниям; во-вторых, добавлены новые классы, такие как *Модель, Набор данных, Метрика, Приложение* и *Окружение*; в-третьих, добавлены новые подклассы таким классам, как *Метод исследования* (рисунок 4).

Созданная онтология КЛ содержит 15 классов (10 из базовой онтологии) и 111 отношений (92 из базовой онтологии). Для экспериментальных исследований классы и отношения,

⁵ <https://habr.com/ru/feed/>.

⁶ Раздел сайта, где публикуются материалы на определённую тему.

которые в текстах упоминались редко, исключены из рассмотрения. В итоге для разметки данных и построения наборов данных для экспериментов использовалось 15 классов и 51 отношение.

Создание терминологического ядра онтологии описано в [8]. Система классов ПрС автоматически генерируется на основе системы классов онтологии по набору заданных шаблонов. Можно рассмотреть данную методику на нескольких примерах.

- а. Шаблон $\{\text{класс}\}.\{\text{Название}\}$: термины, относящиеся к названию объектов класса *Задача*, получают лексико-семантический класс *Задача.Название*,
- б. Шаблон $\{\text{класс}\}.\{\text{атрибут}\}$: термины, относящиеся к значению атрибута *Значение* класса *Метрика*, получают лексико-семантический класс *Метрика.Значение*,
- с. Шаблон $\{\text{класс}\}.\{\text{отношение}\}.\{\text{класс}\}$: термины, относящиеся к отношению *обучена на* между объектами класса *Модель* и объектами класса *Набор данных*, получают лексико-семантический класс *Модель.обучена на.Набор данных*.

Начальное наполнение ПрС осуществлено в два этапа.

На первом этапе проведён анализ русско-английского тезауруса КЛ². Из него отобраны подходящие термины, относящиеся к следующим категориям (классам): *Деятельность*, *Задача*, *Информационный ресурс*, *Метод исследования*, *Метрика*, *Объект исследования*, *Предмет исследования*, *Раздел науки* и *Результат*. Всего отобрано 585 терминов.

На втором этапе термины тезауруса автоматически сопоставлены терминам на портале КЛ³, который содержит онтологию научной деятельности, включающую описанные классы. Для терминов подобраны соответствующие онтологические классы. Для тех терминов, которые не найдены на портале, указаны классы их синонимов или более общих понятий, если такие имелись. Оставшиеся термины размечены вручную. В результате получен ПрС, содержащий 2640 терминов.

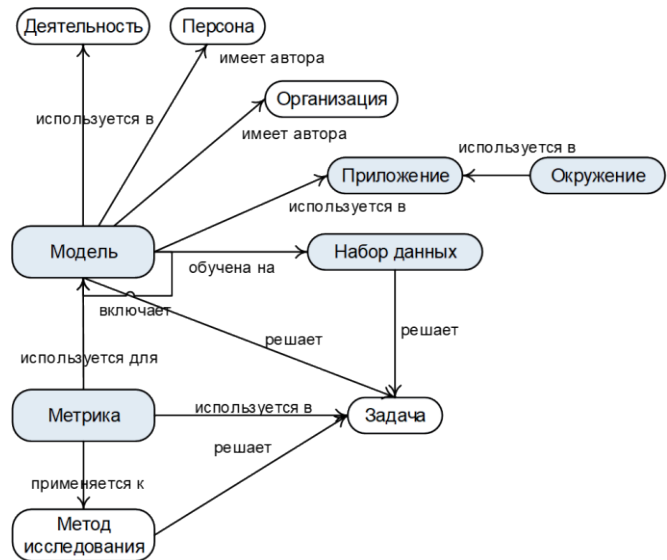


Рисунок 4 – Фрагмент онтологии по КЛ

4 Извлечение терминов

На первом этапе подхода (см. раздел 2.2) – поиска кандидатов в термины – применялась библиотека *Spacy* и набор ЛСШ для русского языка [22]. Данный набор включает 16 типовых шаблонов для сборки словокомплексов на основе грамматических свойств слов.

Для каждого выделенного слова или словокомплекса осуществлён поиск семантически близких к нему терминов в словаре на основе *векторного представления слов*. На данном этапе применена модель, которая вычисляет векторное представление для всех терминов в словаре, а также векторные представления найденных в тексте кандидатов. Семантическая близость между терминами и кандидатами определяется как косинусная мера между двумя векторными представлениями.

Найденные термины и их классы (максимум шесть вариантов) помещаются в шаблон инструкции, предназначенной для предсказания терминов выбранной ПрО. В инструкции указываются подробные описания классов терминов, сформированных на подготовительном

этапе. Например, для класса *Метод_исследования* использовано следующее описание: *способы, приёмы, при помощи которых осуществляется исследование*.

Шаблон инструкции хранится в виде файла, который находится в окружении программного обеспечения, и во время исполнения программы в него подставляются конкретные значения терминов, классов и описаний классов. Пример автоматически сгенерированных запроса и ответа системы.

Текст: Компания Яндекс разработала голосовой помощник под названием Алиса.

Словосочетание: голосовой помощник

Возможные классы: *Model, Application*

Описания классов:

- *Model*: модель машинного обучения.

- *Application*: самостоятельная программа, предоставляющая функции и возможности.

Является ли словосочетание «голосовой помощник» термином в этом тексте?

Ответ: да, *Application*

В качестве БЯМ выбрана модель (*Mixtral-8x7b-Instruct*), которая получает на вход инструкцию и генерирует ответ, из которого извлекается результат: является ли слово или словосочетание термином и (в случае положительного ответа) к какому классу из представленных оно относится в данном контексте.

В целях повышения точности извлечения и классификации терминов предложено использовать дополнительный запрос для верификации предсказаний системы с применением следующего шаблона инструкции.

[INST]

Задача состоит в том, чтобы определить, является ли объект представителем класса «*{class}*» или нет. Используй формат да/нет.

Описание класса «*{class}*»: *{description}*.

Давай ответы только в рамках указанного ниже текста.

[/INST]

Текст: «*{text}*»

Является ли «*{term}*» термином класса «*{class}*» в рамках этого текста?

Ответ:

В данный шаблон подставляются название и описание предполагаемого класса, термин и текст, в котором он находится. Модель должна подтвердить, что в рамках данного контекста этот термин относится к указанному классу. Используемый формат ответа выбран коротким: БЯМ нужно сгенерировать всего один выходной токен («да» или «нет»), что позволяет системе работать быстрее.

Для оценки качества извлечения терминов использовался набор данных из [11], который включает 1088 предложений, выбранных из корпуса, и содержит *BIO*-разметку 3136 терминов и 1517 отношений. Результаты извлечения терминов, полученные с использованием двух рассмотренных подходов, представлены в таблице 1. Из таблицы видно, что применение

комплексного подхода увеличивает полноту.

Для анализа классификации терминов выполнено сравнение с подходом для

одновременного извлечения и классификации терминов. Полученные результаты представлены в таблице 2. Из таблицы 2 видно, что применение комплексного подхода увеличивает полноту, но уступает традиционному подходу в точности.

Таблица 1 – Результаты извлечения терминов

Метод	Полнота	Точность	F1-мера
<i>ruRoBERTa</i>	0.70	0.84	0.76
<i>ЛСШ + Словарь + Sentence-BERT + Mixtral</i>	0.75	0.85	0.80

Метод	Полнота	Точность	F1-мера
<i>ruRoBERTa (извлечение) + ruRoBERTa (классификация)</i>	0.71	0.83	0.73
<i>ЛСШ + Словарь + Sentence-BERT + Mixtral</i>	0.83	0.73	0.71

5 Извлечение отношений

Извлечение отношений между терминами предлагается осуществлять на основе БЯМ.

5.1 Разработка инструкций для извлечения отношений

Для предсказания отношений между терминами на основе БЯМ используется инструкция, уникальная для каждой пары классов терминов, между которыми возможно отношение. Инструкция делится на несколько логических частей, которые можно рассмотреть на примере пары классов *Модель_обучения* и *Организация*.

Вначале располагается краткое описание задачи и список вспомогательных вопросов, которые раскрывают семантику отношения. Далее указываются несколько примеров с наличием или отсутствием отношения между терминами этих классов.

Наконец, приводятся конкретные входные данные, для которых модель должна дать ответ. Модель получает на вход термины, для которых нужно указать отношение, связывающее их, а также контекст, в котором они располагаются. Инструкция предназначена для того, чтобы получить от модели ответ о наличии или отсутствии отношения между двумя терминами. Так, она должна ответить *Да* и вывести название отношения из списка, если оно есть, и *Нет*, если его нет.

5.2 Обогащение инструкций на основе онтологии

Для извлечения отношений и предоставления большего контекста модели предложено использовать в инструкциях ВОК – набор вопросов на ЕЯ, которые сопоставляются отношениям онтологии и позволяют пользователям уточнить смысл, вкладываемый авторами онтологии при их создании, а также провести проверку на соответствие при добавлении новых данных. ВОК позволяют задать начальные синтаксические и/или семантические ограничения на извлекаемые связи.

Онтологические шаблоны содержат в своём описании набор ВОК. Для получения необходимого и достаточного набора ВОК предложен подход для их автоматической генерации с помощью БЯМ. В данной работе генерация ВОК проводилась с помощью модели *GPT-4*. Для создания набора ВОК необходимо выполнить следующие шаги.

- 1) разработать шаблон инструкции.
- 2) автоматически сгенерировать инструкции для всех отношений и атрибутов классов онтологии на основе предложенного шаблона.
- 3) отправить запросы-инструкции и получить ответы от модели.
- 4) проанализировать ответы и составить набор ВОК.

Для генерации вопросов, содержащих отношения между двумя классами, использовалась техника [17]. Инструкция состоит из двух частей: постановка задачи и пример. Например, для генерации нескольких вопросов, содержащих отношение между классами *Метрика* и *Модель*, использовалась следующая инструкция:

Приведи 5 примеров вопросов, в которых *Метрика* применяется для *Модели*. В вопросах должны быть слова «*Метрика*» и «*Модель*».

Пример: *Может ли метод исследования использоваться для решения задачи?*

В данном случае в инструкции представлены названия для классов *Метрика* и *Модель*, которые связывает *отношение* применяется для *Модели* из онтологии. Пример в данном случае демонстрирует лишь структуру вопроса.

Ответ GPT-4 на данную инструкцию включал следующие вопросы:

- *Какую метрику можно использовать для оценки качества модели обучения?*
- *Может ли метрика быть использована для проверки эффективности модели обучения?*

- Как применяется метрика в модели обучения?
- Может ли метрика служить надёжным индексом для модели обучения?
- Каково значение метрики и как она используется в модели обучения?

Итоговый вариант шаблона инструкций для определения отношения между терминами выглядит следующим образом:

Твоя задача состоит в определении отношений между терминами, если таковые есть.
 Для ответа на этот вопрос тебе помогут следующие вопросы:
 {questions_list}
 Примеры наличия и отсутствия отношения между терминами:
 {examples_list}
 <...>
 Помни, что между терминами класса {class1} и {class2} возможны ТОЛЬКО следующие отношения:
 {relations_list}
 Есть ли подходящее отношение между терминами «<термин-1>» и «<термин-2>» в этом тексте?
 {text}

Результаты извлечения семантических отношений приведены в таблице 3, где отражены

Таблица 3 – Результаты извлечения семантических отношений

Класс отношений	F1-мера
Модель.поддерживает.Язык	0.98
Задача_исследования.решается_в.Раздел_науки	0.98
Метрика.имеет.Значение	0.97
Метрика.используется_для.Модель	0.94
Метрика.используется_в.Задача_исследования	0.94
Метод_исследования.применяется_к.Объект_исследования	0.93
Модель.используется_для_решения.Задача_исследования	0.93
Метод_исследования.решает.Задача_исследования	0.92
Приложение.имеет_автора.Организация	0.91
Набор_данных.составлен_для_решения. Задача_исследования	0.90
Приложение.используется_для_решения. Задача_исследования	0.89
Объект_исследования.используется_в_решении. Задача_исследования	0.89
Приложение.применяется_к.Объект_исследования	0.88
Модель.имеет_автора.Организация	0.83
Метод_исследования.использует.Модель	0.64
Модель.является_примером.Модель	0.26
Метод_исследования.является_частью.Метод_исследования	0.12

самые представительные классы отношений, т.е. те классы, для которых имелось более 30 примеров в тестовом наборе данных. Среднее значение F1-меры составило 87%. Достигнут порог в 60% точности для всех отношений.

Для генерации ВОК, отражающих связь между экземплярами классов и атрибутами, использовалась генерация синонимичного ряда вопросов:

Напиши синонимичные вопросы к «Какая дата появления у Метода исследования?».

Постобработка ВОК представляет собой внесение ис-

правлений в вопросы вручную или автоматически. Автоматическая обработка может строиться следующим образом.

- 1) Поиск и удаление из корпуса вопросов, не содержащих названия обоих классов.
- 2) Замена некоторых слов их синонимами в случаях неточного названия класса (например, если в онтологии существует класс *Организация*, а в предложении употребляется термин «компания», то его необходимо заменить на термин «организация»).
- 3) Удаление или замена конкретных наименований на более общие (например, «Яндекс» может быть заменен на «организация»).

Использование приведённых шаблонов инструкций с примерами позволяет уменьшить трудоёмкость обработки вопросов.

6 Анализ результатов

Анализ ошибок извлечения терминов позволил установить следующее.

- При отсутствии верификации ответов модели все методы демонстрируют ошибки извлечения терминов, для которых не существует подходящего онтологического класса.

- Некорректное отнесение терминов к другой категории, когда он является частью или пересекается с названием категории (например, термин «данные» был отнесен к категории *Набор_данных*).
- Один и тот же термин извлекается по-разному в разных контекстах, что связано с тем, что модель определяет принадлежность термина к определённому классу с разной степенью вероятности в зависимости от контекста.
- Термины, относящиеся к таким категориям, как *Деятельность*, *Набор_данных* и *Объект_исследования* извлекаются хуже (см. таблицу 4).

