

ISSN 2712-8687

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

1/2022

CONTROL  SCIENCES

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

С. Н. Васильев, академик РАН,
И. А. Каляев, академик РАН,
В. А. Левин, академик РАН,
Н. А. Махутов, чл.-корр. РАН,
А. Ф. Резчиков, чл.-корр. РАН,
Е. А. Федосов, академик РАН

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Ф. Т. Алескеров, д-р техн. наук,
В. Н. Афанасьев, д-р техн. наук,
Н. Н. Бахтадзе, д-р техн. наук,
В. Н. Бурков, д-р техн. наук,
В. М. Вишневский, д-р техн. наук,
В. В. Клочков, д-р экон. наук,
С. А. Краснова, д-р техн. наук,
Н. В. Кузнецов, д-р физ.-мат. наук,
О. П. Кузнецов, д-р техн. наук,
В. В. Кульба, д-р техн. наук,
А. Г. Кушнер, д-р физ.-мат. наук,
А. А. Лазарев, д-р физ.-мат. наук,
В. Г. Лебедев, д-р техн. наук,
В. Е. Лепский, д-р психол. наук,
Н. Е. Максимова, канд. техн. наук
(ответственный секретарь),
А. С. Мандель, д-р техн. наук,
Р. В. Мещеряков, д-р техн. наук,
А. И. Михальский, д-р биол. наук,
Д. А. Новиков, чл.-корр. РАН
(гл. редактор),
Б. В. Павлов, д-р техн. наук,
Ф. Ф. Пашенко, д-р техн. наук
(зам. гл. редактора),
Л. Б. Рапопорт, д-р физ.-мат. наук,
С. В. Ратнер, д-р экон. наук,
Е. Я. Рубинович, д-р техн. наук,
В. Ю. Рутковский, д-р техн. наук,
М. В. Хлебников, д-р физ.-мат. наук,
А. Д. Цвиркун, д-р техн. наук,
П. Ю. Чеботарёв, д-р физ.-мат. наук,
И. Б. Ядыкин, д-р техн. наук

РУКОВОДИТЕЛИ РЕГИОНАЛЬНЫХ РЕДСОВЕТОВ

Владивосток – О. В. Абрамов, д-р техн. наук,
Волгоград – А. А. Воронин, д-р физ.-мат. наук,
Воронеж – С. А. Баркалов, д-р техн. наук,
Курск – С. Г. Емельянов, д-р техн. наук,
Липецк – А. К. Погодаев, д-р техн. наук,
Пермь – В. Ю. Столбов, д-р техн. наук,
Ростов-на-Дону – Г. А. Угольницкий,
д-р техн. наук,
Самара – М. И. Гераськин, д-р экон. наук,
Саратов – В. А. Твердохлебов, д-р техн. наук,
Уфа – Б. Г. Ильясов, д-р техн. наук

ADVISORY BOARD

E. A. Fedosov, Academician of RAS¹,
I. A. Kalyaev, Academician of RAS,
V. A. Levin, Academician of RAS,
N. A. Makhutov, Corr. Member of RAS,
A. F. Rezchikov, Corr. Member of RAS,
S. N. Vassilyev, Academician of RAS

EDITORIAL BOARD

V. N. Afanas'ev, Dr. Sci. (Tech.),
F. T. Aleskerov, Dr. Sci. (Tech.),
N. N. Bakhtadze, Dr. Sci. (Tech.),
V. N. Burkov, Dr. Sci. (Tech.),
P. Yu. Chebotarev, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
V. V. Klochkov, Dr. Sci. (Econ.),
M. V. Khlebnikov, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
S. A. Krasnova, Dr. Sci. (Tech.),
V. V. Kulba, Dr. Sci. (Tech.),
A. G. Kushner, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
N. V. Kuznetsov, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
O. P. Kuznetsov, Dr. Sci. (Tech.),
A. A. Lazarev, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
V. G. Lebedev, Dr. Sci. (Tech.),
V. E. Lepskiy, Dr. Sci. (Phych.),
N. E. Maximova, Cand. Sci. (Tech),
Executive Editor-in-Chief,
A. S. Mandel, Dr. Sci. (Tech.),
R. V. Meshcheryakov, Dr. Sci. (Tech.),
A. I. Michalski, Dr. Sci. (Biol.),
D. A. Novikov, Corr. Member of RAS,
Editor-in-Chief,
F. F. Pashchenko, Dr. Sci. (Tech.),
Deputy Editor-in-Chief,
B. V. Pavlov, Dr. Sci. (Tech.),
L. B. Rapoport, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
S. V. Ratner, Dr. Sci. (Econ.),
E. Ya. Rubinovich, Dr. Sci. (Tech.),
V. Yu. Rutkovskii, Dr. Sci. (Tech.),
A. D. Tsvirkun, Dr. Sci. (Tech.),
V. M. Vishnevsky, Dr. Sci. (Tech.),
I. B. Yadykin, Dr. Sci. (Tech)

LEADERS OF REGIONAL BOARDS

Kursk – S. G. Emelyanov, Dr. Sci. (Tech.),
Lipetsk – A. K. Pogodaev, Dr. Sci. (Tech.),
Perm – V. Yu. Stolbov, Dr. Sci. (Tech.),
Rostov-on-Don – G. A. Ougolnitsky,
Dr. Sci. (Tech.),
Samara – M. I. Geraskin, Dr. Sci. (Econ.),
Saratov – V. A. Tverdokhlebov, Dr. Sci. (Tech.),
Ufa – B. G. Ilyasov, Dr. Sci. (Tech.),
Vladivostok – O. V. Abramov, Dr. Sci. (Tech.),
Volgograd – A. A. Voronin, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
Voronezh – S. A. Barkalov, Dr. Sci. (Tech.)

¹Russian Academy of Sciences.



CONTROL SCIENCES
Научно-технический
журнал

6 номеров в год
ISSN 1819-3161 (Print)
ISSN 2712-8687 (Online)
Издается с 2003 года

УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ

Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН

Главный редактор
чл.-корр. РАН
Д.А. Новиков

Заместитель главного редактора
Ф.Ф. Пащенко

Ответственный секретарь
Н.Е. Максимова

Выпускающий редактор
Л.В. Петракова

Адрес редакции
117997, ГСП-7, Москва,
ул. Профсоюзная, д. 65, к. 410

Тел./факс (495) 198-17-20, доб. 1410

E-mail: ru@ipu.ru

Интернет: <http://pu.mtas.ru>
<http://controlsciences.org>

Опубликовано: 25 февраля 2022 г.

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-49203 от 30 марта 2012 г.
выдано Министерством Российской
Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых
коммуникаций

Свидетельство о регистрации
Эл № ФС 77-80482 от 17 февраля 2021 г.
выдано Федеральной службой
по надзору в сфере связи,
информационных технологий и
массовых коммуникаций

Журнал входит в RSCI на платформе
Web of Science и Перечень
рецензируемых научных изданий ВАК

Журнал включен в Российский индекс
научного цитирования (РИНЦ).
На сайте Научной электронной
библиотеки (www.elibrary.ru) доступны
полные тексты статей.

© Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

1.2022

СОДЕРЖАНИЕ

Обзоры

Шихалев Д.В. Проблемы управления системой обеспечения
пожарной безопасности объекта. Ч.1. Методы оценки 3

Управление в социально-экономических системах

Белов М.В. Оптимальное управление жизненными циклами
сложных изделий, объектов, систем 19

Красников К.Е. Математическое моделирование некоторых
социально-этических норм поведения с помощью
теоретико-игровых подходов 33

Управление подвижными объектами и навигация

Алчинов А.И., Гороховский И.Н. Концепция создания
прикладной географической информационной системы
моделирования поисковых корреляционно-экстремальных
систем автономной навигации 54

Кутахов В.П., Мещеряков Р.В. Управление групповым
поведением беспилотных летательных аппаратов: постановка
задачи применения технологий искусственного интеллекта 67

Хроника

**XXIX международная конференция «Проблемы управления
безопасностью сложных систем» 75**



CONTROL SCIENCES
Scientific Technical
Journal

6 issues per year

ISSN 1819-3161 (Print)

ISSN 2712-8687 (Online)

Published since 2003

FOUNDER and PUBLISHER

V.A. Trapeznikov

Institute of Control Sciences

of Russian Academy of Sciences

Editor-in-Chief

D.A. Novikov, Corr. Member of RAS

Deputy Editor-in-Chief

F.F. Pashchenko

Executive Editor-in-Chief

N.E. Maximova

Editor

L.V. Petrakova

Editorial address

65 Profsoyuznaya st., office 410,
Moscow 117997, Russia

☎/📠 +7(495) 198-17-20, ext. 1410

✉ pu@ipu.ru

URL: <http://pu.mtas.ru>

<http://controlsciences.org>

Published: February 25, 2022

Registration certificate of

ПИ № ФС 77-49203 от 30 March 2012

issued by the Ministry of Press,

Broadcasting, and Mass Media

of the Russian Federation

Registration certificate of

Эл № ФС 77-80482 of 17 February 2021

issued by the Federal Service

for Supervision of Communications,

Information Technology, and Mass Media

The Journal is indexed in RSCI (Russian

Science Citation Index) on the platform

Web of Science and in the list of peer-

reviewed scientific publications of HAC

On the website of the Scientific electronic

library (www.elibrary.ru) full texts of

articles are available

© V.A. Trapeznikov

Institute of Control Sciences

of Russian Academy of Sciences

CONTROL SCIENCES

1.2022

CONTENTS

Surveys

Shikhalev, D.V. Problems of Managing the Fire Safety
System of a Facility. Part I: Assessment Methods 3

Control in Social and Economic Systems

Belov, M.V. Optimal Control of the Life Cycle
of Complex Systems 19

Krasnikov, K.E. Some Social and Ethical Norms of Behavior:
Mathematical Modeling Using Game-Theoretic Approaches 33

Control of Moving Objects and Navigation

Alchinov, A.I., Gorokhovskiy, I.N. A Conceptual
Applied Geographic Information System for Modeling Search
Autonomous Correlation-Extreme Navigation Systems 54

Kutakhov, V.P., Meshcheryakov, R.V. Group Control
of Unmanned Aerial Vehicles: A Generalized Problem Statement
of Applying Artificial Intelligence Technologies 67

Chronicle

29th International Conference on Complex Systems
Security Control 75

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТА.

Ч.1. Методы оценки

Д.В. Шихалев

Аннотация. Приводятся результаты обзора области и возможностей управления системой обеспечения пожарной безопасности объекта с позиции руководителя (представителя) объекта. Первая часть обзора посвящена общей постановке проблемы исследования и рассмотрению методов оценки пожарной безопасности объекта и безопасности людей внутри здания. Показано, что пожары и гибель людей на них свидетельствуют о наличии определенных проблем либо в области системы обеспечения пожарной безопасности объекта как таковой, либо в области управления такой системой. Установлено, что существующие методы оценки состояния пожарной безопасности объекта не могут быть применены руководителем, так как это требует глубоких знаний предмета оценки и наличия соответствующей квалификации и инструментария (компьютерных программ). В сложившейся ситуации руководитель организации как лицо, принимающее решение, не имеет какой-либо формализованной объективной оценки состояния пожарной безопасности его организации в конкретный момент времени, что существенно осложняет принятие рациональных управленческих решений, а зачастую делает его невозможным.

Ключевые слова: пожарная безопасность, управление, оценка состояния объекта управления, система обеспечения пожарной безопасности, пожарный риск.

ВВЕДЕНИЕ

Каждый объект капитального строительства должен иметь систему обеспечения пожарной безопасности объекта (СОПБ) для предотвращения пожара, обеспечения безопасности людей и защиты имущества при пожаре.

Исходя из назначения системы, в качестве критерия ее оценки целесообразно принять предотвращенный пожар и отсутствие гибели (травмирования) людей. Однако результаты анализа показывают, что, несмотря на общую тенденцию сокращения количества пожаров, они все еще ведут к гибели большого числа людей (ежегодно гибнет не менее 7 000 чел.) и наносят значительный ущерб, который составляет свыше 15 миллиардов рублей ежегодно и продолжает расти [1]. Не менее 90 % людей погибают при пожарах, возникших в результате нарушения правил пожарной безопасности и неосторожного обращения с огнем, что в целом определяет управленческий аспект проблемы.