Таблица 4 – Результаты извлечения и классификации терминов отдельно по классам

Класс терминов	Полнота	Точность	F1-мера
Значение	1.0	0.83	0.9
Язык	0.79	0.97	0.87
Модель	0.82	0.88	0.84
Библиотека	0.8	0.8	0.8
Дата	0.66	1.0	0.79
Раздел науки	1.0	0.65	0.78
Организация	0.65	1.0	0.78
Приложение	0.87	0.7	0.77
Задача исследования	0.67	0.72	0.69
Метод исследования	0.72	0.68	0.69
Персона	0.57	0.8	0.66
Метрика	0.66	0.62	0.63
Информационный ресурс	0.71	0.58	0.63
Объект исследования	0.96	0.45	0.61
Набор данных	0.93	0.42	0.57
Деятельность	0.71	0.31	0.43

принадлежность термина к определённому классу с разной степенью вероятности в зависимости от контекста.

В результате анализа ошибок извлечения отношений установлены следующие факторы.

- Оптимальное количество ВОК для генерации моделью *GPT-4* определено экспериментально и составило 5.
- Некоторые отношения неправильно извлечены из-за неверной классификации терминов.
- Выявлены сложности в определении отношения включения между терминами некоторых классов и в дифференциации отношений между терминами.

В процессе работы над ошибками предприняты попытки модифицировать инструкции (улучшены формулировки названий отношений, изменены примеры, введены специальные инструкции для некоторых отношений). В результате удалось подобрать модификации, которые дали общее улучшение качества извлечения отношений.

Проведённые исследования показали, что привлечение эксперта повышало качество полученных решений на каждом этапе исследований: от внедрения шаблонов для сборки терминов-словокомплексов, формирования определения для классов терминов и до разработки эффективных инструкций для БЯМ.

Заключение

Предлагаемая методика извлечения информации из текстов на основе онтологии и БЯМ включает: разработку верхнего уровня предметной онтологии; сбор корпуса текстов и подготовку наборов данных; создание ПрС; генерацию ВОК; разработку шаблонов инструкций к

Основная сложность заключается в определении всего словосочетания, содержащего термин. Например, к категории *Деятельность* были отнесены такие термины, как «модель проекта» вместо «проект», «ход экспериментов» вместо «эксперименты», «продолжение экспериментов с оптимизациями» вместо «эксперименты».

В качестве примеров ошибочного предсказания класса *Объект исследования* можно привести термины «дата-сет» (класс *Набор_данных*) и «InfoNCE» (класс *Метрика*).

- Один и тот же термин извлекается по-разному в разных контекстах, что связано с тем, что модель определяет

БЯМ; автоматическое извлечение терминов на основе словаря и БЯМ; автоматическое извлечение отношений на основе БЯМ и ВОК.

Проведённые эксперименты для ПрО КЛ показали, что предложенные методы могут достигать хороших значений полноты и точности для задачи извлечения терминов ($F1=0.8$) и для задачи извлечения семантических связей между ними ($F1=0.87$).

Привлечение эксперта повышает качество полученных решений на каждом этапе исследований. Уточнение инструкций, применение в них показательных примеров, добавление отрицательных примеров и корректных ВОК позволяет повысить качество извлечения терминов и отношений.

Авторский вклад

Концепция и план исследования: Е.С. (Елена Сидорова) и А.И. (Александр Иванов); сбор и разметка данных: К.О. (Кристина Овчинникова); реализация программной части: А.И.; анализ и интерпретация результатов: Е.С., К.О. и А.И.; подготовка текста статьи: Е.С. и К.О.

Список источников

- [1] **Массель Л.В.** Экосистема знаний как развитие и специализация цифровой экосистемы // Труды Международного научно-технического конгресса «Интеллектуальные системы и информационные технологии–2023». Таганрог: Издатель Ступин С.А., 2023. С.155-164.
- [2] **Лукашевич Н.В., Добров Б.В.** Проектирование лингвистических онтологий для информационных систем в широких предметных областях. *Онтология проектирования*. Том 5. №1 (15). 2015. С.47-69.
- [3] **Ehrlinger L., Wöß W.** Towards a Definition of Knowledge Graphs // Joint Proceedings of the Posters and Demos Track of 12th International Conference on Semantic Systems (SEMANTiCS2016) and 1st International Workshop on Semantic Change & Evolving Semantics (SuCCESS16). Leipzig, 2016. P.13–16.
- [4] **Fernández-López M., Gómez-Pérez A., Pazos A., Pazos J.** Building a Chemical Ontology Using Methontology and the Ontology Design Environment. *IEEE Intelligent Systems & their applications*, 1999, 4(1). P.37–46.
- [5] **Sure Y., Staab S., Studer R.** On-To-Knowledge Methodology. *Handbook on Ontologies*. 2003. № 6. P.135–152.
- [6] **Uschold M., King M.** Towards a Methodology for Building Ontologies. *Proc. of the Workshop on Basic Ontological Issues in Knowledge Sharing*. Montreal, Canada. 1995. P.6.1–6.10.
- [7] **Braga J., Dias Joaquim L.R., Regateiro F.** A Machine Learning Ontology, 2023. DOI: 10.31226/osf.io/rc954.
- [8] **Овчинникова К., Иванов А., Сидорова Е.** Автоматизация построения терминологического ядра онтологии по компьютерной лингвистике на основе корпуса текстов. *Системная информатика*. 2023. № 23. С.13-32.
- [9] **Kim Sang E., Meulder F.** Introduction to the CoNLL-2003 Shared Task: Language-Independent Named Entity Recognition // Proc. of the 7th Conference on Natural Language Learning at HLT-NAACL 2003. P.142–147.
- [10] **Гусев В.Д., Саломатина Н.В.** Метод итерационного построения шаблонов для поиска в текстах по каталогу информации о химических процессах и условиях их протекания. *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. 2016. № 4-1. С.37–45.
- [11] **Zhu F., Shen B.** Combined SVM-CRFs for biological named entity recognition with maximal bidirectional squeezing // PLoS ONE 7(6): e39230. 2012. DOI: 10.1371/journal.pone.0039230.
- [12] **Ganaie M.A., Hu Minghu, Malik A.K., Tanveer M., Suganthan P.N.** Ensemble deep learning: A review. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2022. P. 28-29
- [13] **Li J., Sun A., Han J., Li C.** A survey on deep learning for named entity recognition. *IEEE Transactions on Knowledge & Data Engineering*. 2022. Vol.34. N.1. P.50-70.
- [14] **Лагутина Н.С., Васильев А.М., Зафиевский Д.Д.** Задачи в области распознавания именованных сущностей: технологии и инструменты. *Моделирование и анализ информационных систем*. 2023. №30(1). С.64-85.
- [15] **Brown T., Mann B., Ryder N., Subbiah M., Kaplan J.D.** Language Models are Few-Shot Learners // In: Advances in Neural Information Processing Systems. Vol.33. Curran Associates, Inc., 2020. P.1877-1901.
- [16] **Wei Jason, Bosma Maarten, Zhao Vincent Y., Guu Kelvin** Finetuned language models are zero-shot learners. *Conference paper at ICLR 2022*. 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2109.01652.
- [17] **Kaplan J., McCandlish S., Henighan T., Brown T.B., Chess B., Child R., Gray S., Radford A., Wu J., Amodei D.** Scaling Laws for Neural Language Models. 23 Jan 2020. 19 p. DOI: 10.48550/arXiv.2001.08361.

- [18] **Shichao Sun, Ruifeng Yuan, Ziqiang Cao, Wenjie Li, Pengfei Liu.** Prompt Chaining or Stepwise Prompt? Refinement in Text Summarization // In Findings of the Association for Computational Linguistics ACL 2024. Bangkok, Thailand and virtual meeting. Association for Computational Linguistics, 2024. P.7551–7558.
- [19] **Zagorulko Yu.A., Borovikova O.I.** Using a System of Heterogeneous Ontology Design Patterns to Develop Ontologies of Scientific Subject Domains // Programming and Computer Software. 2020. 46(4). P.273–280.
- [20] **Gangemi A., Presutti V.** Ontology Design Patterns // Handbook on Ontologies. Springer, 2009. P.221–243.
- [21] **Dewayne Whitfield** Using GPT-2 to Create Synthetic Data to Improve the Prediction Performance of NLP Machine Learning Classification Models // Computation and Language. arXiv preprint arXiv: 2104.10658, 2020.
- [22] **Sidorova E., Akhmadeeva I.** The software environment for multi-aspect study of lexical characteristics of text // In: Alexander Elizarov, Boris Novikov, Sergey Stupnikov (eds.): Data Analytics and Management in Data Intensive Domains. Proc. of the XXI International Conference DAMDID/RCDL'2019. Kazan, 2019. P.380–389.

Сведения об авторах

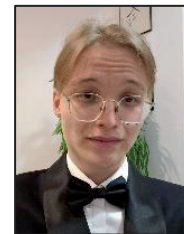


Сидорова Елена Анатольевна, 1977 г. рождения. Окончила НГУ в 2000 г., к.ф.-м.н. (2006). Старший научный сотрудник лаборатории искусственного интеллекта Института систем информатики им. А.П. Ершова, доцент кафедры программирования и кафедры систем информатики НГУ, член Российской ассоциации искусственного интеллекта. В списке научных трудов более 170 работ в области компьютерной лингвистики, онтологического инжиниринга, анализа аргументации и разработки интеллектуальных систем. Author ID (РИНЦ): 146000; ORCID: 0000-0001-8731-3058; Author ID (Scopus): 41961707000; Researcher ID (WoS): K-2432-2018. lsidorova@iis.nsk.su. ✉.

Иванов Александр Иванович, 2002 г. рождения. Окончил НГУ в 2024 г. по направлению информатика и вычислительная техника. Программист, эксперт по аналитическим данным. Author ID (РИНЦ): 176166. a.ivanov15@alumni.nsu.ru.



Овчинникова Кристина Алексеевна, 2000 г. рождения. Окончила НГУ в 2024 г. по направлению фундаментальная и прикладная лингвистика, магистр. Специалист (NLP разработчик). В списке научных трудов 7 работ в области компьютерной лингвистики. ORCID: 0000-0002-7400-0586; Author ID (РИНЦ): 1267926; Author ID (Scopus): 57374190900. k.ovchinnikova2@alumni.nsu.ru.



Поступила в редакцию 02.12.2024, после рецензирования 16.01.2025. Принята к публикации 20.01.2025.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-114-129

Information extraction from texts based on ontology and large language models

© 2025, E.A. Sidorova^{1,2}✉, A.I. Ivanov², K.A. Ovchinnikova²

¹A.P. Ershov Institute of Informatics Systems SB RAS, Novosibirsk, Russia

²Novosibirsk State University (NSU), Novosibirsk, Russia

Abstract

The article examines the extraction of information from texts using the ontology of a subject area combined with neural network-based text analysis methods, including the use of large language models. It discusses the expert's role in developing and maintaining systems, illustrated through the task of extracting information from analytical articles and constructing ontologies in computational linguistics to represent key concepts relevant to the system's user or customer. The process of ontology creation is accompanied by the development of a dictionary that forms the ontology's termino-

logical core, followed by methods for extracting new terms within the specified subject area. This task is considered as a named entity recognition problem, traditionally addressed by training a neural network model on a representative dataset. The study compares this approach with a methodology leveraging large language models. For this, lexical and syntactic patterns, as well as instruction patterns for hypothesis testing regarding new term-phrases and result verification, were developed. The developed instructions for solving the problem of relation extraction also include the automated generation of natural language competency assessment questions for each ontology relation. The novelty of the proposed approach lies in the integration of ontological, linguistic and neural network approaches to extract information from texts. The study demonstrates the possibility of solving tasks of text analysis and information extraction problems through a chain of large language models, with dynamically generated instructions based on the outcomes of prior analysis stages. The following F1-measure scores were achieved in the experiments: F1=0.8 for term extraction and classification and F1=0.87 for relation extraction.

Keywords: information extraction, domain ontology, large language model, neural network models, prompt engineering.

For citation: Sidorova EA, Ivanov AI, Ovchinnikova KA. Information extraction from texts based on ontology and large language models [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(1): 114-129. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-1-114-129.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures and tables

Figure 1 – Comparison of approaches based on large language models (LLM)

Figure 2 – Scheme of the main stages of the (a) preliminary and (b) experimental phases of the study

Figure 3 – An integrated approach to LLM-based term extraction

Figure 4 – Fragment of the ontology on computational linguistics

Table 1 – Results of term extraction

Table 2 – Results of term extraction and classification

Table 3 – Results of relation extraction

Table 4 – Results of term extraction and classification for each class

References

- [1] **Massel LV.** Knowledge ecosystem as development and specialization of digital ecosystem [In Russian]. Proc. of the International Scientific and Technical Congress “Intellectual Systems and Information Technologies-2023”. Taganrog: Publisher Stupin S.A., 2023: 155-164.
- [2] **Loukachevitch NV, Dobrov BV.** Developing linguistic ontologies in broad domains [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2015; 5(1): 47-69.
- [3] **Ehrlinger L, Wöß W.** Towards a Definition of Knowledge Graphs. Joint Proc. of the Posters and Demos Track of 12th Int. Conf. on Semantic Systems (SEMANTiCS2016) and 1st Int. Workshop on Semantic Change & Evolving Semantics (SuCCESS16). Leipzig, 2016: 13–16.
- [4] **Fernández-López M, Gómez-Pérez A, Pazos A, Pazos J.** Building a Chemical Ontology Using Methontology and the Ontology Design Environment. IEEE Intelligent Systems & their applications. 1999; 4(1): 37–46.
- [5] **Sure Y, Staab S, Studer R.** On-To-Knowledge Methodology. Handbook on Ontologies. 2003; 6: 135–152.
- [6] **Uschold M, King M.** Towards a Methodology for Building Ontologies. Proc. of the Workshop on Basic Ontological Issues in Knowledge Sharing. Montreal, Canada. 1995: 6.1–6.10.
- [7] **Braga J, Dias JLR, Regateiro F.** A Machine Learning Ontology, 2023. DOI: org/10.31226/osf.io/rc954.
- [8] **Ovchinnikova K, Ivanov A, Sidorova E.** Automation of the construction of the terminological core of ontology in computer linguistics based on a corpus of texts [In Russian]. *System Informatics*. 2023; 23: 13-32.
- [9] **Kim SE, Meulder F.** Introduction to the CoNLL-2003 Shared Task: Language-Independent Named Entity Recognition // Proc. of the 7th Conference on Natural Language Learning at HLT-NAACL 2003: 142–147.
- [10] **Gusev VD, Salomatina NV.** Method of iterative construction of templates for searching in texts on catalysis information about chemical processes and conditions of their occurrence [In Russian]. *Information and mathematical technologies in science and management*. 2016; (1): 37–45.
- [11] **Zhu F, Shen B.** Combined SVM-CRFs for biological named entity recognition with maximal bidirectional squeezing. PLoS ONE 7(6): e39230. 2012. DOI: 10.1371/journal.pone.0039230.