Качественный анализ крупных пожаров показал, что основными причинами возникновения пожара, приводящего к массовой гибели людей, является либо нарушение мер пожарной безопасности (неосторожное обращение с огнем, курение в неположенных местах, проведение огневых работ и т. д.), либо неисправность электропроводки. Так или иначе, эти проблемы относятся к области организации пожарной безопасности на объекте.

Основными причинами, влекущими за собой гибель и травмирование людей, являются либо отсутствие (отключение) пожарной сигнализации и оповещения, либо отсутствие необходимых мер в области эвакуации (механическая блокировка эвакуационных выходов, отсутствие или плохая организация эвакуации). Как и причины возникновения пожара, причины, приводящие к гибели и травмированию людей, лежат в области организации и управления пожарной безопасностью объекта.

Таким образом, приведенные выше данные свидетельствуют о наличии определенных проблем

либо в области системы обеспечения пожарной безопасности объекта как таковой, либо в области управления такой системой.

Ретроспективный обзор существующей системы обеспечения пожарной безопасности объекта, особенностей ее функционирования и организационно-управленческих аспектов [1] показал, что эта система развивалась весьма медленно, а области управления такой системой не рассматривались и сводились лишь к уточнению организационно-технических мероприятий. В тоже время, нет ни одного документа, определяющего порядок управления такой системой, критерии оценки текущего состояния системы либо механизмов управления такой системой. Таким образом, в настоящее время понятие системы обеспечения пожарной безопасности как объекта управления отсутствует, так как эта процедура не описана, нет критериев оценки эффективности СОПБ, руководитель фактически не понимает, чем ему нужно управлять.

Целью настоящей работы является обзор области и возможностей управления системой обеспечения пожарной безопасности объекта с позиции руководителя (представителя) объекта. Обзор состоит из двух взаимосвязанных частей. Первая часть посвящена методам оценки пожарной безопасности объекта и безопасности людей внутри здания, рассмотрение которых начинается с описания системы обеспечения пожарной безопасности объекта.

1. СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТА

Требования действующего законодательства¹ в Российской Федерации определяют необходимость наличия системы обеспечения пожарной безопасности для каждого объекта. Структура СОПБ показана на рис. 1.

В состав СОПБ входят три основных подсистемы: система предотвращения пожара, система противопожарной защиты и комплекс организационно-технических мероприятий по обеспечению пожарной безопасности объекта. Рассмотрим их подробнее.

Целью создания систем предотвращения пожаров является исключение условий возникновения пожаров, которое достигается путем исключения условий образования горючей среды и (или) исключения условий образования в горючей среде (или внесения в нее) источников зажигания¹.

¹ Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 № 123-ФЗ.

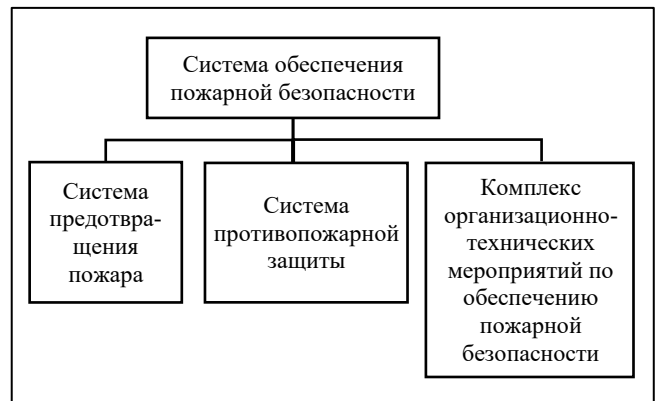


Рис. 1. Структура системы обеспечения пожарной безопасности объекта

Исключение условий образования горючей среды обеспечивается одним или несколькими из следующих способов:

- применение негорючих веществ и материалов;
- ограничение массы и (или) объема горючих веществ и материалов;
- использование наиболее безопасных способов размещения горючих веществ и материалов, а также материалов, взаимодействие которых друг с другом приводит к образованию горючей среды;
- изоляция горючей среды от источников зажигания (применение изолированных отсеков, камер, кабин);
- поддержание безопасной концентрации в среде окислителя и (или) горючих веществ;
- понижение концентрации окислителя в горючей среде в защищаемом объеме;
- поддержание температуры и давления среды, при которых распространение пламени исключается;
- механизация и автоматизация технологических процессов, связанных с обращением горючих веществ;
- установка пожароопасного оборудования в отдельных помещениях или на открытых площадках;
- применение устройств защиты производственного оборудования, исключающих выход горючих веществ в объем помещения, или устройств, исключающих образование в помещении горючей среды;
- удаление из помещений, технологического оборудования и коммуникаций пожароопасных отходов производства, отложений пыли, пуха.

Исключение условий образования в горючей среде (или внесения в нее) источников зажигания достигается одним или несколькими из следующих способов:



- применение электрооборудования, соответствующего классу пожароопасной и (или) взрывоопасной зоны, категории и группе взрывоопасной смеси;

- применение в конструкции быстродействующих средств защитного отключения электроустановок или других устройств, исключающих появление источников зажигания;

- применение оборудования и режимов проведения технологического процесса с защитой от статического электричества;

- устройство молниезащиты зданий, сооружений и оборудования;

- поддержание безопасной температуры нагрева веществ, материалов и поверхностей, которые контактируют с горючей средой;

- применение способов и устройств ограничения энергии искрового разряда в горючей среде до безопасных значений;

- применение искробезопасного инструмента при работе с легковоспламеняющимися жидкостями и горючими газами;

- ликвидация условий для теплового, химического и (или) микробиологического самовозгорания обращающихся веществ, материалов и изделий;

- исключение контакта с воздухом пирофорных веществ;

- применение устройств, исключающих возможность распространения пламени из одного объема в смежный.

Целью создания систем противопожарной защиты является *защита людей и имущества от воздействия опасных факторов пожара и (или) ограничение его последствий*. Это обеспечивается одним или несколькими из следующих способов:

- применение объемно-планировочных решений и средств, обеспечивающих ограничение распространения пожара за пределы очага;

- устройство эвакуационных путей, удовлетворяющих требованиям безопасной эвакуации людей при пожаре;

- устройство систем обнаружения пожара (установок и систем пожарной сигнализации), оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре;

- применение систем коллективной защиты (в том числе противодымной) и средств индивидуальной защиты людей от воздействия опасных факторов пожара;

- применение основных строительных конструкций с пределами огнестойкости и классами пожарной опасности, соответствующими требу-

емым степени огнестойкости и классу конструктивной пожарной опасности зданий и сооружений, а также с ограничением пожарной опасности поверхностных слоев (отделок, облицовок и средств огнезащиты) строительных конструкций на путях эвакуации;

- применение огнезащитных составов (в том числе антипиренов и огнезащитных красок) и строительных материалов (облицовок) для повышения пределов огнестойкости строительных конструкций;

- устройство аварийного слива пожароопасных жидкостей и аварийного стравливания горючих газов из аппаратуры;

- устройство на технологическом оборудовании систем противозрывной защиты;

- применение первичных средств пожаротушения;

- применение автоматических и (или) автономных установок пожаротушения;

- организация деятельности подразделений пожарной охраны.

Обобщение рассмотренных подсистем позволило сформировать дерево целей СОПБ, изображенное на рис. 2.

Исходя из представленной структуры СОПБ, целей подсистем и способов достижения таких целей можно сделать вывод о том, что изначально ставится задача предотвращения пожара, которая возлагается на систему предотвращения пожара, а в случае, если такая задача не решена (произошел пожар), то осуществляется работа системы противопожарной защиты. В то же время, не установлены ни цели комплекса организационно-технических мероприятий по обеспечению пожарной безопасности, ни способы его достижения (рис. 2). Однако ранее в ряде документов^{2,3} такие способы формулировались. К их числу относились:

- разработка плана действий администрации, рабочих, служащих и населения на случай возникновения пожара и организации эвакуации людей;

- изготовление и применение средств наглядной агитации по обеспечению пожарной безопасности;

- нормирование численности людей на объекте в соответствии с условиями их безопасности при пожаре;

- и др.

² ГОСТ 12.1.004–85. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования.

³ ГОСТ 12.1.004–91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования.

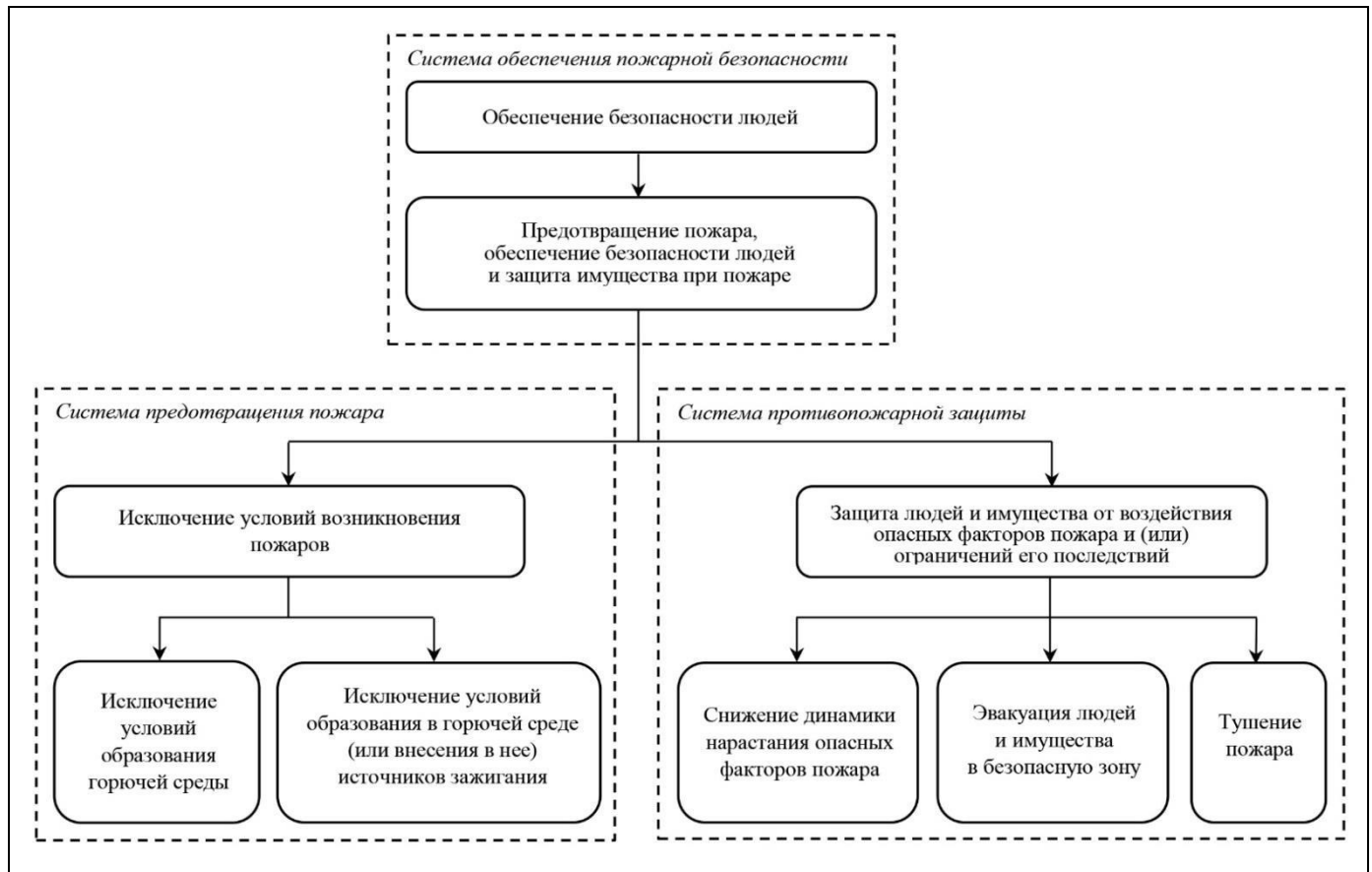


Рис. 2. Дерево целей системы обеспечения пожарной безопасности объекта защиты

Отметим, что подобного рода требования сейчас содержатся в правилах противопожарного режима в Российской Федерации⁴ и представлены в виде списка требований пожарной безопасности, определяющих правила поведения людей, порядок организации производства и (или) содержания территорий, зданий, сооружений, помещений организаций и других объектов защиты в целях обеспечения пожарной безопасности. Тем не менее, цели данного комплекса требований не сформулированы.

Начиная с момента первого введения системы обеспечения пожарной безопасности⁵ в 1977 г. ее структура не претерпела значительных изменений. Из редакции в редакцию происходило уточнение требований к подсистемам. Организационно-техническим мероприятиям в составе системы уделялось очень мало внимания. Происходило изменение критериев оценки функционирования системы, однако количественное значение критерия

оценки не изменялось и составляет $1 \cdot 10^{-6}$. В такой постановке вопроса с учетом того, что руководитель объекта осуществляет управление такой системой и несет персональную ответственность за соблюдение требований пожарной безопасности, необходимо рассмотреть весь процесс государственного регулирования пожарной безопасности и организационную схему управления.

Результаты обобщения проведенного анализа и представленной схемы структуры системы управления пожарной безопасностью объекта (рис. 3) [1] позволяют сделать следующие выводы. Внешняя среда в виде требований федерального законодательства, органов надзора и др. обязывает руководителя объекта осуществлять управление системой пожарной безопасности объекта. Управляемой системой является система обеспечения пожарной безопасности объекта.

В то же время, в классической постановке задачи управления [2] руководитель объекта должен осуществлять соответствующие управляющие воздействия, опираясь на состояние управляемой системы (пожарная безопасность объекта). С точки зрения законодательства оценка состояния управляемой системы характеризуется обязательным

⁴ Постановление Правительства Российской Федерации от 16 сентября 2020 года № 1479 «Об утверждении Правил противопожарного режима в Российской Федерации».

⁵ ГОСТ 12.1.004–76. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования.



Рис. 3. Существующая структура системы управления пожарной безопасностью объекта: ТР – технический регламент; НПА – нормативно-правовые акты; НД – нормативная документация

выполнением требований пожарной безопасности и величиной индивидуального пожарного риска или полным соблюдением всех требований пожарной безопасности. Иными словами, в любой момент времени (так как система является динамической) руководитель должен осуществлять контроль состояния управляемой системы и при необходимости принимать управленческие решения, направленные на приведение ее в соответствующее состояние.

Кроме того, отметим, что руководитель объекта вправе назначить лиц, ответственных за пожарную безопасность в организации⁴. В таком случае формируется организационная структура, ее пример показан на рис. 4.

Так или иначе, руководителю приходится сталкиваться с необходимостью владения обширными знаниями в области пожарной безопасности, так как именно на нем лежит ответственность по обеспечению пожарной безопасности. Традиционно бытует мнение, что обеспечением пожарной безопасности занимается государственный пожарный надзор МЧС России, однако в полномочия ведомства это не входит. Оно осуществляет лишь контроль/надзор за тем, как соблюдаются требования пожарной безопасности. Таким образом, руководитель объекта несет персональную ответственность за пожарную безопасность в организации. Ряд крупных резонансных пожаров последнего десятилетия свидетельствует о том, что в случае, если при пожаре люди погибли или получают травмы, то для руководителя наступает уголовная ответственность. Как правило, руководитель объекта или ли-

цо, назначенное ответственным за пожарную безопасность, обладает лишь поверхностными знаниями о пожарной безопасности, что значительно усугубляет ситуацию. Однако отметим, что в настоящее время ведется работа по установлению квалификационных требований⁶ к лицам, ответственным за пожарную безопасность (в том числе наличие диплома об образовании в области пожарной безопасности), что потенциально может исправить ситуацию.

В то же время, наличие профильного образования не обеспечивает гарантированного результата. В работе [3] проведена оценка надежности специалистов с опытом работы от трех до пяти лет с профильным образованием в области пожарной безопасности. Надежность определялась разницей между выявленным количеством нарушений требований пожарной безопасности и общим их количеством на примере конкретного объекта. Результаты показали, что такой специалист может выявить лишь 16–20 % нарушений от общего числа.

В сложившейся практике обеспечения пожарной безопасности ситуация развивается следующим образом. Руководитель объекта получает (либо после ввода объекта в эксплуатацию, либо при вступлении в должность) объект с уже определенным набором и структурой СОПБ. При ответственном подходе он осуществляет контроль работоспособности систем противопожарной защиты, организует проведение тренировок по эвакуации, периодическое обучение и инструктажи. При безответственном – нет. Причина, по-видимому, кроется даже не в нежелании руководителя управлять пожарной безопасностью объекта, а скорее в невозможности в настоящее время оценить состояние пожарной безопасности для принятия соответствующих решений. Для проверки данного утверждения рассмотрим существующие способы оценки пожарной безопасности объекта.

2. СПОСОБЫ ОЦЕНКИ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТА И БЕЗОПАСНОСТИ ЛЮДЕЙ ВНУТРИ ЗДАНИЯ

2.1. Оценка пожарной безопасности на основании законодательства РФ

В настоящее время в Российской Федерации существует несколько подходов к оценке соответствия объектов требованиям пожарной безопасности. Хотя, строго говоря, необходимо разделять

⁶ Законопроект № 1188754-7 «О внесении изменений в статью 24 и 37 Федерального закона “О пожарной безопасности”».

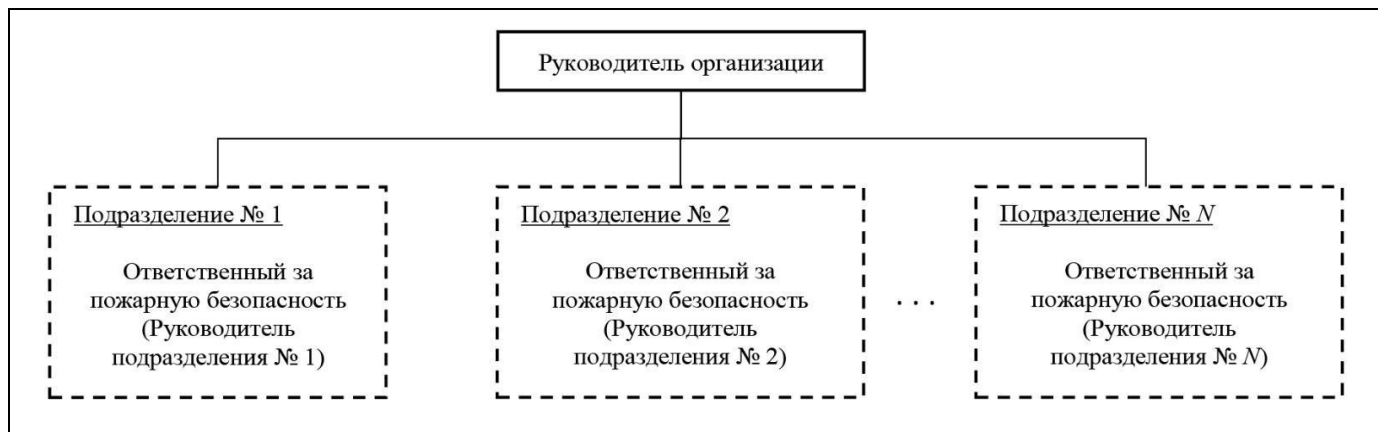


Рис. 4. Организационная структура предприятия с точки зрения пожарной безопасности (N – число структурных подразделений в организации)

пожарную безопасность здания и безопасность людей в случае пожара как наиболее важный ее компонент. Законодательством устанавливаются формы оценки соответствия объектов защиты требованиям пожарной безопасности, к числу которых относятся:

- независимую оценку пожарного риска (аудит пожарной безопасности),
- федеральный государственный пожарный надзор,
- декларирование пожарной безопасности,
- приемку и ввод в эксплуатацию объекта защиты, а также систем пожарной безопасности.

Необходимо уточнить, что указанные формы выбраны только непосредственно для объекта, а не продукции. Если рассматривать среди данных форм те, которые доступны именно руководителю объекта (позиции, которые он может сам инициировать), то к ним можно отнести только независимую оценку пожарного риска (аудит пожарной безопасности). А она, в свою очередь, является коммерческой услугой и предусматривает подтверждение пожарной безопасности объекта специализированной организацией.

Так или иначе, вне зависимости от формы подтверждения для здания существуют два условия соответствия требованиям пожарной безопасности:

- в полном объеме выполнены требования пожарной безопасности технических регламентов и пожарный риск не превышает допустимого значения (для общественных объектов $1 \cdot 10^{-6}$),
- либо
- в полном объеме выполнены требования пожарной безопасности технических регламентов и нормативных документов по пожарной безопасности.

При выполнении одного из условий объект (с точки зрения законодательства) считается безопас-

ным в отношении пожаров. Общим для всех условий является соблюдение требований технических регламентов, которые устанавливают общие обязательные требования пожарной безопасности к противопожарным расстояниям, эвакуационным путям, эвакуационным и аварийным выходам, огнестойкости здания и др. Это, как правило, обобщенные требования, не предписывающие что-либо конкретное (например, значение параметра X для группы объектов Y должно быть не менее Z), а устанавливающие необходимость чего-либо (например, здания класса X должны иметь систему типа Y). Таким образом, данные условия являются скорее предписывающими и подразумевают, что если они выполнены, то объект безопасен в отношении рассматриваемого фактора. Такая форма оценки носит директивный характер. Вторая составная часть условий изменяется и также является директивной. Она устанавливает, что если все нормы выполнены, значит, объект безопасен. Однако более развитым инструментом в этой области является вторая часть первого условия, которая устанавливает, что можно выполнить лишь общие требования, при этом пожарный риск не должен превышать $1 \cdot 10^{-6}$. Оценка пожарного риска в отечественной практике осуществляется на основании соответствующей Методики⁷ определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности (далее Методика), утвержденной МЧС России, как правило, с применением компьютерных программ.

⁷ Приказ МЧС России от 30 июня 2009 г. № 382 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности».

Методика расчета пожарного риска представляет собой набор процедур и их последовательность, который сводится к этапам, показанным на рис. 5.

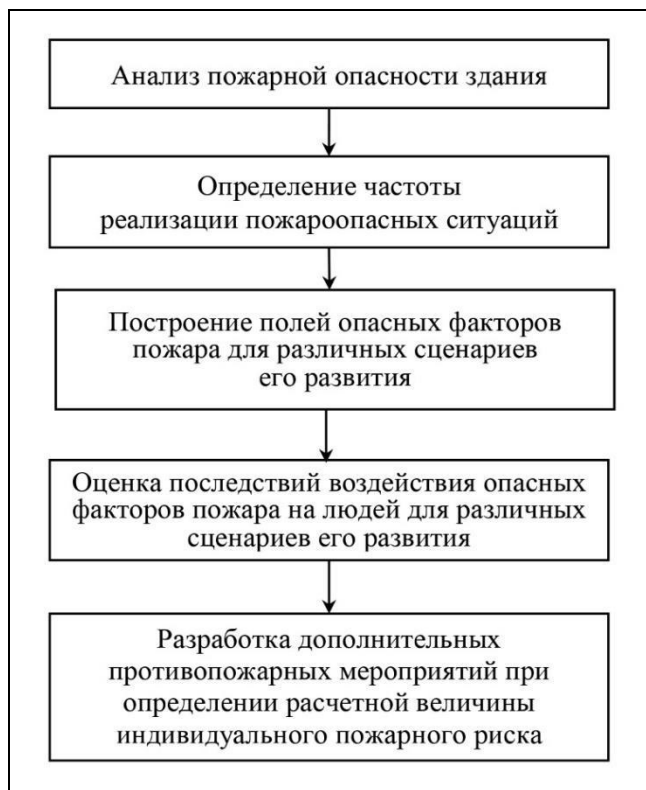


Рис. 5. Этапы оценки пожарного риска

Условие безопасности определяется на основе неравенства

$$Q_{в,i} \leq Q_{в}^н, \quad (1)$$

где $Q_{в,i}$ – расчетная величина индивидуального пожарного риска; $Q_{в}^н$ – нормативная величина индивидуального пожарного риска.