- [12] **Ganaie MA, Hu Minghu, Malik AK, Tanveer M, Suganthan PN.** Ensemble deep learning: A review. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2022: 28-29.
- [13] **Li J, Sun A, Han J, Li C.** A survey on deep learning for named entity recognition. *IEEE Transactions on Knowledge & Data Engineering*. 2022; 34(1): 50-70.
- [14] **Lagutina NS, Vasiliev AM, Zafievsky DD.** Tasks in the field of named entities recognition: technologies and tools [In Russian]. *Modeling and analysis of information systems*. 2023; 30(1): 64-85.
- [15] **Brown T, Mann B, Ryder N, Subbiah M, Kaplan JD.** Language Models are Few-Shot Learners. In: *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol.33. Curran Associates, Inc.; 2020: 1877-1901.
- [16] **Wei J, Bosma M, Zhao VY, Guu K.** Finetuned language models are zero-shot learners. Conference paper at ICLR 2022. DOI:10.48550/arXiv.2109.01652, 2022.
- [17] **Kaplan J, McCandlish S, Henighan T, Brown TB, Chess B, Child R, Gray S, Radford A, Wu J, Amodei D.** Scaling Laws for Neural Language Models. 23 Jan 2020. 19 p. DOI: 10.48550/arXiv.2001.08361.
- [18] **Sun S, Yuan R, Cao Z, Li W, Liu P.** Prompt Chaining or Stepwise Prompt? Refinement in Text Summarization. In: *Findings of the Association for Computational Linguistics ACL 2024*. Bangkok, Thailand and virtual meeting. Association for Computational Linguistics; 2024: 7551–7558.
- [19] **Zagorulko YA, Borovikova OI.** Using a System of Heterogeneous Ontology Design Patterns to Develop Ontologies of Scientific Subject Domains. *Programming and Computer Software*. 2020; 46(4): 273–280.
- [20] **Gangemi A, Presutti V.** Ontology Design Patterns. *Handbook on Ontologies*. Springer, 2009: 221-243.
- [21] **Whitfield D.** Using GPT-2 to Create Synthetic Data to Improve the Prediction Performance of NLP Machine Learning Classification Models. *Computation and Language*. arXiv preprint arXiv: 2104.10658, 2020.
- [22] **Sidorova E, Akhmadeeva I.** The software environment for multi-aspect study of lexical characteristics of text. In: Alexander Elizarov, Boris Novikov, Sergey Stupnikov (eds.): *Data Analytics and Management in Data Intensive Domains*. Proc. of the XXI International Conference DAMDID/RCDL'2019. Kazan, 2019: 380-389.

About the authors

Elena Anatolievna Sidorova (b. 1977) graduated from the NSU in 2000, PhD (2006). She is a Senior Researcher of the Laboratory of Artificial Intelligence at the A.P. Ershov Institute of Informatics Systems, and an Associate Professor at Novosibirsk State University. She is a member of Russian and European Associations for Artificial Intelligence. There are more than 170 peer-reviewed publications in the field of Computational Linguistics, Argument Mining, Intelligent System Development, Knowledge and Ontology Engineering. Author ID (RSCI): 146000; ORCID: 0000-0001-8731-3058; Author ID (Scopus): 41961707000; Researcher ID (WoS): K-2432-2018. lsidorova@iis.nsk.su ✉.

Alexander Ivanovich Ivanov (b. 2002) graduated from the NSU in 2024 with a degree in Computer Science and Engineering. Programmer, Data scientist. Author ID (RSCI): 176166. a.ivanov15@alumni.nsu.ru.

Kristina Alekseevna Ovchinnikova (b. 2000) graduated from the NSU in 2024 with a degree in Fundamental and Applied Linguistics. Specialist (NLP Developer). The list of scientific works includes 7 publications in the field of computational linguistics. ORCID: 0000-0002-7400-0586; Author ID (RSCI): 1267926; Author ID (Scopus): 57374190900. k.ovchinnikova2@alumni.nsu.ru.

Received December 2, 2024. Revised January 16, 2025. Accepted January 20, 2025.

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

УДК 004.3

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-130-141



Оценка согласованности мнений неоднородных акторов на предпроектной стадии

© 2025, В.Е. Гвоздев¹, Р.Р. Галимов², О.Я. Бежаева¹✉, К.Ю. Тимофеева¹

¹ Уфимский университет науки и технологий (УУНТ), Уфа, Россия

² Федеральное казенное предприятие «АВАНГАРД», Стерлитамак, Республика Башкортостан, Россия

Аннотация

Основу результатов, представленных в настоящей работе, составляет использование системных архетипов, которые являются унифицированными концептуальными моделями организационных проблем, возникающих при управлении сложными системами. Использование таких архетипов позволяет получить сопоставимые описания проблемных ситуаций при различном видении заинтересованными сторонами (акторами) факторов, препятствующих интеграции локальных систем. Модельную основу исследований составило сочетание системных архетипов и модели «Дом качества», а также коэффициенты корреляции: ранговые, парциальные и множественные. Представлен пример многоаспектного моделирования, в котором полученные коэффициенты корреляции являются индикаторами степени схожести точек зрения акторов на факторы проблемной ситуации. Множественные коэффициенты корреляции рассматриваются как характеристики степени согласованности мнений отдельного актора с мнениями других акторов. Парциальные коэффициенты корреляции рассматриваются как степень согласованности мнений между парами акторов. Предлагаемый аппарат формирования количественных оценок степени совпадений видений проблемных ситуаций неоднородными акторами позволяет оценить эффективность мероприятий, направленных на формирование коммуникационной основы для выработки акторами консолидированного мнения относительно значимости различных факторов проблемной ситуации.

Ключевые слова: сетевое управление, конвергенция, дом качества, системные архетипы, статистическая обработка, оценка согласованности мнений, неоднородный актор.

Цитирование: Гвоздев В.Е., Галимов Р.Р., Бежаева О.Я., Тимофеева К.Ю. Оценка согласованности мнений неоднородных акторов на предпроектной стадии. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №1(55). С.130-141. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-130-141.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Приоритетным направлением реализации доктрины сетецентрического управления является повышение качества управления территориально распределёнными гетерогенными киберфизическими системами [1, 2]. Ключевой компонентой в составе системы сетецентрического управления является информационно-аналитическая система, формирующая единое информационное пространство (ИП) для всех субъектов и киберфизических систем, действующих на разных уровнях иерархии.

Исторически, функциональные возможности локальных информационных систем (ЛИС), на базе которых формируется единое ИП, определялись содержанием задач, характерных для объектов, являющихся подсистемами в составе системы сетецентрического управления. Границы локальных объектов управления, по сравнению с объектами сетецентрического управ-

ления, являлись более чёткими, а условия функционирования более стабильными. Различие условий создания ЛИС обуславливало различие их парадигм.

Динамический характер изменения ситуаций, связанных с сетевым управлением, территориальная неоднородность внешних и внутренних факторов, их оригинальное сочетание в разных подсистемах управления обуславливают разнородные потребности и динамический характер состава и содержания требований со стороны систем управления подсистемами. Наличие доступных ресурсов накладывает ограничения на время выработки заинтересованными сторонами (акторами) стратегии бесшовной информационной интеграции (БИИ) ЛИС.

К числу критических факторов обеспечения успешности БИИ, помимо технологической и семантической составляющих, относится организационная, обусловленная административной независимостью ЛИС. В силу отмеченных обстоятельств обеспечение БИИ возможно лишь на основе выработки акторами согласованной стратегии формирования единого ИП при жёстких ограничениях на время её формирования, а также неполного совпадения интересов и представлений о ценностях акторов (владельцев ЛИС).

«Интенсивное распространение сетевых технологий, включение в процесс принятия решений удалённых участников, создание системы распределённых ситуационных центров в интересах решения вопросов национальной безопасности и многих других обуславливают значимость проблемы управления формированием консолидированного мнения акторов с целью ускорения достижения командного согласия. Необходимо искать подходы, позволяющие групповой мыслительный процесс инкапсулировать в нужное русло, которое выведет на получение хорошего, например, устраивающего всех, решения в отведённое для этого время» [3].

Значимость совершенствования систем мониторинга хода выработки заинтересованными сторонами консолидированного представления о факторах проблемной ситуации (ПС) в особенности на предпроектной стадии имеет критически важное значение при реализации проектов, что неоднократно подчёркивалось, например, в отчётах [4] и в работах [5, 6]. Отмеченное обстоятельство обуславливает актуальность совершенствования методологической и инструментальной баз управления формированием консолидированной точки зрения владельцев ЛИС на факторы, связанные с обеспечением БИИ, включая совершенствование методов мониторинга согласованности мнений неоднородных акторов (НА) [7] о факторах ПС, связанных с формированием единого ИП.

Концептуальной основой в настоящей работе является использование системных архетипов (СА) как формального инструмента описания представления субъективных мнений НА о факторах, влияющих на решение проблемы БИИ ЛИС.

1 ПС в интеграции ЛИС

Продуктом интеграции ЛИС является сложная система (СС) как совокупность различных систем, способных к БИИ, совместной деятельности и независимому функционированию вне рамок интегрированной системы [8]. В состав СС могут входить: полностью сформированные системы; частично сформированные системы; системы, находящиеся на стадии проектирования. Информационное взаимодействие ЛИС является необходимым условием создания СС. Основной проблемой обеспечения взаимодействия независимых и самодостаточных ЛИС является их БИИ. Обеспечение взаимодействия – это комплексная проблема, рассматривать которую необходимо с технической, организационной, управленческой и социальной точек зрения. Факторами ПС, связанных с формированием СС, являются следующие.

- *Эволюционность развития.* Цели создания СС формулируются в терминах увеличения возможностей, но не в виде чётко определённых технических характеристик. Цели функционирования и возможности СС эволюционируют в соответствии со складывающейся ситуацией. Формирование СС предполагает эволюцию на длительную перспективу. Начальной целью является совершенствование механизмов совместного функционирования существующих систем, предвосхищение внутренних и внешних изменений, обуслов-

ленных появлением СС, постепенное расширение функциональных возможностей за счёт включения в СС новых систем либо совершенствования существующих.

- *СС является новообразованием*, возникающим за счёт объединения существующих и вновь создаваемых систем с тем, чтобы за счёт совместной деятельности создавать новые ценности. В ряде случаев в СС может потребоваться удаление устаревших либо перестройка существующих ЛИС.
- *Административная независимость компонент* – отсутствует орган, которому подчиняются системы, входящие в состав СС. Государственные органы не вмешиваются в управление ЛИС, они лишь создают условия, стимулирующие владельцев и менеджеров ЛИС действовать в направлении достижения целей СС.

ЛИС являются разновидностью сложных управляемых субъектоцентрических систем. Их свойствами являются многомерность, многосвязность, динамическое изменение состояния по мере реализации стадий жизненного цикла, в т.ч. в силу изменения состава НА. К числу факторов эмерджентности относятся ошибки различной природы, допускаемые НА при создании, внедрении, эксплуатации и модернизации функциональных компонент ЛИС. Предпосылкой возникновения ошибок является различное понимание НА содержания ПС. Различие мнений НА на значимость разных факторов и проявлений ПС также обусловлено их различным жизненным опытом (опыт, как ценный ресурс, обсуждается, например, в работе [9]).

Эмерджентное поведение СС означает, что предсказать поведение системы в различных ситуациях невозможно. Свойство эмерджентности является результатом либо наличия в системе не выявленных причинно-следственных связей, либо непредсказуемым характером изменения состояния внешней среды, либо результатом нарушения правил взаимодействия с системой [10-12] и др. Последствия непредсказуемости поведения СС могут быть либо позитивными, либо негативными, либо нейтральными.

Отмеченные особенности СС позволяют сделать заключение о невозможности создания СС лишь путём «механического» объединения ЛИС.

2 Концептуальная основа формирования коммуникационной платформы

Совершенствование системы формирования консолидированной точки зрения НА на видение организационных факторов возникновения ПС является необходимым условием формирования интеграции ЛИС в условиях ограничений на сроки и бюджеты проектов [13]. В основе ПС, с которыми приходится сталкиваться при управлении СС, лежат организационные факторы. Например, организационные ошибки, допущенные ключевыми правообладателями, исходя из личных интересов при распределении полномочий и зон ответственности менеджеров, могут послужить причиной ошибок при подборе тем и исполнителей проекта, при планировании проекта и выстраивании отношений с представителями заказчика и т.д. Представляет интерес исследование методов оценивания степени совпадения представлений о содержании ПС, имеющих место при различном видении объекта управления НА.

Конвергенция – это способ совместного решения в случае, когда всех участников сближают сходные проблемные условия, которые заставляют формировать цель и стратегию урегулирования ПС. Нужна сходимост мнений и стремлений относительно выработки единой цели и путей её достижения за счёт создания необходимых для этого условий [14]. Критическим фактором формирования НА консолидированного мнения относительно подходов к урегулированию ПС, связанных с модернизацией и интеграцией систем информационного обеспечения сетцентрического управления, является время выработки НА консолидированных решений. В таких условиях формализмы могут создать необходимые условия для обеспечения сходимости экспертных оценок к заданным целям. Для этого генерируемая в процессе экспертизы информация должна правильным образом структурироваться [14].

К числу базовых понятий теории интересубъективного управления относится конвенционализм, под которым понимается непротиворечивая теория, являющаяся результатом соглашения между НА и формируемая ими на основе своих персонифицированных знаний в ре-

зультате дискурса [7, 15]. Важным является построение формальных моделей ПС на основе совокупного учёта персонального понимания НА причин, определяющих текущее и будущее состояния и поведение объекта управления.

Перспективным направлением в области формализации описания ПС является подход, основанный на СА [7, 16, 17]. Под СА понимаются структуры, которые демонстрируют шаблоны проблемного поведения [7]. СА являются унифицированными концептуальными моделями организационных проблем, возникающих при управлении СС. Краткие описания известных СА [18].