Непосредственно само значение риска вычисляется по формуле

$$Q_{в,i} = Q_{п,i} (1 - K_{ап,i}) P_{пр,i} (1 - P_{э,i}) (1 - K_{пз,i}),$$

где $Q_{в,i}$ – величина индивидуального пожарного риска для i -го сценария пожара; $Q_{п,i}$ – частота возникновения пожара в здании в течение года; $K_{ап,i}$ – коэффициент, учитывающий соответствие установок автоматического пожаротушения требованиям нормативных документов по пожарной безопасности; $P_{пр,i}$ – вероятность присутствия людей в здании; $P_{э,i}$ – вероятность эвакуации людей; $K_{пз,i}$ – коэффициент, учитывающий соответствие системы противопожарной защиты, направленной на обеспечение безопасной эвакуации людей при пожаре, требованиям нормативных документов по пожарной безопасности.

Затем из всех рассчитанных значений $Q_{в,i}$ выбирается максимальное и сравнивается по выражению (1) с нормативным.

Положения Методики неоднократно обсуждались, поэтому рассмотрим лишь некоторые из них.

Ряд исследователей считает, что Методика требует существенной доработки [4], а именно имеет следующие недостатки:

- отсутствие рекомендаций по выбору вероятности возникновения пожара для зданий, для которых она не определена;
- наличие противоречий в выборе значения параметра $P_{пр}$;
- отсутствие данных и условий, на основании которых выбираются вид одежды для человека (от этого зависит площадь проекции в расчетах) и величина пожарной нагрузки (в том числе критерии выбора пожарной нагрузки);
- не определено, сколько рассматривать сценариев и на каких условиях осуществлять выбор блокирования эвакуационного выхода;
- не учитываются такие параметры, как пожарные проезды, противопожарные расстояния, дренчерные завесы, наружное водоснабжение, средства индивидуальной защиты и др.

В качестве направления совершенствования Методики определяются необходимость разработки показателя качества систем противопожарной защиты и дифференцированные значения пожарного риска. В настоящее время величина риска в соответствии с законом⁸ должна подтверждать пожарную безопасность объекта, а не только людей и имущества. А те показатели, которые присутствуют в формуле расчета, позволяют лишь косвенно определить величину риска для людей и имущества. От лица пожарного сообщества (экспертиза, надзорные органы) выражена [4] мысль о том, что в целом пожарный риск является инструментом обоснования отступлений в отношении параметров путей эвакуации и не является показателем безопасности объекта.

Существуют свидетельства [5] того, что нормативная величина индивидуального пожарного риска в нашей стране значительно занижена и требует пересмотра. Подвергаются сомнению переменные, входящие в состав выражения (1), а также их значения и способы определения. Хотя вопрос о приемлемом (нормативном) уровне риска дискуссионный. Как отмечалось ранее [6], пожарный риск для жизни слишком абстрактен, и поэтому его трудно выразить таким образом, чтобы он мог быть понятен обществу и принят им.

⁸ Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 № 123-ФЗ.

В целом, отечественный подход к оценке безопасности людей неоднократно подвергался критике – в частности, в статье [7], где также высказывались предложения в отношении улучшения процедуры оценки безопасности людей в здании. В указанной работе представлены сведения о том, что время реакции существенно влияет на общее время эвакуации, а также перечислены факторы, влияющие на время начала эвакуации. Приводятся свидетельства того, что даже персонал объекта (который постоянно проходит обучение) не всегда ведет себя адекватно при срабатывании системы пожарной сигнализации, ищет подтверждающей информации, не начинает эвакуацию и т. д. Кроме того, приводятся данные о том, что принятие человеком решения о необходимости эвакуации осуществляется в контексте восприятия человеком поступающей информации о наличии признаков пожара и сопоставления совокупности факторов, определяющих вероятность пожара и вероятность правдивости этой информации. Иными словами, человек для принятия решения должен преодолеть определенный порог, в качестве которого выступает соотношение «действительно произошел пожар / ложная тревога». В таком случае задача управления эвакуацией сводится к тому, чтобы приблизить этот порог любыми средствами как можно скорее. В указанной работе предлагается применять корректирующие коэффициенты, которые внесут вклад в величину пожарного риска, например, в случае, если персонал знаком с планом эвакуации. Также высказано утверждение, что методика определения уровня пожарной безопасности завышает расчетное время эвакуации людей при пожаре.

Результаты анализа установленных на государственном уровне подходов к оценке пожарной безопасности здания показали, что в настоящее время необходимо выполнить либо все требования норм пожарной безопасности, либо выполнить обязательные нормы и рассчитать пожарный риск (т. е. оценить индивидуальный риск гибели при пожаре для человека). В то же время процедура расчета такого риска неоднократно подвергалась критике и объективно требует развития.

2.2. Отечественные подходы к оценке пожарного риска

Рассмотрим подходы к оценке пожарной безопасности, разработанные отечественными учеными.

Одним из развивающихся подходов является экспресс-оценка пожарного риска [8–12]. Суть данного подхода заключается в сведении математических моделей, описывающих тот или иной

опасный фактор пожара, к более простому виду (обобщение большого количества расчетных показателей до трех-четырех), который может быть рассчитан любым специалистом с базовой квалификацией, и для этого не требуется наличие специального программного обеспечения, т. е. расчет может быть выполнен в рамках проведения обследования объекта защиты с применением простейших технических устройств (мобильный телефон, калькулятор и др.).

Еще одним способом оценки безопасности объекта является сценарный подход, в рамках которого осуществляется разработка базовых сценариев развития той или иной чрезвычайной ситуации [13]. Для каждого базового сценария выделяются аспекты безопасности, связанные с этим сценарием, где каждому аспекту ставится в соответствие определенное количество факторов, влияющих на данный сценарий. Затем на основе операторного мультиграфа выстраивается взаимосвязь последовательных событий развития той или иной чрезвычайной ситуации и с помощью методов имитационного моделирования осуществляется оценка и прогнозирование ожидаемых последствий рассматриваемой чрезвычайной ситуации. Апробация рассматриваемого подхода проведена на примере станции московского метрополитена [14].

Одним из недостатков данного подхода (с точки зрения обеспечения пожарной безопасности) является существенное упрощение процессов, протекающих при развитии пожара. Так, данный подход не позволяет учитывать динамику развития опасных факторов пожара напрямую, т. е. для ее расчета требуется проведение предварительного моделирования опасных факторов пожара (ОФП) и формирование массива критических значений ОФП в каждой расчетной точке. Некорректно принимаются и данные об эвакуации людей. Например, значение скорости эвакуации определяется как 3 чел./с для здорового человека и 2 чел./с для пострадавших (т. е. линейная на всем участке) [15], при том, что фундаментальной закономерностью в области эвакуации людей является логарифмическая зависимость скорости от плотности людского потока [16, 17], а плотность людского потока формируется геометрическими размерами эвакуационных путей, которые в данном подходе не учитываются. Таким образом, рассматриваемый подход целесообразно применять именно для формирования сценариев развития, а не оценки последствий таких сценариев, по крайней мере с точки зрения пожарной безопасности.

Нельзя не отметить направление, существующее в области механизмов оценки безопасности потенциально опасных объектов [18, 19] на основе



теории активных систем [20]. Для его реализации применяется метод деревьев решений и дальнейшее агрегирование снизу вверх. Основные этапы данного механизма заключаются в выборе направлений, характеризующих состояние объекта, оценке объекта по выбранным направлениям, свертке и получении комплексной оценки состояния объекта. В целом, данный подход является перспективным для применения в области оценки противопожарного состояния ввиду его простоты, эффективности и широкой апробации в различных сферах [21–23].

Ряд исследований [24, 25] посвящен обзору и применению индексных методов оценки пожарного риска, в частности, метода Гретенера. В рассматриваемых работах метод применялся для возможности его адаптации к российским условиям, предварительной оценки пожарной безопасности; анализа вероятности возникновения пожара и др. В целом, не приводится систематизированное описание применения данного метода в таком виде, чтобы можно было оценить его эффективность. Более детально этот метод будет рассмотрен при обзоре зарубежных подходов.

Еще одним способом оценки пожарного риска является подход, в котором развита оценка риска с классической точки зрения как произведение вероятности наступления события и математического ожидания ущерба [26–29]. В частности, рассматривается следующая типизация: риск столкнуться с пожаром, риск погибнуть при пожаре, риск уничтожения строения и др. Таким образом, пожарный риск рассматривается в обобщенном виде, зачастую на стратегическом (с точки зрения масштаба) уровне с позиции математической статистики. Если рассматривать такую оценку непосредственно для объекта защиты, можно получить ожидаемый риск пожара или ущерба, но не его количественную оценку на основе характеристик объекта.

2.3. Зарубежные подходы к оценке пожарной безопасности

Анализ способов оценки пожарной безопасности в зарубежной научной литературе раскрыт значительно шире и глубже. Существуют различные требования, руководства и подходы к оценке пожарного риска.

Регулирование области пожарной безопасности в целом и расчетов риска в частности за рубежом значительно отличается. Лишь базовая часть требований пожарной безопасности устанавливается и

регулируется на государственном уровне. Еще одной особенностью является сам подход, именуемый «проектированием на основе характеристик» (*performance-based design*). Он определяется [30] как «инженерный подход к проектированию противопожарной защиты, основанный на согласованных целях и задачах пожарной безопасности, детерминированном и/или вероятностном анализе сценариев пожара и количественной оценке проектных альтернатив в сопоставлении с целью и задачами пожарной безопасности с применением утвержденных (апробированных) инженерных инструментов, методологий и критериев эффективности».

Рассмотрим регламентированные способы оценки пожарной безопасности путем анализа пожарного риска.

В руководстве сообщества инженеров противопожарной защиты (*Society of Fire Protection Engineers, SFPE*) [31] устанавливаются общие требования к проведению оценки пожарного риска. Оно предназначено для специалистов в области проектирования зданий и технологических процессов. В частности, приведен рекомендуемый процесс оценки, способы идентификации опасностей, источники получения данных и методы моделирования и расчета риска.

В Соединенных Штатах Америки национальной ассоциацией противопожарной защиты (*National Fire Protection Association, NFPA*) разработано руководство по оценке пожарного риска [32], содержащее последовательность действий, которую должен выполнить специалист, проводящий данный анализ. В руководстве представлена хорошо проработанная база методов оценки и анализа риска с указанием входных/выходных данных, допущений и ограничений модели, способов выбора сценариев и т. д.

В Великобритании разработан стандарт по оценке пожарного риска [33], который, как и рассмотренные выше руководства, предоставляет специалисту методологические основы анализа и оценки риска. В отличие от стандартов, рассмотренных выше, в данном документе установлены критерии приемлемости риска и приведены способы оценки финансовых потерь.

Международной организацией по стандартизации (ISO) также разработан стандарт, концептуально описывающий процедуру оценки риска [34]. Документ содержит описание процедуры оценки риска, принципы его оценки, а также методы анализа неопределенностей. Важным отличием этого стандарта является наличие рекомендаций по ин-

терпретации полученных результатов оценки риска.

Интересным фактом является то, что в Германии только начинается процедура регулирования области оценки рисков на законодательном уровне и разрабатывается соответствующий стандарт [35].

Перейдем к рассмотрению методов и подходов, разработанных для оценки пожарного риска.

Hazard and Operability Study (HAZOP) – метод анализа риска, направленный на выявление ситуаций, влекущих за собой отказы каких-либо элементов или системы в целом и позволяющий оценить последствия таких отказов [36]. В целом не используется для решения задачи оценки пожарного риска, однако может быть применен для идентификации пожароопасных элементов здания или пожароопасных процессов.

Failure modes and effects analysis (FMEA) и *Failure mode, effects and criticality analysis (FMECA)* – методы анализа отказов (как правило, технических элементов, без учета человеческого фактора) и последствий таких отказов, а также определения, насколько такой отказ критичен [36]. Данные методы достаточно редко применяются в составе процедуры оценки пожарного риска. Тем не менее, предпринимались попытки [37] адаптации метода FMEA для оценки пожарного риска путем синтеза указанного метода и теории нечеткой логики на примере железнодорожного тоннеля. В результате удалось установить два типа рисков, способствующих возникновению пожара и ведущих к трагическим последствиям.