- 1) *Симптоматические решения*. Соответствует подходу, когда быстро устраняются симптомы неотложной проблемы. Однако остаются не устранёнными коренные причины проблемы, что со временем может привести к гораздо более тяжёлым, чем наблюдавшиеся, негативным проявлениям.
- 2) *Перенос бремени*. Соответствует случаю, когда осознаётся необходимость устранения коренных причин проблемы, но текущая ситуация вынуждает предпринимать экстренные меры по её урегулированию. Результатом этих мер могут явиться побочные эффекты, которые осложняют устранение коренных причин.
- 3) *Пределы успеха*. Соответствует ситуации, когда предпринимаемые меры вначале приносят положительный результат, но в последующем из-за роста сопротивления изменениям эффективность реализации мер снижается независимо от того, сколько усилий прилагается. Более того, с течением времени возможен отрицательный эффект от тех действий, что вначале давали положительный эффект.
- 4) *Дрейфующие цели*. Соответствует ситуации, когда по мере осознания разрыва между ресурсами, необходимыми для достижения ранее сформулированных целей, и фактически доступными ресурсами принимается решение о снижении целей.
- 5) *Рост и недостаточное инвестирование*. Соответствует ситуации, когда увеличение положительного эффекта от вложений, связанных с совершенствованием существующих систем, приближается к пределу. Однако отказ от вложений ресурсов в поддержку существующих систем приводит к отрицательным результатам. Это обстоятельство вынуждает вкладывать ресурсы в поддержку морально устаревших систем.
- 6) *Успех к успеху*. Соответствует ситуации, когда два объекта конкурируют за одни и те же ограниченные ресурсы. Эффективность объектов, с точки зрения организации в целом, в настоящее время разная. В результате эффективный объект получает больше ресурсов, за счёт чего развивается. А малоэффективный объект деградирует из-за недостатка ресурсов. Однако возможно, что малоэффективный в настоящее время объект будет приносить в будущем больше пользы, чем более эффективный в настоящем конкурент.
- 7) *Эскалация*. Соответствует ситуации, когда конкуренты предпринимает взаимно угрожающие действия, которые усиливают их ответные меры, пытаясь «одолеть» друг друга.
- 8) *Трагедия общих ресурсов*. Соответствует ситуации, когда несколько объектов, использующих общий ресурс, не обращают внимания на влияние, которое они оказывают на общий ресурс. В конце концов, ресурс заканчивается и происходит остановка функционирования всех объектов, использовавших ресурс.
- 9) *Задержка действия*. Последствия от предпринимаемых в настоящее время мер могут в положительном либо отрицательном смысле проявиться в будущем.
- 10) *Нечаянные противники*. Два объекта начинают свои отношения, имея ввиду взаимовыгодные цели и намереваясь за счёт системного эффекта от объединения усилий достичь того, чего каждый из объектов не в состоянии достичь самостоятельно. Непреднамеренно одна сторона (первый объект) совершает действие, которое другая сторона (второй объект) интерпретирует как выходящее за рамки договорённостей о совместной деятельности, при том, что первый объект получает выгоду в ущерб второму объекту. Вместо того, чтобы общаться и вступать в диалог, второй объект в ответ предпринимает ответные действия, наносящие вред первому объекту. Первый объект, в свою очередь, вместо того, чтобы общаться и вступать в диалог, предпринимает действия, наносящие вред второму объекту, т.е. возникает эффект эскалации.

Применение СА в задачах, связанных с управлением проектами, рассмотрено в [16, 17, 19].

Ограниченное число СА позволяет получить сопоставимое описание ПС при разном видении НА объекта управления. СА способствуют формированию коммуникационного базиса между НА. Разработка формальной схемы создаёт предпосылки для мониторинга хода процесса выработки признаваемого всеми НА видения проблемы. СА создаёт возможность улучшения информационного обеспечения управления выработкой владельцами ЛИС согласованного решения по проблеме БИИ.

Концептуальной основой предлагаемого подхода являются следующее.

- Причина и содержание ПС определяются видением вовлечёнными в её урегулирование НА.

- СА являются унифицированными качественными моделями типовых ПС, имеющих место в СС разной природы. Каждой типовой ПС ставится в соответствие определённый СА.
- ПС формально может быть описана совокупностью СА.
- Вклад той или иной типовой ПС в исследуемую ПС определяется рангом СА. Видению ПС каждым НА ставится в соответствие ранжированная совокупность СА.
- Преобразование ранжированных совокупностей СА к виду числовых характеристик позволяет оценить согласованность видения ПС разными НА.

3 Модельная основа решения задачи

Модельную основу решения задачи составляет конструкция, известная как «Дом качества» [20]. «Крыльцо» представляет собой расположенные в определённом исследователем порядке СА. Каждой i -й строке «комнаты» соответствует один из СА. Столбцы R_{ij} представляют мнение i -го актора о вкладе j -го архетипа в ПС, т.е. являются описанием исследуемой ПС посредством СА. Столбцы представляют совокупность рангов, присваиваемых НА каждому из СА. Допускается присвоение разным СА одинаковых рангов. «Крыша» дома содержит значения парных коэффициентов корреляции, вычисленных посредством известного соотношения на основе ранговых коэффициентов корреляции Кенделла [21, 22]:

$$K_{ij} = \frac{P_{ij} - Q_{ij}}{\sqrt{\left[\frac{1}{2}n(n-1) - P_{ij}\right]\left[\frac{1}{2}n(n-1) - Q_{ij}\right]}}, \quad (1)$$

где P_{ij} – число совпадений рангов, присваиваемых i -м и j -м акторами;

Q_{ij} – число инверсий (несовпадений) рангов, присваиваемых i -м и j -м акторами;

n – число СА (десять).

Формула для перевода ранговых коэффициентов корреляции в парные [23]:

$$r_{ij} = \sin\left(\frac{K_{ij}}{2} * \pi\right). \quad (2)$$

Преобразование субъективных оценок НА относительно значимости тех или иных типовых ПС в исследуемой ПС к виду квадратной матрицы парных коэффициентов корреляции открывает возможность использования аппарата корреляционного анализа и оценки значения множественных и парциальных коэффициентов корреляции.

Множественные коэффициенты корреляции рассматриваются как характеристики степени совпадения некоторой части ПС отдельным НА с видениями остальных НА.

Парциальные коэффициенты корреляции рассматриваются как степень совпадения видения ПС между парами акторов. Целесообразность использования парциальных коэффициентов корреляции обусловлена следующим. За счёт эффектов одновременного влияния неучтённых факторов на исследуемые переменные может искажаться смысл истинной связи между переменными. Например, расчёты приводят к положительному значению коэффициента корреляции между парой случайных величин, в то время как истинная связь между ними имеет отрицательный смысл.

4 Многоаспектное исследование ПС

СС является многомерным объектом, так что каждому видению системы ставится в соответствие определённая грань объекта. Каждой из граней ставится в соответствие разное число акторов, так что размеры матриц коэффициентов парных корреляций, которые ставятся в соответствие разным граням, оказываются различными. В связи с этим, возникает потребность обеспечить сопоставимость оценок НА, соответствующих разным граням видения

многомерного объекта. В качестве граней могут выступать, например, основные факторы, определённые в модели «треугольник проекта» (бюджет, сроки реализации, качество конечного продукта) в редакции 2015 года [4], в которой персонифицируется содержание понятия «качество продукта».

Для i -й грани в рамках предлагаемого подхода это достигается тем, что на основе рангов, которые присваиваются каждому из СА, можно определить медиану, которая и будет представлять совокупную оценку значимости СА на основе оценок разных НА. Каждый из столбцов этой матрицы представляет последовательность медиан рангов, что делает возможным сформировать на основе этой матрицы квадратную матрицу парных коэффициентов корреляции по описанной в разделе 3 схеме. Построение матрицы парных корреляций создаёт основу для исследования взаимовлияния состояний, соответствующих разным видениям, на основе парциальных и множественных коэффициентов корреляции. Это делает возможным применение аппарата корреляционного анализа для исследования схожести представлений НА, по-разному видящих объект управления.

5 Примеры использования метода

В качестве примера рассмотрены три ситуации ($k=1;3$), в которых первая соответствует слабой коррелированности взглядов акторов; вторая - средней коррелированности; третья - сильной коррелированности. Для качественной оценки степени совпадения оценок на основе коэффициентов корреляции используется известная шкала Чеддока [23], которая ставит в соответствие определённым диапазонам абсолютных значений коэффициентов корреляции качественные характеристики силы связи: *слабая*; *умеренная*; *заметная*; *высокая*; *весьма высокая*. При положительных значениях коэффициентов корреляции к ним добавлялось слово «совпадающих», при отрицательных значениях коэффициентов корреляции к ним добавлялось слово «противоположных».

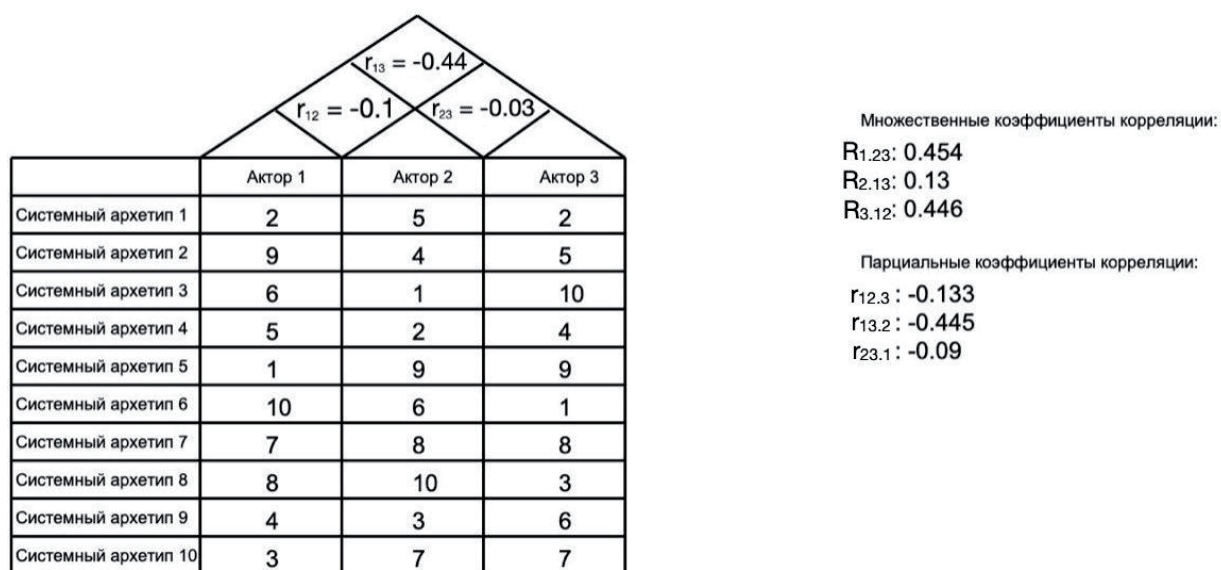
Пусть описанные в разделе 2 десять СА располагаются в некоторую произвольную последовательность, порядок которой в ходе эксперимента не изменяется. Пусть имеются четыре НА, и каждый из них в упомянутых ситуациях присваивает СА определённый ранг, значения которого формировались посредством датчика равномерно распределённых случайных чисел.

Выбирался i -й актер ($i=1;4$), после чего каждому архетипу ($j=1;10$), присваивался ранг, значение которого определялось преобразованием $RANG_{ij} = \text{int}(10 * \xi_{ij})$. Значения $\xi_{ij} \in [a_{ij}^{(k)}, b_{ij}^{(k)}]$ определяли границы, в которых могли изменяться значения j -го архетипа в k -й ситуации. Генерировались значения, равномерно распределённые на заранее заданных интервалах $[a_{ij}^{(k)}, b_{ij}^{(k)}]$. В случае слабой корреляции ($k=1$) для всех НА случайные числа для всех СА находились в диапазоне $[0.1;1]$. В случае средней корреляции ($k=2$) для первого-пятого СА $\xi_{ij} \in [0.1; 0.5]$; для шестого-десятого $\xi_{ij} \in [0.6; 1.0]$. В случае сильной корреляции ($k=3$) для первого и второго архетипов $\xi_{ij} \in [0.1; 0.2]$, для третьего и четвёртого $\xi_{ij} \in [0.3; 0.4]$, для пятого и шестого $\xi_{ij} \in [0.5; 0.6]$, для седьмого и восьмого $\xi_{ij} \in [0.7; 0.8]$, для девятого и десятого $\xi_{ij} \in [0.9; 1.0]$.

Пусть до начала обсуждения состояния проекта НА назначили ранги СА так, как указано в «комнате» дома качества (рисунок 1). «Крыша» дома содержит значения парных коэффициентов корреляции, соответствующих исходному упорядочиванию СА разными НА. На основе рангов (столбцов, соответствующих СА), определённых первым, вторым и третьим Акторами, посредством вышеприведённых соотношений для вычисления ранговых коэффици-

ентов корреляции и расчёту на их основе парных коэффициентов корреляции, была сформирована «крыша» дома качества, компонентами которой являются значения парных коэффициентов корреляции ($r_{12} = -0.1$; $r_{13} = -0.44$; $r_{23} = -0.03$). На основе парных коэффициентов корреляции посредством соотношений [19] были вычислены значения парциальных и множественных коэффициентов корреляции.

После первого дискурса НА переопределили свои представления о значимости СА (в эксперименте этому соответствует схема генерации случайных рангов при $k=2$), после чего вновь вычислены ранговые и парные коэффициенты корреляции и сформирован новый дом качества. Аналогичные операции выполнены при втором дискурсе (этому соответствует схема генерации случайных рангов при $k=3$). Значения множественных и парциальных коэффициентов корреляции, соответствующие рангам, присваиваемым акторами СА, и рассчитанной на их основе матрицы парных коэффициентов корреляции, представлены в таблице 1.



$R_{i,jn}$ – значение множественного коэффициента корреляции, соответствующий i -му актору;

$r_{ij,n}$ – парциальные коэффициенты корреляции для i -го и j -го акторов

Рисунок 1 – Вид дома качества до начала обсуждений проблемной ситуации

Таблица 1 – Значения множественных и парциальных коэффициентов корреляции на разных этапах дискурсов

Номер испытания	Множественные коэффициенты корреляции			Парциальные коэффициенты корреляции		
	$R_{1,23}$	$R_{2,13}$	$R_{3,12}$	$r_{12,3}$	$r_{13,2}$	$r_{23,1}$
$k=1$	0.454	0.130	0.446	-0.133	-0.445	-0.090
$k=2$	0.854	0.824	0.787	0.578	0.451	0.264
$k=3$	0.990	0.980	0.980	0.661	0.661	0.104

Конвергенция видений ПС формально выражалась в том, что на каждом шаге наблюдалось сближение значений множественных коэффициентов корреляции. Различие между значениями парциальных коэффициентов корреляции также уменьшалось. На рисунке 2 представлены графики, характеризующие изменения значений коэффициентов корреляции.

Таким образом, предлагаемый подход к оцениванию степени совпадения точек зрения акторов на основе их субъективного оценивания значимости ПС позволяет оценивать знак тенденции и скорость сходимости (в случае положительной тенденции), что делает возможным оценить качество организации дискурсов, а также оценивать временные затраты на достижение приемлемого совпадения взглядов НА.

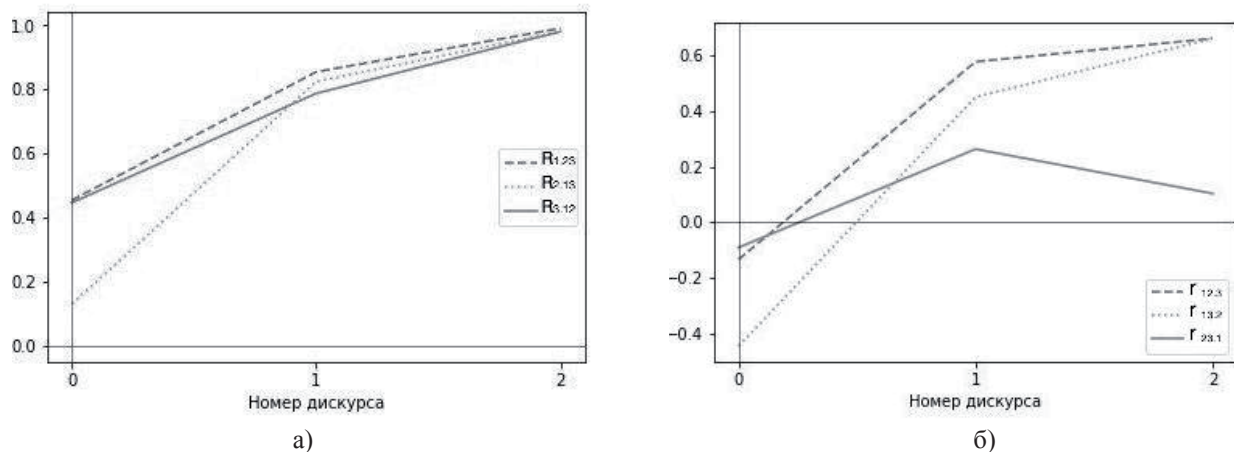


Рисунок 2 – Изменение значений множественных коэффициентов корреляции (а) и парциальных коэффициентов корреляции (б) в ходе дискурсов

Полученным результатам можно дать следующее толкование:

- 1) До начала дискурса, в целом видения факторов ПС первым и третьим НА были схожими. Количественно (на основе шкалы Чеддока [22]) взаимосвязанность точек зрения первого и третьего НА оценивалась как «заметная». Видение факторов ПС вторым актором заметно отличалось от мнений других НА. Количественно схожесть позиций с мнениями двух других НА оценивалась как «слабая».
- 2) В результате дискурса происходит сближение точек зрения всех трёх НА, причём наиболее сильно изменяются представления у второго НА. Количественно после первого обсуждения степень близости точек зрения характеризовалась как «высокая». После второго обсуждения степень близости точек зрения характеризовалась как «весьма высокая». Полученные количественные оценки демонстрируют успешность хода выработки консолидированного видения факторов ПС всеми тремя НА.
- 3) Хотя в целом видение проблемы вторым НА в целом сближается с видениями двух других НА, наиболее динамичное изменение взаимопонимания имеет место между первым и третьим НА. Вначале происходит существенно сближение, так что теснота связи точек зрения изменилась от «заметно противоположных» до «заметно совпадающих». Однако затем степень совпадения взглядов изменилась до «слабо совпадающих». Полученные оценки создают основу для выявления и устранения причин разногласий в оценках НА.
- 4) Предлагаемый подход к оцениванию степени совпадения точек зрения НА на основе их понимания значимости ПС позволяет определить знак тенденции и скорость сходимости (в случае положительной тенденции), что делает возможным оценить качество организации дискурсов, а также временные затраты на достижение приемлемого (с точки зрения управления объектом) совпадения взглядов НА.

Заключение

Формирование единого ИП, возможности которого соответствуют реализации подхода к управлению СС в условиях динамично меняющейся обстановки, является критическим фактором успешного решения задач сетецентрического управления. Успех интеграции ЛИС в глобальную информационную сеть в наибольшей степени определяется способностью НА выработать консолидированное понимание содержания и степени влияния различных факторов, препятствующих решению задач обеспечения технологической, семантической и организационной интероперабельности, что создаёт основу для выработки консолидированной стратегии интеграции.

Успешность формирования НА консолидированного понимания содержания и степени влияния различных факторов в условиях жёстких ограничений на время формирования и реализации стратегии интеграции ЛИС в значительной степени зависит от возможности контроля результативности и эффективности решения задач конвергентного управления. В настоящей работе предложен подход, позволяющий получить количественные оценки согласованности точек зрения НА на факторы, негативно влияющие на интеграцию ЛИС. Ос-

нову подхода составляет использование СА, которые рассматриваются как набор описания на качественном уровне негативно влияющих факторов.

Предложенная схема формирования метрических характеристик степени согласованности мнений НА создаёт основу для мониторинга степени сближения точек зрения НА в результате дискурса и может служить основанием для оперативного совершенствования процессов конвергентного управления.

Авторский вклад

Гвоздев В.Е. - концептуальные основы; Бежаева О.Я. - методические основы, программная реализация; Галимов Р.Р. - модель «Дом качества», формирование количественных характеристик; Тимофеева К.Ю. - вычислительный эксперимент, программная реализация.

Список источников

- [1] **Макаренко С.И., Иванов М.С.** Сетевая война – принципы, технологии, примеры и перспективы. Монография. СПб.: Научно-технологические технологии, 2018. 898 с.
- [2] **Сурма И.В., Анненков В.И., Карпов В.В., Мусеев А.В.** «Сетевое управление»: современная парадигма развития систем управления в вооружённых силах ведущих держав мира. *Национальная безопасность*. 2014. № 2(31), с.317-327. DOI: 10.7256/2073–8560.2014.2.11393.
- [3] **Райков А.Н.** Конвергентность коллективного принятия решений с применением когнитивного моделирования // Труды II Международной научной конференции «Конвергентные когнитивно-информационные технологии» (Convergent'2017), Москва, 24-26 ноября, 2017. С.297-309.
- [4] CHAOS Report. The Standish Group International, Inc., 2015. 13 p.
- [5] **Reason J.** Human Error. Cambridge: Cambridge University Press. 1990. 302 p.
- [6] **Silva R.F. da, Carvalho M.A. de.** Anticipatory Failure Determination (AFD) for product reliability analysis: A comparison between AFD and Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) for identifying potential failure modes: Creating and managing innovations. 2019. 23 p. DOI: 10.1007/978-3-319-78075-7_12.
- [7] **Виттих В.А.** Неоднородный актор и повседневность как ключевые понятия эвристики: препринт. Самара: ИПУСС РАН, 2014. 12 с.
- [8] Strategy for a Net-Centric, Service Oriented DoD Enterprise // Department of Defense. Prepared by the DoD CIO, March 2007. 18 p.
- [9] **Шведин Б.Я.** Онтология предприятия: экспириентологический подход. М.: ЛЕНАНД, 2010. 240 с.
- [10] **Michael G., John V.** Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems // в сборнике Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems, Springer International Publishing Switzerland 2017, F.-J. Kahlen et al. (eds.). P.85-114. DOI 10.1007/978-3-319-38756-7_4.
- [11] **Reason J., Hollnagel E., Paries J.** Revisiting the “Swiss Cheese” Model of Accidents, EEC Note No. 13/06. European Organization for the Safety of Air Navigation, October 2006. 25 p.
- [12] **Bell A.** How to Use the Swiss Cheese Accident Causation Model Enterprise Training Solutions, 2018. 55 p.
- [13] ANSI/IEEE Std 1471-2000, Recommended Practice for Architectural Description of Software-Intensive Systems.
- [14] **Райков А.Н.** Конвергентное управление и поддержка решений. М.: Издательство ИКАР, 2009. 245 с.
- [15] **Виттих В.А.** Введение в теорию интересубъективного управления. Самара: СамНЦ РАН, 2013. 64 с.
- [16] **Гвоздев В.Е., Васильев В.И., Гузаиров М.Б., Бежаева О.Я.** Поддержка управления функциональной безопасностью аппаратно-программных комплексов на основе системных архетипов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2022; 10(2). С.1-14. DOI: 10.26102/2310-6018/2022.37.2.025
- [17] **Гвоздев В.Е., Гузаиров М.Б., Бежаева О.Я.** Анализ влияния качества управления проектом на состояние функциональной безопасности аппаратно-программных комплексов на основе системного архетипа «предел роста». *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021; 9(3). С.1-15. DOI: 10.26102/2310-6018/2021.34.3.026.
- [18] **Braun W.** The system archetypes, 2002. 26 p.
- [19] **Гвоздев В.Е., Бежаева О.Я., Насырова Р.А.** Модели возникновения ошибок на предпроектной стадии разработки компонент информационно-вычислительных систем. *Онтология проектирования*. 2020. Т.10, №1. С.73-86. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-73-86.
- [20] **Ficalora J.P., Cohen L.** Quality Function Deployment and Six Sigma: A QFD Handbook, 2nd Edition, Pearson Education, Inc., 2010. 527 p.
- [21] **Корни Г., Корн Т.** Справочник по математике. М.: Наука, 1974. 831 с.

- [22] **Кобзарь А.И.** Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006.
- [23] **Кремер Н.Ш., Путко Б.А.** Эконометрика. М.: Издательство Юрайт, 2024. 308 с.

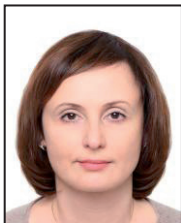
Сведения об авторах



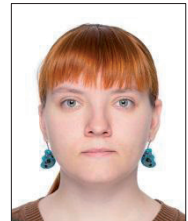
Гвоздев Владимир Ефимович (1956 г. рождения). Окончил Уфимский авиационный институт им. Орджоникидзе (1978), д.т.н. (2000). Профессор кафедры технической кибернетики УУНиТ. В списке научных трудов более 370 работ в области прикладного статистического анализа, информационной поддержки управления программными системами, информационной поддержки управления состоянием территориальных систем. Author ID (РИНЦ): 174520; Author ID (Scopus): 7101700484; ORCID: 0000-0002-1481-0982. wega55@mail.ru.



Галимов Роберт Ришатович (1975 г. рождения). Окончил Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ) в 2000 г. Временно исполняющий обязанности генерального директора ФКП «Авангард». В списке научных трудов 15 работ. ORCID: 0009-0006-5947-7067. dahat@ya.ru.



Бежаева Оксана Яковлевна (1977 г. рождения). Окончила Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ) в 2000 г., к.т.н. (2004). Заведующий кафедрой технической кибернетики УУНиТ. В списке научных трудов более 100 работ в области разработки моделей и программного обеспечения сложных систем, информационной поддержки управления программными проектами и системами. Author ID (РИНЦ): 271220; Author ID (Scopus): 57216845244; ORCID: 0000-0002-3373-7266. obezhaeva@gmail.ru ✉.



Тимофеева Кристина Юрьевна (2003 г. рождения). Обучается в УУНиТ на направлении «Информатика и вычислительная техника». ORCID: 0009-0002-9511-5160. krista.2003@bk.ru.

Поступила в редакцию 03.10.2024, после рецензирования 4.01.2025. Принята к публикации 10.01.2025.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-130-141

Assessment of opinion consistency of heterogeneous actors at the pre-project stage

© 2025, V.E. Gvozdev¹, R.R. Galimov², O.Ya. Bezhaeva¹✉, K.Yu. Timofeeva¹

¹ Ufa University of Science and Technology (UUST), Ufa, Russia

² Federal State Enterprise "AVANGARD", Sterlitamak, Republic of Bashkortostan, Russia

Abstract

The findings presented in this paper rely on system archetypes, which serve as unified conceptual models for addressing organizational challenges in managing complex systems. These archetypes facilitate the creation of comparable descriptions of problem situations by accommodating differing perspectives of stakeholders (actors) on the factors hindering the integration of local systems. The research framework integrates system archetypes with the House of Quality model and employs correlation coefficients—rank, partial, and multiple. An example of multi-faceted modeling is provided, wherein the calculated correlation coefficients act as indicators of the degree of alignment in actors' views regarding the factors of the problem situation. Multiple correlation coefficients are interpreted as measures of the consistency of an individual actor's opinions with those of the collective group, while partial correlation coefficients gauge the alignment of opinions between specific pairs of actors. The proposed methodology for quantitatively assessing the alignment of heterogeneous actors' perspectives enables the evaluation of the effectiveness of initiatives aimed at building a commu-

nication framework that supports the development of a shared understanding of the significance of various factors in a problem situation.

Keywords: network-centric management, convergence, house of quality, system archetypes, statistical processing, assessment of opinion consistency, heterogeneous actor.