Event tree analysis (ETA) и *Fault tree analysis (FTA)* – методы анализа деревьев событий и деревьев отказов, направленные на выявление сценариев развития опасных ситуаций и сценариев развития отказов. Для их применения необходимо построить деревья с указанием вероятностей перехода к нисходящему событию. Вероятность итогового события определяется как произведение предшествующих данной ветке вероятностей. Указанные подходы можно отнести как к качественным, так и к количественным методам оценки риска в зависимости от того, присвоены ли вероятности перехода между событиями. Они достаточно часто применяются для решения задачи оценки пожарного риска, как правило, на этапе выявления потенциальных причин, которые могут привести к аварии, или для построения сценариев развития пожаров [38–42]. Кроме того, отметим, что данные методы чаще применяются для оценки пожарного риска на производственных объектах.

Способ *FN-curves* применяется для представления результатов анализа риска, частоты и послед-

ствий и представляет собой построение кривой риска, которая показывает вероятность иметь N или более смертельных случаев в год в зависимости от значения частоты события F в двойном логарифмическом масштабе [43]. Зачастую данная величина применяется при оценке коллективного риска, а не индивидуального, в основном на производственных объектах [44, 45].

As low as reasonably practicable (ALARP) – скорее базовый принцип, чем метод, направленный на снижение риска до уровня настолько низкого, насколько это практически возможно и целесообразно. Изначально данный принцип был сформулирован в 1954 г. Международной комиссией по радиологической защите и активно применялся при обеспечении безопасности атомных электростанций. Действительно, многие специалисты [46–50] сходятся во мнении, что достижение нулевого риска неосуществимо ввиду различного рода неопределенностей, взаимосвязи рисков и др. Для задачи оценки пожарного риска данный принцип применялся редко. Наиболее проработанный материал появился относительно недавно: в работе [49] принцип ALARP применен к оценке пожарного риска и проведена его апробация на примере подбора автоматической установки водяного пожаротушения и определения размера эвакуационного выхода.

Fire Safety Concept Tree (FSCT) – концепция оценки пожарной опасности и ее последствий [51], строящаяся на двух обязательных к исполнению базовых компонентах: предотвращение возгорания и управление последствиями. Как и в методах ETA и FTA, применяется древовидная структура, однако задание вероятностей перехода не осуществляется.

Simple Analysis Fire Risk Evaluation (SAFRE) – подход, основанный на построении деревьев отказов и событий, предназначенный для оценки пожарного риска зданий культурного наследия. Он позволяет определять возможные сценарии развития пожара и проводить анализ вероятных последствий [52].

Метод Гретенера [53, 54] – индексный метод оценки пожарного риска, который получил широкое применение и претерпел множество изменений и вариаций [55–60]. Изначально в качестве меры пожарного риска выступало произведение вероятности события и степени его опасности, а опасность определялась как отношение потенциальной опасности к мерам защиты с помощью следующих выражений [53].

Пожарный риск вычисляется как

$$R = A \times B,$$



где A – вероятность возникновения пожара; B – пожарная опасность, уровень опасности или степень последствий.

Пожарная опасность вычисляется по формуле

$$B = P / (N \times S \times F),$$

где P – потенциальная пожарная опасность; N , S и F – агрегированные показатели, характеризующие соответственно стандартные меры пожарной безопасности, специальные меры пожарной безопасности и огнестойкость здания.

Модель Карлтонского университета [61] – количественный метод оценки пожарного риска, реализованный в компьютерной программе CUrisk. Данный подход разрабатывался преимущественно для зданий с деревянным каркасом. В рамках этого подхода оцениваются следующие параметры:

- сценарии развития пожара (определяются на основе деревьев событий),
- динамика развития ОФП (рассчитывается на основе модели CFAST [62]),
- устойчивость деревянных конструкций (оценивается при огневом воздействии на основе модели WALL2D [63]),
- эвакуация людей (сведения о модели не приводятся),
- действия пожарных подразделений (сведения о модели не приводятся),
- экономический ущерб (сведения о модели не приводятся).

Результатом расчета являются величины ожидаемого риска для жизни (*expected risk to life*, ERL) [64] и ожидаемого риска травмы (*expected risk injury*, ERI) [61], при этом рассматриваются случаи не только летальных исходов, но и получения инвалидности.

Эдинбургская модель оценки рисков – матричный концепт оценки пожарной безопасности здания, разработанный в Эдинбургском университете, в начальной постановке в отношении зданий больниц [65]. Представляет собой иерархически выстроенные матрицы по следующим уровням:

1. Политика пожарной безопасности объекта.
2. Цели (задачи) пожарной безопасности объекта.
3. Стратегия обеспечения пожарной безопасности объекта.
4. Компоненты пожарной безопасности объекта.

Утверждается, что с помощью данного подхода можно оценить пожарную безопасность любого объекта и, в случае необходимости, ввести помимо п. 1–4 дополнительные уровни иерархий, которые детализируют какую-либо составную часть. По

каждому уровню иерархии составляется матрица сравнений факторов пожарной безопасности на каждом уровне. Затем устанавливается связь между уровнями. Это позволяет проследить на системном уровне взаимосвязь компонентов. В настоящее время данный метод все еще развивается [66, 67].

Рассмотренные выше подходы к оценке риска носят, как правило, частный характер и имеют в своей основе тот или иной компонент, который влияет на итоговое значение риска. Перейдем к рассмотрению комплексных подходов, комбинирующих несколько вышеприведенных способов.

Способ оценки пожарного риска *CESARE-Risk* разработан в центре экологии и инженерии рисков Австралии в развитие требований строительных норм Австралии [68] и предназначен для должностных лиц и инженеров при решении задач выбора экономически эффективных мер пожарной безопасности при приемлемом уровне риска. Содержание способа заключается в следующем.

- Формирование дерева событий для разработки сценариев пожара, при формировании которого учитываются текущее состояние здания, вероятность возникновения пожара, характеристика контингента, находящегося в здании, доступность пожарной охраны и др.
- Моделирование развития пожара. В качестве математической основы моделирования применена собственно разработанная модель развития пожара [69].
- Моделирование эвакуации людей, которое включает в себя реакцию людей на оповещение, модель маршрутизации, с учетом того, что люди могут изменить свое направление движения, если на их пути возникнет дым или открытое пламя, а также учитывает нахождение людей в состоянии алкогольного или наркотического опьянения.
- Моделирование действий пожарной охраны: с помощью деревьев событий моделируется прибытие к зданию и развертывание сил и средств исходя из имеющихся ресурсов. Также моделируется, в зависимости от складывающихся условий, тушение, поиск и спасение людей, локализация и ликвидация пожара.
- Моделирование устойчивости элементов здания, в ходе которого прогнозируется разрешение строительных конструкций по времени и наступлению одного из предельных состояний по огнестойкости. Более подробное описание данного способа представлено в публикации [70].

Способ *FiRECAM* разработан для количественной оценки пожарного риска в жилых домах и офисах в соответствии с требованиями пожарной безопасности Канады [71]. В рамках данного под-

хода для каждого сценария пожара рассчитывается ожидаемый риск для жизни людей и ожидаемый ущерб от пожара, на основании которых концепция пожарной безопасности либо принимается, либо перерабатывается. Для данного способа характерны следующие этапы.

- В качестве сценариев развития пожара рассматриваются шесть типов пожаров для каждого этажа: три типа горения (тлеющее горение, пламенное горение в пределах помещения, пламенное горение с выходом за пределы помещения) и два состояния двери (открытая/закрытая). Вероятности возникновения того или иного типа пожара берутся на основе статистических данных. Например, по данным, представленным в работе [72], пожары в зданиях имеют такие особенности развития: 22 % пожаров – тлеющее горение без последующего развития, 54 % пожаров – пламенное горение в пределах помещения, 24 % пожаров – пламенное горение с выходом за пределы помещения.

- Оценка вероятности возникновения пожара применяется, если здание не является типовым и для него отсутствуют данные о частотах возникновения пожаров. Для этого на основе ряда факторов (тип и горючесть материалов, потенциальные источники пожара, обслуживание систем противопожарной защиты и др.) оценивается вероятность возникновения пожара.

- Моделирование развития пожара для оценки времени наступления опасных факторов пожара.

- Моделирование устойчивости элементов здания на основе теплового воздействия для оценки вероятности распространения пожара внутри здания с учетом работоспособности автоматической установки пожаротушения.

- Моделирование эвакуации людей на основе модели [73], которая учитывает время реакции людей, ситуации, когда люди оказались заблокированы внутри здания, и др.

- Моделирование действий пожарной охраны, учитывающее время движения и время реагирования, а также возможность спасения людей, которые оказались заблокированы внутри здания.

- Экономическая оценка затрат на обеспечение пожарной безопасности выполняется для каждого сценария пожара и рассчитывается как произведение вероятности возникновения сценария и ожидаемого размера ущерба.

- Оценка вероятности гибели людей осуществляется путем сопоставления распространения ОФП и их маршрутов движения. Учитываются такие параметры, как наличие рядом балкона, где оказались

заблокированы люди, или пожаробезопасной зоны. Подробное описание представлено в публикации [74].

Способ оценки пожарного риска *CRISP*, основанный на имитационном моделировании и методе Монте-Карло, предназначен для определения условий безопасной эвакуации путем сопоставления времени блокирования путей эвакуации и времени эвакуации. Данный подход менее комплексный, чем ранее представленные, однако более совершенен в сравнении с действующей в Российской Федерации Методикой. В частности, большое внимание уделено стохастичности процессов – учитываются случайные процессы и случайные начальные условия. В ходе многократного моделирования рассчитывается вероятность гибели людей и вероятность их травмирования, значение которой определяется через дробную эффективную дозу (*Fractional effective dose*, FED) [75]. Более подробно этот способ рассмотрен в статье [76].

Еще один способ оценки риска – *Lund QRA* – разработан в Лундском университете, который имеет две версии: стандартную и расширенную. Принципиальное их отличие заключается в учёте случайного характера переменных, поэтому в расширенной версии осуществляется расчет величины риска стандартным способом *Lund QRA* с применением методов Монте-Карло. Для построения сценариев развития пожара применяется дерево событий. Каждый исход в дереве событий имеет набор вероятностей и последствий, именуемый триплетом Каплана и Гаррика. Результаты оценки риска представляются в виде FN-диаграмм или профиля риска на логарифмической диаграмме. В целом риск для человека определяется как «запас безопасности», который в основном сводится к выполнению условий безопасной эвакуации. Наиболее полноценно данный способ описан в публикации [77].

Рассмотрение различных способов оценки пожарной безопасности объекта и безопасности людей внутри здания при пожаре позволяет сделать несколько выводов.

- По форме, установленной законодательством Российской Федерации, проводится оценка соответствия объекта требованиям пожарной безопасности (по данным, приведенным в работе [3], их свыше 100 000). В результате может быть получена оценка пожарного риска, Методика определения которого требует значительной переработки.

- Обзор зарубежных подходов к оценке пожарной безопасности и безопасности людей показал,



что они достаточно сильно развиты и глубоко проработаны. Скорее всего, это связано с отсутствием «сильного» государственного регулирования в области пожарной безопасности.

- Все рассмотренные подходы носят вероятностный характер. Результаты расчета при таком подходе, строго говоря, актуальны только для принятых в них условий и не учитывают динамически изменяющуюся окружающую обстановку.

- Несмотря на весь арсенал подходов в области оценки безопасности, для руководителя объекта эти методы в прямой постановке трудно реализуемы и самостоятельно он их применить не сможет, так как это требует глубоких знаний предмета оценки и наличия соответствующей квалификации и инструментария (компьютерных программ).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение первой части обзора методов оценки пожарной безопасности объекта и безопасности людей внутри здания сформулируем следующие выводы.

- Результаты анализа статистических данных о пожарах в Российской Федерации показали, что число погибших на них людей высоко, а ущерб от пожаров превышает 15 миллиардов рублей ежегодно. Большинство (90 %) людей погибают при пожарах, возникших в результате нарушения правил пожарной безопасности и неосторожного обращения с огнем, что можно трактовать как свидетельство наличия определенных проблем в области управления пожарной безопасностью объекта. Качественный анализ пожаров с массовой гибелью людей подтверждает такой вывод, так как основными причинами возникновения пожара, массовой гибели и травмирования людей является нарушение в области организации и управления пожарной безопасностью объекта.