For citation: Gvozdev VE, Galimov R.R. Bezhaeva OYa, Timofeeva K.Yu. Assessment of opinion consistency of heterogeneous actors at the pre-project stage [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(1): 130-141. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-130-141.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures and tables

Figure 1 - The view of the House of quality before the discussion of the problem

Figure 2 - Changes in the values of multiple correlation coefficients (a) and partial correlation coefficients (b) during discourses

Table 1 - The values of multiple and partial correlation coefficients at different stages of discourses

References

- [1] **Makarenko SI, Ivanov MS.** Network-centric warfare - principles, technologies, examples and prospects [In Russian]. St. Petersburg: Science-intensive technologies. 2018. 898 p.
- [2] **Surma IV, Annenkov VI, Karpov VV, Moiseev AV.** "Network-centric management": a modern paradigm for the development of control systems in the armed forces of the leading powers of the world [In Russian]. *National Security*. 2014; 2(31): 317-327. DOI: 10.7256/2073-8560.2014.2.11393.
- [3] **Raikov AN.** Convergence of collective decision-making using cognitive modeling [In Russian]. Proceedings of the II International Scientific Conference "Convergent Cognitive Information Technologies" (Convergent'2017) [In Russian], Moscow, November 24-26, 2017. P.297-309.
- [4] CHAOS Report. The Standish Group International, Inc., 2015. 13 p.
- [5] **Reason J.** Human Error James Reason. Cambridge: Cambridge University Press. 1990. 302 p.
- [6] **Silva RF da, Carvalho MA de.** Anticipatory Failure Determination (AFD) for product reliability analysis: A comparison between AFD and Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) for identifying potential failure modes: Creating and managing innovations. 2019. 23 p. DOI: 10.1007/978-3-319-78075-7_12.
- [7] **Vittikh VA.** Heterogeneous actor and everyday life as key concepts of energy: preprint [In Russian]. Samara: ICCS RAS, 2014. 12 p.
- [8] Strategy for a Net-Centric, Service Oriented DoD Enterprise. Department of Defense. Prepared by the DoD CIO, March 2007. 18 p.
- [9] **Shvedin BYa.** Ontology of the enterprise: an experiential approach [In Russian]. Moscow: LENAND, 2010. 240 p.
- [10] **Michael G, John V.** Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In the collection *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, Springer International Publishing Switzerland 2017, F.-J. Kahlen et al. (eds.), pp. 85-114. DOI 10.1007/978-3-319-38756-7_4.
- [11] **Reason J, Hollnagel E, Paries J.** "Revisiting the "Swiss Cheese" Model of Accidents", EEC Note No. 13/06. European Organization for the Safety of Air Navigation, October 2006, 25 p.
- [12] **Bell A.** How to Use the Swiss Cheese Accident Causation Model Enterprise Training Solutions, 2018.
- [13] ANSI/IEEE Std 1471-2000, Recommended Practice for Architectural Description of Software-Intensive Systems.
- [14] **Raikov AN.** Convergent management and decision support [In Russian]. Moscow: IKAR Publishing House, 2009. 245 p.
- [15] **Vittikh VA.** Introduction to the theory of intersubjective management [In Russian]. Samara: SamSTC RAS, 2013. 64 p.
- [16] **Gvozdev VE, Vasiliev VI, Guzairov MB, Bezhaeva OYa.** Support for functional safety management of hardware and software complexes based on system archetypes [In Russian]. *Modeling, optimization and information technology*. 2022;10(2). DOI: 10.26102/2310-6018/2022.37.2.025.
- [17] **Gvozdev VE, Guzairov MB, Bezhaeva OYa.** Analysis of the impact of project management quality on the state of functional safety of hardware and software complexes based on the system archetype "pre-business of growth" [In Russian]. *Modeling, optimization and information technology*. 2021; 9(3): 1-15. DOI: 10.26102/2310-6018/2021.34.3.026.
- [18] **Braun W.** The system archetypes. 2002. 26 p.

- [19] **Gvozdev VE, Bezhaeva OY, Nasyrova RA.** Models of errors at the pre-design stage of development of information and computing systems components [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2020; 10(1): 73-86. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-73-86.
 - [20] **Ficalora JP, Cohen L.** Quality Function Deployment and Six Sigma: A QFD Handbook, 2nd Edition, Pearson Education, Inc., 2010. 527 p.
 - [21] **Korn G, Korn T.** Handbook of Mathematics (for scientists and engineers) [In Russian]. Moscow: Nauka, 1974, 831 p.
 - [22] **Kobzar AI.** Applied mathematical statistics. For engineers and scientists [In Russian]. Moscow: FIZMATLIT, 2006.
 - [23] **Kremer NS, Putko BA.** Econometrics [In Russian]. Moscow: Yurait Publishing House, 2024. 308 p.
-

About the authors

Vladimir Efimovich Gvozdev (b. 1956) graduated from the Ufa Aviation Institute in 1978, D. Sc. Eng. (2000). He is a Professor of the Department of Technical Cybernetic at the UUST. He is a co-author of about 370 scientific articles and abstracts in the field of applied statistical analysis, information support for managing software system, information support for managing the state of territorial system. Author ID (Scopus): 7101700484; ORCID: 0000-0002-1481-0982. wega55@mail.ru.

Robert Rishatovich Galimov (b. 1975) graduated from the Ufa State Aviation Technical University in 2000. Acting Director General at "Avangard", Federal State Unitary Enterprise. He is a co-author of about 15 scientific articles and abstracts. ORCID: 0009-0006-5947-7067. dahat@ya.ru.

Oksana Yakovlena Bezhaeva (b. 1977) graduated from the Ufa State Aviation Technical University in 2000, PhD (2004). She is the Head of the Department of Technical Cybernetic at the UUST. She is a co-author of about 100 scientific articles and abstracts in the field of development of models and software for complex system, information support for managing software projects and systems. Author ID (RSCI): 271220; Author ID (Scopus): 57216845244; ORCIDID: 0000-0002-3373-7266. obezhaeva@gmail.ru ✉

Kristina Yurievna Timofeeva (b. 2003), a student of Computer Science and engineering at the UUST. ORCID: 0009-0002-9511-5160. krista.2003@bk.ru.

Received October 3, 2024. Revised January 4, 2025. Accepted January 10, 2025.



Математическое моделирование нестационарного теплопереноса в селективном лазерном плавлении на основе машинного обучения

© 2025, Е.А. Кишов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия

Аннотация

Рассматривается численное моделирование тепловых процессов при 3D-печати с использованием технологии селективного лазерного плавления на основе машинного обучения. Построена математическая модель нестационарного теплопереноса в стержне переменного сечения в виде дифференциального уравнения в частных производных относительно температуры стержня. Предложен алгоритм численного решения уравнения с использованием системы *Matlab*. Показано, что при определённых исходных данных распределение температуры носит квазистационарный характер. Для данного случая получено простое аналитическое выражение для температурного поля. С использованием библиотеки *TensorFlow* построена и обучена нейросеть. Данные для обучения нейросети получены при помощи аналитического решения тепловой задачи. Результаты расчётов с использованием нейросети соответствуют результатам решения исходной математической модели. Отмечается, что трёхмерное моделирование процесса печати для реальных изделий требует значительных компьютерных ресурсов. Показано, что модели на основе машинного обучения могут быть использованы для аппроксимации температурного поля при 3D-печати по технологии селективного лазерного плавления подобных по форме деталей.

Ключевые слова: 3D-печать, нестационарный теплоперенос, распределение температуры, математическое моделирование, машинное обучение, нейросеть.

Цитирование: Кишов Е.А. Математическое моделирование нестационарного теплопереноса в селективном лазерном плавлении на основе машинного обучения. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №1(55). С.142-151. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-142-151.

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), номер проекта 23-79-01213.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

3D-печать по технологии селективного лазерного плавления (СЛП) активно используется для производства сложных деталей в аэрокосмической промышленности [1]. Эта технология основана на послойном синтезе детали на основе её компьютерной модели путём сплавления лазером металлического порошка [2]. Физические процессы в СЛП включают комплекс термомеханических явлений, происходящих в различных пространственно-временных границах. Например, на уровне ванны расплава происходят процессы нагрева, плавления и испарения металла, а также теплопередачи путём теплопроводности, конвекции и излучения. В детали за счёт тепловых деформаций происходит накопление остаточных напряжений, что сказывается на итоговой форме напечатанного изделия. В данной работе рассматриваются вопросы математического моделирования процессов теплопередачи, происходящих в СЛП на макроуровне (на уровне детали) [3].

Тепловой расчёт процесса печати в трёхмерной постановке ввиду нестационарного характера и нелинейных эффектов в материале сопровождается значительными вычислитель-

ными затратами. В частности, опыт использования программного комплекса *Ansys Additive*¹ показывает, что время расчёта реальных изделий может измеряться сутками. Поэтому актуальной является проблема ускорения численного моделирования процесса 3D-печати.

Задача упрощается для расчётов однотипных изделий. В этом случае целесообразно обучить нейронную сеть (НС) и в последующем использовать её для быстрого определения температурного поля при различных комбинациях исходных параметров. НС в настоящее время используются в различных предметных областях: от генерации текста и мультимедиа контента [4, 5] до аппроксимации сложных математических моделей (ММ) физических систем [6].

НС и машинное обучение в области аддитивных технологий применяются следующим образом [7]: при проектировании изделий для 3D-печати – это синтез материалов с заданными свойствами и проведение топологической оптимизации; при выборе параметров технологического процесса – оптимизация и мониторинг дефектов печати в реальном времени; при планировании аддитивного производства – для контроля качества готовых изделий.

Для оценки принципиальной возможности использования НС для приближённого описания процессов теплопередачи при 3D-печати в данной работе рассматривается одномерная идеализация теплового процесса, когда учитывается только распространение тепла вдоль оси печати (оси Z). Использование такой модели представляется вполне оправданным в случаях, когда высота изделия значительно превышает два других габаритных размера. Одномерная идеализация при моделировании теплопереноса в аддитивном процессе использована в работе [8]. Решение нестационарной тепловой задачи оптимального управления технологическим процессом индукционного нагрева заготовки рассмотрено в работах [9, 10].

1 Математическая модель теплопередачи в процессе 3D-печати

В данной работе рассматривается ММ теплопередачи в процессе послойного синтеза в одномерной постановке, когда изменение температуры учитывается только в направлении оси печати Z. При этом геометрическая модель изготавливаемой конструкции может быть описана в виде стержня с изменяющимся вдоль оси Z поперечным сечением $A = A(z)$.

Количество теплоты Q , необходимое для нагрева массы m с некоторой температуры T_* до температуры T , вычисляется по известной формуле: $Q = cm(T - T_*)$, где c – удельная теплоёмкость материала. Для вычисления количества теплоты в единице объёма стержня необходимо продифференцировать обе части этого уравнения по объёму V :

$$\frac{dQ}{dV} = c\rho(T - T_*),$$

где $\rho = dm/dV$ – плотность материала. Тепловая мощность в единице объёма находится путём дифференцирования полученного соотношения по времени t , что с учётом независимости T_* от t приводит к формуле:

$$\frac{d\dot{Q}}{dV} = c\rho \frac{\partial T}{\partial t},$$

где точкой над Q обозначена производная по времени. Тепловой поток q в стержне, по определению, представляет собой тепловую мощность, приходящуюся на единицу поперечного сечения: $q = \dot{Q}/A$, откуда $\dot{Q} = q \cdot A$. Учёт того факта, что элемент объёма dV выражается через площадь сечения как $dV = A \cdot dz$ даёт

¹ Модуль для моделирования процессов 3D-печати *Ansys Additive*. <https://www.ansys.com/products/additive>.

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial z} (q \cdot A) = c \rho \frac{\partial T}{\partial t}.$$

Связь градиента температуры и теплового потока определяется законом Фурье:

$$q = k \frac{\partial T}{\partial z},$$

где k – коэффициент теплопроводности. Подстановка этого выражения в предыдущую формулу в предположении постоянства k по координате z приводит к дифференциальному уравнению теплопроводности для стержня переменного сечения следующего вида:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(A \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\rho c A}{k} \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (1)$$

Следует заметить, что при постоянной площади сечения величина A выносится из-под оператора дифференцирования по z и, после очевидного сокращения, формула (1) трансформируется в классическое одномерное уравнение нестационарной теплопроводности. Граничное условие (ГУ) на «подвижном» (направляемом) конце стержня соответствует поддержанию заданной максимальной температуры:

$$T(z, t) \Big|_{z=L(t_i)} = T_{\max}. \quad (2)$$

ГУ на «неподвижном» конце стержня задаётся в виде уравнения конвекции:

$$h \left(T(z, t) \Big|_{z=0} - T_{\min} \right) = k \frac{\partial T}{\partial z}. \quad (3)$$

Здесь $T_{\min}$ – температура окружающей среды, h – коэффициент конвективной теплоотдачи. При $h \rightarrow \infty$ данное ГУ трансформируется в условие поддержания постоянной $T_{\min}$ на неподвижном конце стержня. Принимая для h конечные значения, можно обеспечить физически адекватное значение температуры на неподвижном конце стержня.

Уравнение теплопроводности (1) решается итерационно в цикле по временным шагам. На каждом шаге Δt происходит увеличение длины стержня на величину ΔL . Длина стержня L увеличивается с течением времени, что соответствует пошаговому добавлению материала при 3D-печати. Начальное распределение температур задаётся на основе поля температур на предыдущей итерации:

$$T(z, t) \Big|_{t=t_i} = T(z, t) \Big|_{t=t_{i-1}}.$$

Для решения уравнений в частных производных в *Matlab* используется функция «*pdepe*». Правила использования данной функции предполагают, что уравнение должно быть представлено в виде [11]:

$$c \left(z, t, T, \frac{\partial T}{\partial z} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = z^{-n} \frac{\partial}{\partial z} \left(z^n f \left(z, t, T, \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right) + s \left(z, t, T, \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (4)$$

где функции c , f и s , а также коэффициент n задаются таким образом, чтобы уравнение (4) в точности соответствовало решаемой задаче. В данном случае для величин c , m , f , s получаются следующие значения:

$$c \left(z, t, u, \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\rho c_p A}{k}, \quad f \left(z, t, T, \frac{\partial T}{\partial z} \right) = A \frac{\partial T}{\partial z}, \quad s = 0, \quad n = 0. \quad (5)$$

Подстановка этих значений в уравнение (4) приводит к исходному уравнению (1). Общий вид выражения для ГУ в *Matlab* следующий:

$$p_i(z, t, T) + q_i(z, t) \cdot f \left(z, t, T, \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0, \quad i = l, r. \quad (6)$$

Здесь функции p_i и q_i должны быть заданы для обоих концов стержня: условно левого (индекс l) и условно правого (индекс r) – неподвижного и подвижного концов стержня соответственно. Для реализации ГУ по обеспечению заданной температуры необходимо на подвижном конце стержня задать

$$\begin{aligned} p_r(z, t, T) &= T - T_{\max}, \\ q_r(z, t) &= 0. \end{aligned}$$

где T – текущая температура стержня, $T_{\max}$ – температура на подвижном конце стержня.