- В настоящее время система обеспечения пожарной безопасности как таковая отсутствует в понимании как объект управления, так как эта процедура не описана, нет критериев оценки эффективности системы обеспечения пожарной безопасности, руководитель фактически не понимает, чем ему нужно управлять.

- Несмотря на то, что существует большое количество подходов в области оценки безопасности, для их применения необходимо наличие глубоких знаний предмета оценки, а также соответствующей квалификации и инструментария (компьютерных программ). Таким образом, в настоящее время руководитель объекта не в состоянии собственными силами, без привлечения профильных специали-

стов оценить состояние безопасности его организации (объекта).

Во второй части обзора будут рассмотрены способы мониторинга пожарной безопасности объекта, а также методы оценки состояния социально-экономических систем с позиции пожарной безопасности. В заключение будут показаны существующие противоречия в области управления системой обеспечения пожарной безопасности и представлены некоторые способы их решения.

Автор глубоко признателен рецензенту статьи за ценные советы по изложению материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шихалев Д.В. Управленческий аспект в функционировании системы обеспечения пожарной безопасности объекта // Современные проблемы гражданской защиты. – 2021. – № 2. – С. 12–27. [Shikhalev, D.V. The Management Aspect of the Facility's Fire Safety System // Modern Problems of Civil Protection. – 2021. – No. 2. – P. 12–27. (In Russian)]
2. Новиков Д.А. Методология управления. – М.: Либроком, 2011. – 128 с. [Novikov, D.A. Metodologiya upravleniya (Control Methodology). – Moscow: Libracom, 2011. – 128 s. (In Russian)]
3. Козлачков В.И. Проблемы и методы совершенствования подготовки пожарно-профилактических работников: Комплексный подход. – Минск.: Польша, 1991. – 200 с. [Kozlachkov, V.I. Problemy i metody sovershenstvovaniya podgotovki pozharно-profilakticheskikh rabotnikov: Kompleksnyi podkhod (Problems and Methods of Improving the Training of Fire Prevention Workers: A Complex Approach). – Minsk: Polymya, 1991. – 200 s. (In Russian)]
4. Мешалкин Е.А., Бурбах В.А., Вантыакшев Н.Н. О применении методик расчетов по оценке пожарных рисков // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – № 2. – С. 23–31. [Meshalkin, E.A., Burbakh, V.A., Vant'yakshv, N.N. Usage of Methods of Calculation for Estimation of Fire Risks // Fire and Explosion Safety. – 2015. – No. 2. – P. 23–31. (In Russian)]
5. Фирсов А.В. Модели и алгоритмы обоснования величины индивидуального пожарного риска для управления безопасностью людей в зданиях и сооружениях: дис. канд. техн. наук. – М.: 2013. – 296 с. [Firsov, A.V. Modeli i algoritmy obosnovaniya velichiny individual'nogo pozharnogo riska dlya upravleniya bezopasnost'yu lyudei v zdaniyakh i sooruzheniyakh (Models and Algorithms for Substantiating the Value of Individual Fire Risk for Managing the Safety of People in Buildings and Structures): dissertation of the candidate of technical sciences. – Moscow: 2013. – 296 s. (In Russian)]
6. Bukowski, R.W. Risk and Performance Standards. – NIST: USA, 1996.
7. Самошин Д.А. Расчет времени эвакуации людей: проблемы и перспективы // Пожаровзрывобезопасность. – 2004. – № 1. – С. 33–46. [Samoshin, D.A. Raschet vremeni ehvakuatsii lyudei: problemy i perspektivy (Calculation of the Time of Evacuation of People: Problems and Prospects). // Fire and Explosion Safety. – 2004. – No. 1. – P. 33–46. (In Russian)]
8. Хохлова А.Ю. Экспресс-оценка пожарных рисков при осуществлении государственного пожарного надзора: дис. канд. техн. наук. – М.: 1998. – 190 с. [Hohlova, A.Yu. Ehkspress-otsenka pozharnykh riskov pri osushchestvlenii

- gosudarstvennogo pozharnogo nadzora (Rapid Assessment of Fire Risks in the Implementation of State Fire Supervision): dissertation of the candidate of technical sciences. – Moscow: 1998. – 190 s. (In Russian)]
9. *Лобаев И.А.* Экспресс-оценка пожарных рисков при изменении функционального назначения зданий: дис. канд. техн. наук. – М.: 1999. – 187 с. [*Lobaev, I.A.* Ehkspress-otsenka pozharnykh riskov pri izmenenii funktsional'nogo naznacheniya zdaniy (Rapid assessment of fire risks when changing the functional purpose of buildings): dissertation of the candidate of technical sciences. – Moscow: 1999. – 187 s. (In Russian)]
 10. *Андреев А.О.* Разработка метода оперативной обработки информации при использовании первичных средств пожаротушения: дис. канд. техн. наук. – М.: 2005. – 277 с. [*Andreev, A.O.* Razrabotka metoda operativnoi obrabotki informatsii pri ispol'zovanii pervichnykh sredstv pozharotusheniya (Development of a Method for Operational Information Processing When Using Primary Fire Extinguishing Equipment): dissertation of the candidate of technical sciences. – Moscow: 2005. – 277 s. (In Russian)]
 11. *Ягодка Е.И.* Поддержка принятия управленческих решений о соответствии объекта защиты обязательным требованиям пожарной безопасности: дис. канд. техн. наук. – М.: 2014. – 250 с. [*Yagodka, E.I.* Podderzhka prinyatiya upravlencheskikh reshenii o sootvetstvii ob"ekta zashchity obyazatel'nykh trebovaniyam pozharnoi bezopasnosti (Support for Making Management Decisions on the Compliance of the Protected Object with Mandatory Fire Safety Requirements): dissertation of the candidate of technical sciences. – Moscow: 2014. – 250 s. (In Russian)]
 12. *Вечтомов Д.А.* Информационно-аналитическая система поддержки принятия управленческих решений в процессе мониторинга требований пожарной безопасности: дис. канд. техн. наук. – М.: 2014. – 310 с. [*Vechtomov, D.A.* Informatsionno-analiticheskaya sistema podderzhki prinyatiya upravlencheskikh reshenii v protsesse monitoringa trebovaniy pozharnoi bezopasnosti (Information and Analytical System for Support of Managerial Decision-Making in the Process of Monitoring Fire Safety Requirements): dissertation of the candidate of technical sciences. – Moscow: 2014. – 310 s. (In Russian)]
 13. *Кульба В.В., Шульц В.Л., Шелков А.Б., Чернов И.В.* Методы и механизмы планирования и управления в условиях чрезвычайных ситуаций // Тренды и управление. – 2013. – № 2. – С. 134–155. [*Kulba, V.V., Shulc, V.L., Shelkov, A.B., Chernov, I.V.* Metody i mekhanizmy planirovaniya i upravleniya v usloviyakh chrezvychainykh situatsii (Methods and Mechanisms of Planning and Management in Emergency Situations) // Trends and Management. – 2013. – No. 2. – P. 134–155. (In Russian)]
 14. *Шульц В.Л., Кульба В.В., Шелков А.Б., Чернов И.В.* Методы планирования и управления техногенной безопасностью на основе сценарного подхода // Национальная безопасность. – 2013. – № 2. – С. 198–216. [*Shulc, V.L., Kulba, V.V., Shelkov, A.B., Chernov, I.V.* Metody planirovaniya i upravleniya tekhnogennoi bezopasnost'yu na osnove stsenarnogo podkhoda (Methods for Planning and Managing Technogenic Safety Based on a Scenario Approach) // National Security. – 2013. – No. 2. – P. 198–216. (In Russian)]
 15. *Кульба В.В., Чернов И.В.* О методологических подходах к сценарному анализу сложных систем // Материалы международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2012». – 2012. – С. 82–87. [*Kulba, V.V., Chernov, I.V.* O metodologicheskikh podkhodakh k stsenarnomu analizu slozhnykh sistem (On Methodological Approaches to Scenario Analysis of Complex Systems) // Proceedings of the International Conference «Managing of Large-Scale System Development (MLSD 2012)». – 2012. – P. 82–87. (In Russian)]
 16. *Холщевников В.В., Самошин Д.А., Парфененко А.В., Кудрин И.С.* и др. Эвакуация и поведение людей при пожарах. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. – 262 с. [*Kholshchevnikov, V.V., Samoshin, D.A., Parfenenko, A.V., Kudrin, I.S., et al.* Evakuatsiya i povedenie lyudei pri pozharakh (Evacuation and Behavior of People in Case of Fires). – Moscow: State Fire Academy of EMERCOM of Russia, 2015. – 262 s. (In Russian)]
 17. *Zhang J.* Pedestrian Fundamental Diagrams: Comparative Analysis of Experiments in Different Geometries. PhD thesis. – Forschungszentrum Jülich, 2012.
 18. *Капашин В.П., Толстых А.В., Бурков В.Н., Назаров А.В.* Промышленная безопасность особо опасных химических объектов. – М.: ИПУ РАН, 2009. – 238 с. [*Kapashin, V.P., Tolstih, A.V., Burkov, V.N., Nazarov, A.V.* Promyshlennaya bezopasnost' osobo opasnykh khimicheskikh ob"ektov (Industrial Safety of Highly Hazardous Chemical Facilities). – Moscow: Institute of Control Sciences of Russian Academy of Science, 2009. – 238 s. (In Russian)]
 19. *Титаренко Б.П., Бурков В.Н.* Оценка эффективности механизмов управления риском чрезвычайных ситуаций // Вестник МГСУ. – 2017. – № 5. – С. 581–585. [*Titarenko, B.P., Burkov, V.N.* Otsenka ehffektivnosti mekhanizmov upravleniya riskom chrezvychainykh situatsii (Evaluating the Effectiveness of Emergency Risk Management Mechanisms) // Vestnik MGSU. – 2017. – No. 5. – P. 581–585. (In Russian)]
 20. *Бурков В.Н., Новиков Д.А.* Теория активных систем: состояние и перспективы. – М.: Синтег, 1999. – 128 с. [*Burkov, V.N., Novikov, D.A.* Teoriya aktivnykh sistem: sostoyanie i perspektivy (Active Systems Theory: State and Prospects). – Moscow: Sinteg, 1999. – 128 s. (In Russian)]
 21. *Кондратьев В.Д., Щенкин А.В.* Комплексное оценивание в области безопасности дорожного движения. – М.: ИПУ РАН, 2002. – 51 с. [*Kondratiev, V.D., Shepkin, A.V.* Kompleksnoe otsenivanie v oblasti bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya (Comprehensive Road Safety Assessment). – Moscow: Institute of Control Sciences of Russian Academy of Science, 2002. – 51 s. (In Russian)]
 22. *Семенов И.Б., Чижов С.А., Полянский С.В.* Комплексное оценивание в задачах управления системами социально-экономического типа. – М.: ИПУ РАН, 1996. – 48 с. [*Semenov, I.B., Chizov, S.A., Polyanskiy, S.V.* Kompleksnoe otsenivanie v zadachakh upravleniya sistemami sotsial'no-ehkonomicheskogo tipa (Comprehensive Assessment in the Problems of Managing Systems of a Socio-Economic Type). – Moscow: Institute of Control Sciences of Russian Academy of Science, 1996. – 48 s. (In Russian)]
 23. *Андронникова Н.Г., Бурков В.Н., Леонтьев С.В.* Комплексное оценивание в задачах регионального управления. – М.: ИПУ РАН, 2002. – 58 с. [*Andronnikova, N.G., Burkov, V.N., Leontiev, S.V.* Kompleksnoe otsenivanie v zadachakh regional'nogo upravleniya (Comprehensive Assessment in the Tasks of Regional Management). – Moscow: Institute of Control Sciences of Russian Academy of Science, 2002. – 58 s. (In Russian)]
 24. *Членов А.Н., Демехин Ф.И.* Метод оценки влияния качества пожарной сигнализации на эффективность автоматизированной системы противопожарной защиты промышленного предприятия // Технологии техносферной безопасности. – 2008. – № 5. – С. 1–3. [*Chlenov, A.N., Demehin, F.I.* Metod otsenki vliyaniya kachestva pozharnoi signalizatsii na ehffektivnost' avtomatizirovannoi sistemy protivopozharnoi zashchity promyshlennogo predpriyatiya (Method for Assessing the Impact of the Quality of Fire Alarm on the Effectiveness of an Au-



- tomated Fire Protection System of an Industrial Enterprise) // Technology of Technosphere safety. – 2008. – No. 5. – P. 1–3. (In Russian)]
25. Якуш С.Е., Эсманский Р.К. Анализ пожарных рисков. Часть I: Подходы и методы // Проблемы анализа риска. – 2009. – № 3. – С. 8–25. [Yakush, S.E., Esmanskii, R.K. Analiz pozharnykh riskov. Chast' I: Podkhody i metody (Fire Risk Analysis. Part I: Approaches and Methods) // Issues of Risk Analysis. – 2009. – No. 3. – P. 8–25. (In Russian)]
 26. Пожарные риски. Выпуск 1. Основные понятия / под ред. Н.Н. Брушлинского. – М.: НАНПБ, 2004. – 47 с. [Pozharnye riski. Vypusk 1. Osnovnyye ponyatiya / pod red. N.N. Brushlinskogo. – M.: NANPB, 2004. – 47 s. (In Russian)]
 27. Брушлинский Н.Н., Глуховенко Ю.М. Оценка рисков пожаров и катастроф // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 1992. – № 1. – С. 13–18. [Brushlinskii, N.N., Gluhovenko, Yu.M. Otsenka riskov pozharov i katastrof (Assessment of the Risks of Fires and Disasters) // Safety and Emergency Issues. – 1992. – No. 1. – P. 13–18. (In Russian)]
 28. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В. О статистике пожаров и о пожарных рисках // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – № 4. – С. 40–48. [Brushlinskii, N.N., Sokolo, S.V. O statistike pozharov i o pozharnykh riskakh (About Fire Statistics and Fire Risks) // Fire and Explosion Safety. – 2011. – No. 4. – P. 40–48. (In Russian)]
 29. Брушлинский Н.Н., Присяжнюк Н.Л., Слеув В.И. О взаимосвязи пожарных рисков // Пожаровзрывобезопасность. – 2008. – № 1. – С. 9–13. [Brushlinskii, N.N., Prisyaznyuk, N.L., Sluev, V.I. O vzaimosvyazi pozharnykh riskov (On the Relationship of Fire Risks) // Fire and Emergencies: Prevention, Elimination. – 2008. – No. 1. – P. 9–13. (In Russian)]
 30. SFPE Engineering Guide to Performance-Based Fire Protection / by Richard L. P. Custer. – Quincy: NFPA, 2006. – 260 s.
 31. SFPE Engineering Guide: Fire Risk Assessment / by Michael J. Madden. – Bethesda: SFPE, 2006. – 115 s.
 32. NFPA 551: Guide for the Evaluation of Fire Risk Assessments / by Ashari Luqman. – Quincy: NFPA, 2004. – 119 s.
 33. BS 7974-7: Part 7 – Probabilistic Risk Assessment / London: British Standards Institute, 2003. – 59 s.
 34. ISO/PDTS 16732: Fire Safety Engineering – Guidance on Fire Risk Assessment. – Geneva: ISO, 2004. – 45 s.
 35. DIN 18009-2: Fire Safety Engineering – Evacuation and Life Safety. – Berlin: Standard, 2015. – 29 s.
 36. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. – New York: American Institute of Chemical Engineers, 1985.
 37. Nezhad H.S, Zivdar H, Amirnia A. Assessment of Fire Risk in Passenger Trains in Tunnels Using the FMEA Model and Fuzzy Theory: A Case Study in the Zagros Railway // Special Issue of Current World Environment. – 2015. – No. 10. – P. 1158–1170.
 38. Hosseini, N., Givehchi, S., Maknoon, R. Cost-Based Fire Risk Assessment in Natural Gas Industry by Means of Fuzzy FTA and ETA // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2020. – No. 60.
 39. Wang, D., Zhang, P., Chen, L. Fuzzy Fault Tree Analysis for Fire and Explosion of Crude Oil Tanks // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2013. – No. 26. – P. 1390–1398.
 40. Akbar, T. A., Aab, D., Baheramayah, A., Prastyasari, F.I. Risk Assessment on Liquefied Petroleum Gas (LPG) Handling Facility, Case Study: Terminal LPG Semarang // Materials Science and Engineering. – 2019. – No. 588.
 41. Wen-hui, J. Study on Fire Risk and Disaster Reducing Factors of Cotton Logistics Warehouse Based on Event and Fault Tree Analysis // Procedia Engineering. – 2016. – No. 135. – P. 418–426.
 42. MacLeod, J., Tan, S., Moinuddin, K. Reliability of Fire (Point) Detection System in Office Buildings in Australia: A Fault Tree Analysis // Fire Safety Journal. – 2020. – No. 115. – Art. no. 103150.
 43. Farmer, F.R. Siting Criteria: A New Approach // IAEA Symposium on the Containment and Siting of Nuclear Power Reactors. – Austria, 1996. – P. 303–324
 44. Трусова Т.С., Конорев Д.В. Пожарный риск как мера возможности реализации пожарной опасности // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2018. – № 9. – С. 899–902. [Trusova, T.S., Konarev, D.V. Pozharnyi risk kak mera vozmozhnosti realizatsii pozharnoi opasnosti (Fire Risk as a Measure of the Possibility of Realizing a Fire Hazard) // Fire Safety: Problems and Prospects. – 2018. – No. 9. – P. 899–902. (In Russian)]
 45. Гордиенко Д.М. Пожарная безопасность особо опасных и технически сложных производственных объектов нефтегазового комплекса: дис. докт. техн. наук. – М.: 2017. – 386 с. [Gordienko, D.M. Pozharnaya bezopasnost' osobo opasnykh i tekhnicheskii slozhnykh proizvodstvennykh ob"ektov neftegazovogo kompleksa (Fire Safety of Highly Hazardous and Technically Complex Production Facilities of the Oil and Gas Complex): dissertation of the doctor of technical sciences. – Moscow: 2017. – 386 s. (In Russian)]
 46. Fischer, K. Societal Decision-Making for Optimal Fire Safety. Doctoral dissertation. – ETH Zurich, Switzerland, 2014.
 47. Meacham, B.J., Charters, D., Johnson, P., Salisbury, M. Building Fire Risk Analysis // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. – 2016. – P. 2941–2991.
 48. Watts, J.M., Hall, J.R. Building Fire Risk Analysis // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. – 2016. – P. 2817–2826.
 49. Hadjisophocleous, G.V., Fu, Z. Literature Review of Fire Risk Assessment Methodologies // International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes. – 2004. – No. 1. – P. 28–45.
 50. Van Coile, R., Jomaas, G., Bisby, L. Defining ALARP for Fire Safety Engineering Design via the Life Quality Index // Fire Safety Journal. – 2019. – No. 107. – P. 1–14.
 51. NFPA 550: Guide to the Fire Safety Concepts Tree / by Ashari Luqman. – Quincy: NFPA, 2002. – 142 s.
 52. Watts, M., Rosenbaum, E.R. Fire Risk Assessment for Cultural Heritage // 9th International Fire Science and Engineering Conference. – 2001. – P. 203.
 53. Gretener, M. Evaluation of Fire Hazard and Determining Protective Measures. – Zurich: Association of Cantonal Institutions for Fire Insurance (VKF) and Fire Prevention Service for Industry and Trade (BVD), 1973.
 54. Gretener, M. Fire Risk Evaluation. – Zurich: Association of Cantonal Institutions for Fire Insurance (VKF) and Fire Prevention Service for Industry and Trade (BVD), 1980.
 55. Fontana, M. Swiss Rapid Risk Assessment Method. – Zurich: ETH, 1984.
 56. Brzezinska, D., Bryant, P., Markowski, A.S. An Alternative Evaluation and Indicating Methodology for Sustainable Fire Safety in the Process Industry // Sustainability. – 2019. – No. 11. – P. 1–15.
 57. Kaiser, J. Experiences of the Gretener Method // Fire Safety Journal. – 1980. – No. 2. – P. 213–222.
 58. Теребнев В.В., Грачев В.А. Оперативно-тактические задачи: Часть I. – Екб.: Калан, 2010. – 406 с. [Terebnev, V.V., Grachev, V.A. Operativno-takticheskie zadachi: Chast' I (Operational and Tactical Tasks: Part I). – Ekaterinburg: Kalan, 2010. – 406 s. (In Russian)]
 59. Hultquist, H. Evaluation of a Fire Risk Index Method for Multistorey Apartment Buildings. – Lund University: Sweden, 2000.
 60. De Smet, E. Theoretical Basis and Technical Reference Guide: Fire Risk Assessment Method for Engineering – FRAME 2008 / Belgium: FRAME, 2008. – 108 s.

61. *Hadjisophocleous, G.V., Fu, Z.* Development and Case Study of a Risk Assessment Model CURisk for Building Fires // *Fire Safety Science*. – 2005. – No. 8. – P. 887–887.
62. *Jones, W.W., Forney, G.P.* Improvement in Predicting Smoke Movement in Compartment Structures // *Fire Safety Journal*. – 1993. – No. 4. – P. 269–297.
63. *Takeda, H., Mehaffey, J.R.* WALL2D: A Model for Predicting Heat Transfer Through Wood-Stud Walls Exposed to Fire // *Fire and Materials*. – 1998. – No. 22. – P. 133–140.
64. *Beck, V.R.* Fire Safety System Design using Risk Assessment Models: Developments in Australia // *Proceedings of the 3rd International Symposium, International Association for Fire Safety Science*. – 1991. – P. 45–59.
65. *Marchant, E.W.* Fire Safety Evaluation (Points) Scheme for Patient Areas Within Hospitals. – University of Edinburgh: Scotland, 1982.
66. *Shields, T.J., Silcock, G.W.* An Application of the Analytic Hierarchical Process to Fire Engineering // *Fire Safety Journal*. – 1986. – No. 11. – P. 235–242.
67. *Donegan, H.A., Shields, T.J., Silcock, G.W.* A Mathematical Strategy to Relate Fire Safety Evaluation and Fire Safety Policy Formation for Buildings // *Proceedings of the Second International Symposium*. – 1989. – P. 433–441.
68. *Performance-Based Building Code of Australia*. – Canberra: Australian Building Codes Board, 1996. – 98 s.
69. *Takeda, H., Yung, D.* Simplified Fire Growth Models for Risk-Cost Assessment in Apartment Buildings // *Journal of Fire Protection Engineering*. – 1992. – No. 2. – P. 53–66.
70. *Beck, V.R.* Performance-Based Fire Engineering Design and Its Application in Australia // *Proceedings of the Fifth International Symposium on Fire Safety Science*. – 1997. – P. 23.
71. *Yung, D., Beck, V.R.* Building Fire Safety Risk Analysis // *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. – 1995. – P. 5–95.
72. *Gaskin, J., Yung, D.* Canadian and U.S.A. Fire Statistics for Use in the Risk-Cost Assessment Model. – National Research Council Canada: Canada, 1993.
73. *Proulx, G., Hadjisophocleous, G.V.* Occupant Response Model: A Sub-model for the NRCC Risk-Cost Assessment // *Proceedings of the 4th International Symposium on Fire Safety Science*. – 1994. – P. 841.
74. *Yung, D., Hadjisophocleous, G.V., Proulx, G.* Modelling Concepts for the Risk-Cost Assessment Model FiRECAM and Its Application to a Canadian Government Office Building // *Proceedings of the Fifth International Symposium on Fire Safety Science*. – 1997. – P. 619.
75. *Hartzell, G.E., Emmons, H.W.* The Fractional Effective Dose Model for Assessment of Toxic Hazards in Fires // *Journal of Fire Sciences*. – 1988. – No. 5. – P. 356–362.
76. *Fraser-Mitchell, J.N.* Modelling Human Behaviour within the Fire Risk Assessment Tool CRISP // *Fire and Materials*. – 1999. – No. 6. – P. 349–355.
77. *Frantzych, H.* Uncertainty and Risk Analysis in Fire Safety Engineering. – Lund University: Sweden, 1998.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии
В.В. Кульбой.*

*Поступила в редакцию 19.07.2021,
после доработки 1.11.2021.
Принята к публикации 22.11.2021.*

Шихалев Денис Владимирович – канд. техн. наук, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва,
✉ evacsystem@gmail.com.