ГУ конвекции на неподвижном конце стержня задаётся как

$$\begin{aligned} p_l(z, t, T) &= A_{\text{plate}} h (T_{\min} - T_0), \\ q_l(z, t) &= -k_{\text{plate}}. \end{aligned}$$

Здесь A_{plate} – площадь поперечного сечения плиты, k_{plate} – коэффициент её теплопроводности, T_0 – температура окружающего плиту пространства. Подстановка этих значений в (6), с учётом выражения для функции f в формуле (5), приводит к условиям (2) и (3) соответственно.

Зависимость площади сечения от координаты z задаётся функцией

$$A(z) = \begin{cases} A_{\text{plate}}, & z \leq L_{\text{plate}}, \\ A_{\text{part}}, & z > L_{\text{plate}}. \end{cases}$$

Здесь A_{part} – площадь поперечного сечения детали, L_{plate} – толщина опорной плиты.

В качестве тестовой задачи использован образец, представленный на рисунке 1, на котором показан процесс печати в текущей стадии, где итоговые очертания детали показаны пунктиром. Размеры на рисунке указаны в миллиметрах. Свойства материала соответствуют алюминиевому сплаву: $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$, $c_p = 900 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$, $k = 122 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$. Коэффициент теплоотдачи h принят равным 500 Вт/м^2 .

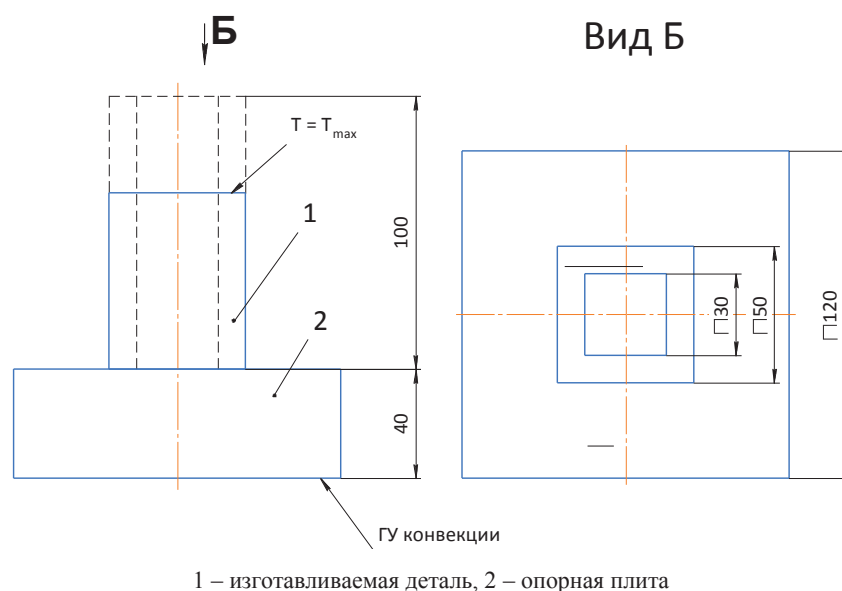


Рисунок 1 – Геометрия образца для тестовой задачи

Максимальная температура, поддерживаемая на верхнем конце детали, соответствует температуре плавления типового алюминиевого сплава и составляет 660 °С.

Распределение температуры в конечный момент времени, полученное в результате численного решения уравнения (1), приведено на рисунке 2. Из рисунка видно, что распределение температуры имеет кусочно-линейный характер. Это означает установившийся характер теплопередачи и позволяет построить квазистационарную аналитическую модель процесса. В последующем обучении НС, связанном с многократным расчётом температурного поля, это обстоятельство позволит значительно сократить время обучения. Распределение температур можно с достаточной точностью описать функцией:

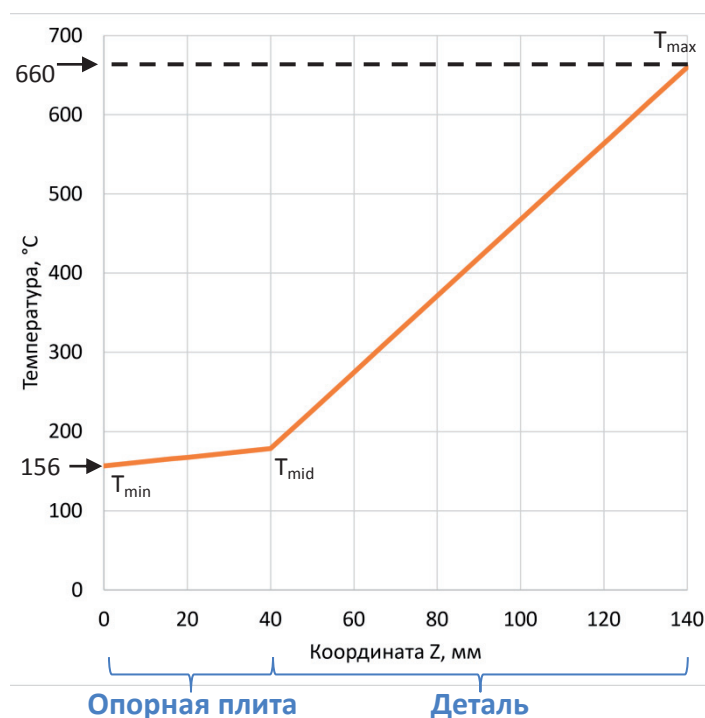


Рисунок 2 – Распределение температуры в конечный момент времени

$$T(z) = \begin{cases} T_{\min} + \frac{T_{\text{mid}} - T_{\min}}{z_{\text{plate}}} \cdot z, & 0 \leq z \leq z_{\text{plate}} \\ T_{\text{mid}} + \frac{T_{\max} - T_{\text{mid}}}{z_{\text{part}} - z_{\text{plate}}} \cdot (z - z_{\text{plate}}), & z_{\text{plate}} \leq z \leq z_{\text{part}} \end{cases} \quad (7)$$

где $z_{\text{plate}} = L_{\text{plate}}$ – толщина опорной плиты, L_{part} – высота детали, $z_{\text{part}} = L_{\text{plate}} + L_{\text{part}}$.

Для вычисления температуры на границе раздела «плита-деталь» T_{mid} и температуры в основании опорной плиты $T_{\min}$ можно воспользоваться законом сохранения энергии:

$$\begin{cases} q_{\text{plate}} A_{\text{plate}} = q_{\text{part}} A_{\text{part}}, \\ q_{\text{conv}} A_{\text{plate}} = q_{\text{plate}} A_{\text{plate}}. \end{cases}$$

Первое уравнение отражает равенство количества тепловой энергии, уходящее в единицу времени с детали, количеству энергии в единицу времени, поглощаемую опорной плитой. Второе уравнение отражает аналогичное равенство в отношении конвективного теплового потока и теплового потока с опорной плиты. Воспользовавшись далее законом Фурье, связывающим градиент температуры и тепловой поток [12], можно получить:

$$\begin{cases} -\frac{A_{\text{plate}}}{L_{\text{plate}}} T_{\min} + \left(\frac{A_{\text{plate}}}{L_{\text{plate}}} + \frac{A_{\text{part}}}{L_{\text{part}}} \right) T_{\text{mid}} = \frac{A_{\text{part}}}{L_{\text{part}}} T_{\max}, \\ \left(h + \frac{k_{\text{plate}}}{L_{\text{plate}}} \right) T_{\min} - \frac{k_{\text{plate}}}{L_{\text{plate}}} T_{\text{mid}} = h T_0. \end{cases} \quad (8)$$

В результате получается система двух линейных уравнений относительно T_{mid} и T_{min} . Ввиду громоздкости общего решения системы (8), в программном коде она решается численно методом Гаусса.

Таким образом, системы уравнений (7) и (8) определяют ММ теплового процесса, которая используется для обучения НС.

2 Модель теплопереноса в 3D-печати при помощи НС

Рассмотрена задача построения приближённого представления ММ, описанной в разделе 1, при помощи искусственной НС. В качестве параметров для обучения НС и получения распределения температуры $T(z)$ исследованы четыре геометрических размера: площадь сечения плиты S_{plate} и образца S_{part} , их длины L_{plate} и L_{part} . Свойства материала и ГУ остаются неизменными. Таким образом, температура является функцией пяти аргументов: $T = T(z, S_{\text{plate}}, L_{\text{plate}}, S_{\text{part}}, L_{\text{part}})$. Заданы следующие диапазоны изменения этих параметров: $p_{i\min} = 0.5p_{i0}$, $p_{i\max} = 1.5p_{i0}$, где для краткости обозначено $p_i = S_{\text{plate}}, S_{\text{part}}, L_{\text{plate}}, L_{\text{part}}$, а p_{i0} – некоторое начальное значение параметра. Диапазон изменения координаты определяется максимальными значениями длин плиты и детали: $z_{\min} = 0$, $z_{\max} = L_{\text{plate max}} + L_{\text{part max}}$.

Для обучения НС необходимо в диапазоне изменения параметров сгенерировать обучающую выборку. Это набор комбинаций параметров и соответствующей им температуры, вычисленной при помощи ММ. Здесь можно воспользоваться планом эксперимента, например, таким как центральный композиционный план или план Бокса-Бенкена [13]. В данной работе использован подход, в котором количество точек в пространстве параметров ограничено заданным числом $n_{\text{train}} = 1000$. Обучающая выборка строится следующим образом:

$$\{p_i\} = \text{rand}(p_{i\min}, p_{i\max}, n_{\text{train}}), \{z\} = \text{rand}(0, z_{\max}, n_{\text{train}}),$$

где «rand» – функция, формирующая массив случайных чисел размерности n_{train} в заданном диапазоне. Построение обучающей выборки завершается вычислением температуры по формулам (7) и (8) для каждой комбинации параметров p_i и координаты z .

Важным фактором, влияющим на качество аппроксимации НС, являются абсолютные значения диапазонов изменения входных и выходных параметров. В качестве функции активации в НС часто используется гиперболический тангенс $\tanh(x)$, который принимает значения от -1 до 1 и является гладкой (дифференцируемой) аппроксимацией ступенчатой функции. Поэтому, если отобразить (отмасштабировать) все параметры на данный отрезок, то качество процесса обучения улучшится. В этом случае большинство значений внутри НС будут находиться на квазилинейном участке с $\tanh(x)$ и алгоритму обучения (часто используется градиентный спуск [14]) проще найти минимум функции потерь. Масштабирование уместно, когда параметры имеют различные физические размерности. В работе использовалось масштабирование всех параметров на отрезок [-1, 1] при помощи функции линейной интерполяции из библиотеки *NumPy*².

Архитектура НС показана на рисунке 3.

Программная реализация НС осуществлена на языке *Python* с использованием библиотеки *TensorFlow*³. Архитектура НС определена на основе примеров из документации к данной библиотеке. В качестве функции активации для всех слоёв использован $\tanh(x)$. Для обучения НС использован алгоритм оптимизации *Adam* [15]. Максимальное количество «эпох» –

² Библиотека численных методов *NumPy* для языка *Python*. <https://numpy.org/doc/stable/reference/generated/numpy.interp.html>.

³ Библиотека *Tensor-Flow* (<https://www.tensorflow.org/>) для языка *Python*.

просмотров обучающей выборки – равно 100. Тестовые расчёты показывают, что данный параметр в совокупности с типом функции активации и методом оптимизации оказывают наиболее существенное влияние на точность нейросетевой аппроксимации. В качестве функции потерь принято среднеквадратичное отклонение. Для ускорения обращения к обученной НС реализовано сохранение архитектуры сети и её весов в иерархическом формате данных (HDF5) с последующим импортом перед использованием.

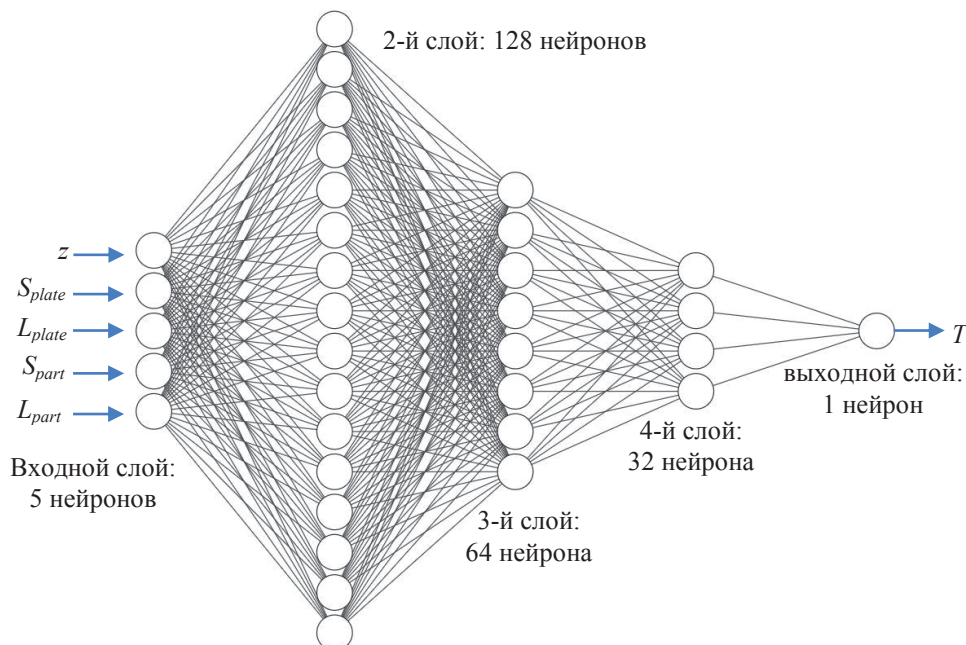


Рисунок 3 – Архитектура используемой нейронной сети

3 Использование НС для определения температур в образце

С использованием обученной НС построено распределение температур в конечный момент времени в изготовленном образце. Набор входных параметров определён следующим образом. Задано количество тестовых точек (комбинаций значений параметров) $n_{test} = 50$. Определены векторы входных параметров $\{p_i\}$ размерности n_{test} и постоянные значения p_{i0} , например, $L_{plate0} = 0,04$ м, $L_{part0} = 0,1$ м, $S_{plate0} = 0,0144$ м², $S_{part0} = 0,0016$ м². Вектор координат $\{z\}$ заполняется арифметической прогрессией от 0 до $L_{plate0} + L_{part0}$. Полученный набор значений формирует тестовую выборку, которая нормируется на отрезке $[-1,1]$ и подаётся на вход НС. Вычисляются температуры по заданным входным параметрам. Полученный на выходе вектор температур приводится к исходному масштабу, поскольку на этапе обучения он подвергался нормированию.

Результаты расчёта температур в образце с использованием НС приведены на рисунке 4.

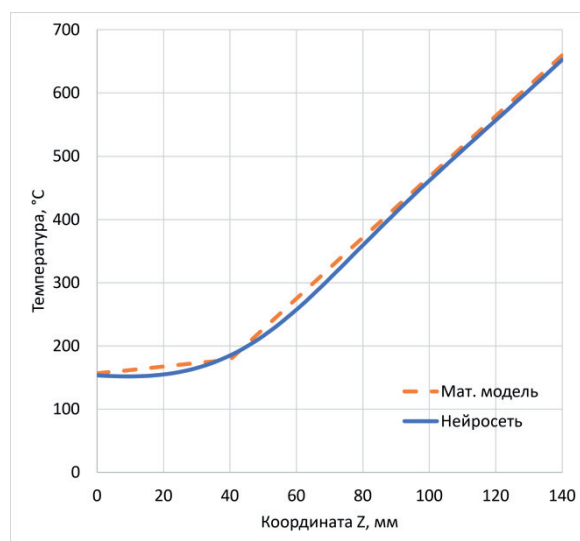


Рисунок 4 – Распределение температур по математической модели и нейросети

Выводы

Сопоставляя распределения температур по высоте плиты и детали, полученные с использованием ММ и НС (рисунок 4), можно сделать вывод, что НС обеспечивает достаточно высокую точность. Этот результат показывает принципиальную возможность нейросетевой аппроксимации ММ физических систем, поведение которых описывается дифференциальными уравнениями в частных производных. Деталь, выращиваемая на 3D-принтере, в совокупности с процессами теплопереноса, относится к таким системам.

Список источников

- [1] **Blakey-Milner B., Gradl P., Snedden G. et al.** Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Materials & Design*. 2021. Vol.209. 110008. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.110008.
- [2] **Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М.** Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров. М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015, 220 с.
- [3] **Bayat A., Dong W., Thorborg J., To A.C., Hattel J.H.** Review of multi-scale and multi-physics simulations of metal additive manufacturing processes with focus on modeling strategies. *Additive Manufacturing*. 2021. Vol.47. 102278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102278>.
- [4] **Young T., Hazarika D., Poria S., Cambria E.** Recent Trends in Deep Learning Based Natural Language Processing // *IEEE Computational Intelligence Magazine*. 2018. Vol.13. Iss.3. P.55-75. DOI: 10.1109/MCI.2018.2840738.
- [5] **Epstein Z., Hertzmann A.** Art and the science of generative AI. *Science*. 2023. Vol.380. Iss.6650. P.1110-1111. DOI: 10.1126/science.adh4451.
- [6] **Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G.E.** Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*. 2019. Vol.378. P.686-707. DOI: 10.1016/j.jcp.2018.10.045.
- [7] **Wang C., Tan X.P., Tor S.B., Lim C.S.** Machine learning in additive manufacturing: State-of-the-art and perspectives. *Additive Manufacturing*. 2020. Vol.36. 101538. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101538.
- [8] **Jeronen J., Tuovinen T., Kurki M.** One-Dimensional Thermomechanical Model for Additive Manufacturing Using Laser-Based Powder Bed Fusion. *Computation*. 2022. Vol.10. Iss.6. DOI: 10.3390/computation10060083.
- [9] **Рапопорт Э.Я., Плишиццева Ю.Э.** Технология оптимального проектирования сложноструктурированных систем с распределёнными параметрами: программные стратегии принятия решений. *Онтология проектирования*. 2017. Т.7, № 2. С.172-190. DOI: 0.18287/2223-9537-2017-7-2-172-190.
- [10] **Рапопорт Э.Я., Плишиццева Ю.Э.** Альтернативный метод в векторных задачах параметрической оптимизации систем с распределёнными параметрами. *Онтология проектирования*. 2018. Т.8, №4. С.615-627. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-4-615-627.
- [11] **Matlab.** Официальная документация. <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/pdepe.html>.
- [12] **Кутателадзе С.С., Боришанский В.М.** Справочник по теплопередаче. 1958. М.: Госэнергоиздат. 414 с.
- [13] **Myers R.H., Montgomery D.C., Anderson-Cook C.M.** Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, 4th Edition. 2016. Wiley. 856 p.
- [14] **Kelleher J.D., Namee B.M., D'Arcy A.** Fundamentals of machine learning for predictive data analytics: algorithms, worked examples. 2nd Edition. 2020. The MIT Press. 853 p.
- [15] **Kingma D.P., Ba J.** Adam: A Method for Stochastic Optimization // *Materials of 3rd International Conference for Learning Representations, San Diego, 2015*. DOI: 10.48550/arXiv.1412.6980.

Сведения об авторе

Кишов Евгений Алексеевич, 1992 г. рождения. Окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени С.П. Королёва в 2014 г., к.т.н. (2019). Доцент кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов Самарского университета. В списке научных трудов более 45 работ в области проектирования, оптимизации конструкций и численного моделирования. ORCID: 0000-0002-6893-1894; Author ID (РИНЦ): 1050945; Author ID (Scopus) 57039050400. evgeniy.kishov@ssau.ru.



Поступила в редакцию 13.05.2024, после рецензирования 20.12.2024. Принята к публикации 23.12.2024.



Mathematical modeling of non-stationary heat transfer in selective laser melting based on machine learning

© 2025, E.A. Kishov

Samara University (Samara National Research University named after academician S.P. Korolev), Samara, Russia

Abstract

The article considers numerical modeling of thermal processes in 3D printing using selective laser melting technology based on machine learning. A mathematical model of non-stationary heat transfer in a rod with a variable cross section is developed as a partial differential equation describing the rod's temperature. An algorithm for numerically solving this equation is proposed, implemented using the Matlab system. It is shown that, for certain initial conditions, the temperature distribution becomes quasi-stationary, and for this case, a simple analytical expression for the temperature field is obtained. A neural network is constructed and trained using the TensorFlow library, with training data obtained from the analytical solution of the thermal problem. The neural network's calculation results align with the solutions of the original mathematical model. The article highlights that three-dimensional modeling of the printing process for real-world products demands substantial computational resources. It is shown that machine learning-based models can effectively approximate the temperature field in 3D printing with selective laser melting technology for components of similar geometry.

Keywords: 3D printing, non-stationary heat transfer, temperature distribution, mathematical modeling, machine learning, neural network.

For citation: Kishov EA. Mathematical modeling of non-stationary heat transfer in selective laser melting based on machine learning [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(1): 142-151. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-1-142-151.

Financial Support: This work was supported by the Russian Science Foundation (project 23-79-01213).

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

List of figures

Figure 1 – Geometry of the sample for the test task

Figure 2 – Temperature distribution at the final moment of time

Figure 3 – Architecture of the neural network used

Figure 4 – Temperature distribution according to the mathematical model and neural network

References

- [1] **Blakey-Milner B, Gradl P, Snedden G. et al.** Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Materials & Design*. 2021; 209. 110008. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.110008.
- [2] **Zlenko MA, Nagaitsev MV, Dovbysh VM.** Additive technologies in mechanical engineering: a manual for engineers [In Russian]. Moscow, State Research Center of the Russian Federation, Federal State Unitary Enterprise "NAMI", 2015, 220 p.
- [3] **Bayat A, Dong W, Thorborg J, To AC, Hattel JH.** Review of multi-scale and multi-physics simulations of metal additive manufacturing processes with focus on modeling strategies. *Additive Manufacturing*. 2021; 47. 102278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102278>.
- [4] **Young T, Hazarika D, Poria S, Cambria E.** Recent Trends in Deep Learning Based Natural Language Processing. *IEEE Computational Intelligence Magazine*. 2018; 13(3): 55-75. DOI: 10.1109/MCI.2018.2840738.
- [5] **Epstein Z, Hertzmann A.** Art and the science of generative AI. *Science*. 2023; 380(6650): 1110-1111. DOI: 10.1126/science.adh4451.

-
- [6] **Raissi M, Perdikaris P, Karniadakis GE.** Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations // *Journal of Computational Physics*. 2019; 378: 686-707. DOI: 10.1016/j.jcp.2018.10.045.
 - [7] **Wang C, Tan XP, Tor SB, Lim CS.** Machine learning in additive manufacturing: State-of-the-art and perspectives. *Additive Manufacturing*. 2020; 36. 101538. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101538.
 - [8] **Jeronen J, Tuovinen T, Kurki M.** One-Dimensional Thermomechanical Model for Additive Manufacturing Using Laser-Based Powder Bed Fusion. *Computation*. 2022; 10(6). DOI: 10.3390/computation10060083.
 - [9] **Rapoport EYa, Pleshivtseva YuE.** Technology of optimal designing of complex-structured systems with distributed parameters: program strategy of decision making [In Russian]. *Ontology of designing*. 2017; 7(2): 172-190. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-2-172-190.
 - [10] **Rapoport EYa, Pleshivtseva YuE.** Alternance method in vector problems of parametric optimization of systems with distributed parameters [In Russian]. *Ontology of designing*. 2018; 8(4): 615-627. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-4-615-627.
 - [11] Matlab. Official documentation. <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/pdepe.html>.
 - [12] **Kutateladze SS, Borishansky VM.** Handbook of heat transfer [In Russian]. 1958. Moscow: Gosenergoizdat. 414 p.
 - [13] **Myers RH, Montgomery DC, Anderson-Cook CM.** Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, 4th Edition. 2016. Wiley. 856 p.
 - [14] **Kelleher JD, Namee BM, D'Arcy A.** Fundamentals of machine learning for predictive data analytics: algorithms, worked examples. 2nd Edition. 2020. The MIT Press. 853 p.
 - [15] **Kingma DP, Ba J.** Adam: A Method for Stochastic Optimization // Materials of 3rd International Conference for Learning Representations, San Diego, 2015. DOI: 10.48550/arXiv.1412.6980.
-

About the author

Evgeniy Alekseevich Kishov (b. 1992) graduated from Samara State Aerospace University named after S.P. Korolev in 2014, PhD (2019). Associate Professor of the Department of Aircraft Design and Construction at Samara University. The list of scientific publications includes more than 45 works in the field of design, optimization of structures and numerical modeling. ORCID: 0000-0002-6893-1894; Author ID (RSCI): 1050945; Author ID (Scopus) 57039050400. evgeniy.kishov@ssau.ru.

Received May 13, 2024. Revised December 20, 2024. Accepted December 23, 2024.

Саммит по онтологиям 2025¹

Концептуализация, анализ и формализация

Две стороны онтологии: связь онтологий с миром и теориями о мире

Саммит по онтологиям² — это ежегодная серия мероприятий, в которых участвуют сообщество онтологов и сообщества, связанные с темой саммита каждого года. Подобно предыдущим 19-ти саммитам, *Ontology Summit 2025* будет состоять из виртуального обсуждения, виртуальных презентаций и панельных сессий видеоконференций. Цель саммита — представить некоторый синтез идей и подготовить коммюнике с кратким изложением основных результатов саммита³. На саммите будут рассмотрены вопросы о том, что такое онтология, как онтологии связаны с такими понятиями, как концептуализация, теория и семантика.

Никола Гуарино подготовит почву для обсуждения своим основным докладом «Онтологии как спецификации концептуализаций: правильность, точность и аккуратность», который дополнит Джанкарло Гиццарди, обсудив понятия семантика, онтология и объяснение. Концептуализация является фундаментальной для онтологий, но для того, чтобы спецификация была полезной, необходим тщательный анализ. Майкл Грунингер и Барри Смит рассмотрят, как можно конкретизировать концептуализацию реальности с помощью математических теорий. На следующем семинаре будет рассмотрен вопрос о том, что такое теория, который перерастёт в серию семинаров, посвящённых философским и теоретическим вопросам.

Во второй половине саммита будут рассмотрены конкретные вопросы, относящиеся к данным и к их связи с концептуализациями, реальностью и онтологиями. Особый интерес представляют онтологии, в которых постоянно увеличивается объём данных. Как можно эффективно вербализировать и визуализировать такие большие онтологии? Как можно контролировать качество по мере увеличения объёма данных? Насколько эффективны эти онтологии на практике? Могут ли онтологии адекватно поддерживать рассуждения?

Основные обсуждаемые темы на саммите 2025 по направлениям

Направление 1: Концептуализация теоретической формы реальности

- Семантика, онтология и объяснение
- Наследники шестой проблемы Гильберта
- Модели, теории и онтологии
- Что такое теория?

Направление 2: Теоретические знания и реальность

- Философия — от феноменологии до учения о бытии, существовании и теоретического знания
- Теоретическое знание — нормативные формы представления в различных областях деятельности
- Критика встречающихся на практике определений с точки зрения онтологического инжиниринга

Направление 3: От реальности к данным

- Создатели истины; восприятие; осведомлённость о ситуации
- Контроль качества онтологий с точки зрения поддерживающих теорий
- Как мы можем создавать свои устройства и манипуляторы?
- Как мы можем использовать теоретические знания для создания измерительных и других инструментов?
- Вербализация данных: любую единицу данных можно прочитать вслух
- Визуализация данных

Направление 4: Онтологии и данные

- В чём разница между онтологией и математической теорией?
- Примеры онтологий с большим количеством данных (например, ABox, KG).

¹ Ontology Summit 2025: Conceptualization, Analysis and Formalization.

<https://ontologforum.com/index.php/OntologySummit2025>.

² Ontology Summit. <https://ontologforum.com/index.php/OntologySummit>.

³ См. Коммюнике предыдущего Ontology Summit 2024. K. Baclawski, M. Bennett, G. Berg-Cross, T. Schneider, R. Sharma, M. Underwood, A. Westerinen. Ontologies, Neuro-Symbolic and Generative AI Technologies. Toward Trustworthy AI Systems. <https://ontologforum.s3.us-east-1.amazonaws.com/OntologySummit2024/Ontologies,+Neuro-Symbolic+and+Generative+AI+Technologies.pdf>.