PROBLEMS OF MANAGING THE FIRE SAFETY SYSTEM OF A FACILITY. PART I: ASSESSMENT METHODS

D.V. Shikhalev

The State Fire Academy, the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM), Moscow, Russia

✉ evacsystem@gmail.com

Abstract. The scope and capabilities of managing the fire safety system of a facility from the position of its representative (head) are overviewed. Part I of the survey is devoted to the general problem statement and methods to assess the fire safety of a facility and the safety of people inside a building. As shown, fires and deaths of people testify to certain problems either in the facility's fire safety system or in the management of such a system. The existing methods for assessing the fire safety of a facility cannot be applied by its head: they require deep knowledge of the subject matter as well as the corresponding qualifications and tools (computer programs). In the current situation, the head (decision-maker) has no formalized objective assessment of the fire safety of his organization at a particular time, which significantly complicates (or even disables) rational decision-making.

Keywords: fire safety, management, facility assessment, fire safety system, fire risk.

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМИ ЦИКЛАМИ СЛОЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ, ОБЪЕКТОВ, СИСТЕМ

М.В. Белов

Аннотация. Рассмотрена проблема принятия оптимальных решений в ходе управления жизненными циклами сложных изделий аэрокосмической, энергетической, ядерной, транспортной и другой сложной техники, капитальных объектов и систем энергетики, телекоммуникаций, транспорта, сельского хозяйства, сырьевых и других отраслей, а также информационно-технологических систем. Проанализированы и выделены общесистемные особенности жизненных циклов сложных изделий, объектов, систем. Предложены качественные формализмы представления жизненных циклов, сформулированы математические основания задачи оптимального управления ими. Поставлена математически строгая задача оптимального управления жизненными циклами сложных изделий, объектов, систем. Разработано алгоритмическое решение задачи оптимального управления, основанное на формализмах динамического программирования. Предложен практический способ применения алгоритма решения задачи, основанный на сценарном подходе, перечислены условия оптимизации управления жизненными циклами – условия, при которых оптимизация возможна. Представленные результаты фактически формируют инструмент оптимального управления жизненными циклами сложных изделий, объектов, систем.

Ключевые слова: оптимальное управление; динамическое программирование; жизненные циклы сложных изделий, объектов, систем.

ВВЕДЕНИЕ: АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМИ ЦИКЛАМИ И ОБЪЕКТИВНЫЕ ФАКТОРЫ, ЗАТРУДНЯЮЩИЕ ЕЁ РЕШЕНИЕ

Концепция *жизненных циклов сложных изделий, объектов, систем*¹ (ЖЦИ) в настоящее время, являясь основополагающей в системотехнике [1, 2], широко распространена в практике управления созданием и применением изделий и систем аэрокосмической и оборонной отраслей, объектов и систем ядерной, нефтегазовой, энергетической, транспортной, коммуникационной и других обрабатывающих, сырьевых и сервисных индустрий, а также в сфере информационных технологий.

Однако, несмотря на широкое распространение концепции ЖЦИ, формальные основы управления ЖЦИ до сих пор не сформулированы: отсутствуют строго определённые критерии, позволившие бы сравнивать те или иные подходы, выбирать

наилучшие из них, согласовывать и интегрировать междисциплинарные решения, не говоря уже о том, что проблема управления ЖЦИ даже не поставлена как математическая задача управления. Причиной этого является высокая сложность и разнородность процессов управления ЖЦИ, вызванная сложностью самих Изделий, неопределённостью и изменчивостью внешних по отношению к ЖЦИ факторов.

Жизненный цикл является комплексной системой, а потому – предметом исследования различных областей знаний. В каждой из них разработаны модели, позволяющие изучать отдельные аспекты ЖЦИ с той или иной степенью строгости, и наличие разнородных моделей требует обоснованного выбора подходов к формированию интегральных количественных моделей ЖЦИ.

Управление комплексными системами изучается прежде всего кибернетикой и теорией систем [3, 4], а управление жизненными циклами – системотехникой [1, 5–9]. Но результаты, полученные в этих отраслях, носят, как правило, качественный характер, а модели математической теории систем [7] не позволяют ставить и решать оптимизационные задачи.

¹ В дальнейшем для краткости предмет жизненного цикла (изделия, объекты, системы) будем единообразно именовать Изделием с заглавной буквы.

Весьма популярной является также тема оценивания затрат в течение всего жизненного цикла создаваемой системы или изделия (см., например, работы [10, 11]). В последние годы для формирования таких оценок применяются нейронные сети, машинное обучение и другие современные подходы (см., например, работы [12–16]). Оценивание стоимости промышленных программ исследуется ведущими западными фирмами (см., например, работу [17]) и регламентируется нормативными документами различных правительственных организаций (например, Национальное аэрокосмическое агентство США [18], Офис контроля государственных расходов США [19]).

Значительное количество исследований посвящено математическим моделям поведения систем, состоящих из множества взаимосвязанных элементов, примером которой является ЖЦИ: мультиагентных систем [20–23]; взаимодействующих процессов и систем [24–27]; собственно систем, моделированию их поведения и свойств методами системного моделирования [8, 28]; различных сетевых структур (см., например, работу [29]), в частности, с помощью аппарата теории графов (см. обзоры в работах [29, 30]), управления проектами и программами [31–33]; стохастических сетей и их приложений в областях транспорта, электросетей, логистики и производства [34]; фирм (см., например, обзорную работу [35] и библиографию к ней), организаций и организационных структур ([36–38]).

Но несмотря на значительное количество созданных и проверенных практикой моделей, подходов и стандартов, прежде всего системно-инженерных, отсутствие формальных оснований существенно затрудняет управление ЖЦИ в целом, а также согласование и интеграцию результатов принятия конструкторских, технологических, экономических, организационных и других решений. Вместе с тем важность управления ЖЦИ делает актуальной проблему определения формальных оснований, разработку адекватных моделей и методов управления ЖЦИ.

Далее сформированы такие основания: проблема управления ЖЦИ формализована как математическая задача оптимального управления и предложены подходы к её решению. Использование математических формализмов обеспечивает максимально возможный уровень строгости сформулированных оснований вследствие наиболее абстрактного и формального аппарата математики среди всех областей знаний.

Будучи системой, ЖЦИ требует при исследовании системного подхода и применения принципа холизма, поэтому оптимизационная задача ставится как единая, целостная проблема, охватывающая все аспекты ЖЦИ. Мультидисциплинарность ЖЦИ затрудняет формирование такой единой постановки, и традиционным практическим подходом является моделирование и оптимизация отдельных видов и/или компонентов ЖЦИ. Это характерно, например, для исследования операций и смежных дисциплин. Однако из оптимальности частей не следует оптимальность целого. Поэтому формирование единой постановки оптимизационной задачи является принципиально важным, при этом остаётся корректной её последующая декомпозиция «сверху вниз» для решения с помощью различных математических методов на соответствующих уровнях иерархии.

1. КАЧЕСТВЕННОЕ ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМИ ЦИКЛАМИ СЛОЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ, ОБЪЕКТОВ, СИСТЕМ

Рассмотрим проблему управления жизненным циклом сложного Изделия, для этого введём ряд уточнений и определений, опираясь на общепринятые подходы, методы и стандарты.

Зафиксируем, что задачу будем решать применительно к изделиям аэрокосмической, энергетической, ядерной, транспортной и другой сложной техники, капитальным объектам и системам энергетики, телекоммуникаций, транспорта, сельского хозяйства, розничной торговли, сырьевых и других отраслей, а также информационно-технологическим системам.

Жизненный цикл Изделия будем понимать (следуя международным и российским стандартам [1, 2, 6]) как совокупность явлений и процессов, повторяющуюся с периодичностью, определяемой временем существования типовой конструкции Изделия от её замысла до утилизации или конкретного экземпляра Изделия от момента завершения его создания до утилизации.

Используем определения ([5, 39]) *проекта* как комплекса взаимосвязанных мероприятий, направленных на создание уникального продукта или услуги в условиях временных и ресурсных ограничений; а *проектной программы* – как совокупности взаимосвязанных проектов и другой деятельности, направленных на достижение общей цели и



реализуемых в условиях общих ограничений. На практике ЖЦИ обычно реализуется как проектная программа – как комплекс взаимосвязанных и скоординированных по срокам и ресурсам проектов и иных видов хозяйственной деятельности, объединенных одним типом Изделия (или экземпляром), включая его модернизацию и/или модификацию, а также всеми этапами его жизненного цикла и направленными на его разработку и/или производство и/или сопровождение эксплуатации в целях удовлетворения требований потребителей и получения положительного экономического результата. ЖЦИ представляет собой частный случай *комплексной деятельности*² (КД) [41], выполняемой сложным субъектом – *расширенным предприятием* (РП) [41] – системой автономных, но взаимодействующих фирм-предприятий, которые объединены единой структурой целей и единой технологией функционирования, при этом технологическую и бизнес-координацию осуществляет головное предприятие.

При этом программа ЖЦИ³ фактически состоит из нескольких взаимосвязанных направлений деятельности, реализуемых расширенным предприятием (рис. 1):

- Создание и преобразования информационной модели (ИМ) Изделия вместе с ИМ расширенного предприятия. Это выполняется в ходе проектирования (концептуального, эскизного, рабочего и т. д.) Изделия, а также проектирования РП. Последующие модернизации снова включают в себя работы по проектированию Изделия и, при необходимости, РП.

- Создание, эксплуатация, модернизация и прекращение/завершение существования непосредственно самого расширенного предприятия.

- Создание, эксплуатация, модернизация и утилизация непосредственно самого Изделия.

Разработка концепции и проектирование (см. рис. 1) заключаются в создании и преобразовании описаний Изделия и расширенного предприятия в виде текстовых документов, чертежей, схем и в

других форматах, причём как в форме считавшихся традиционными бумажных документов, так и компьютерных данных (CAD, PDM и других инженерных платформ, а также ERP, CRM и прочих видов корпоративных систем управления). Кроме этого, разрабатываются и используются для принятия инженерных и управленческих решений различные расчётные модели, позволяющие оценить и исследовать (на основе текущего описания) свойства Изделия и расширенного предприятия. Расчётные модели транслируют проектные, инженерные, логистические и другие решения различных групп сотрудников в функциональные показатели изделия. Вся совокупность описаний и расчётных моделей образует информационную модель Изделия или РП соответственно (см. рис. 1).

- На ранних этапах ЖЦИ выполняется предварительный анализ потребности в Изделии, его ожидаемых характеристик, выполнимости и эффективности бизнес-идеи, формируются технические требования к Изделию. Будучи отражёнными в операционных концепциях в виде моделей целевого применения Изделия, требования определяют желаемый образ функционирования будущего Изделия. В результате НИР и ОКР формируются ИМ составляющих элементов (агрегатов, систем, узлов), явлений и процессов функционирования Изделия. В ходе рабочего проектирования, конструкторско-технологической подготовки производства формируются технологические и производственные описания и модели Изделия, сопровождаемые моделями расширенного предприятия и отдельных предприятий как его составляющих частей. При прохождении каждого существенного этапа разрабатываемые ИМ пополняются, актуализируются и детализируются, на их основе проверяется и подтверждается соответствие текущего образа Изделия желаемому, намеченному при разработке концепта (см. рис. 1).

Управление ЖЦИ означает управление комплексной деятельностью [41] расширенного предприятия: воздействие субъекта управления на объект управления, призванное обеспечить его поведение, приводящее к достижению целей субъекта управления. Более конкретно определим процесс управления ЖЦИ как комплексную деятельность,

- реализуемую в рамках программы ЖЦИ в течение всего жизненного цикла Изделия;

- осуществляемую сотрудниками РП, чьи конструкторские, проектные, технологические, производственные и другие решения влияют на характеристики программы ЖЦИ;

² Деятельность [40] – активное взаимодействие человека с окружающей действительностью, в ходе которого человек выступает как субъект, целенаправленно воздействующий на предмет. Комплексная деятельность [41] – деятельность, обладающая нетривиальной внутренней структурой, с множественными и/или изменяющимися субъектом, технологией, ролью предмета деятельности в его целевом контексте.

³ Здесь и далее состав и последовательность фаз жизненного цикла будем приводить, следуя стандартам [2, 42], однако все результаты, утверждения и выводы остаются справедливыми и применительно к другим составам фаз ЖЦИ.

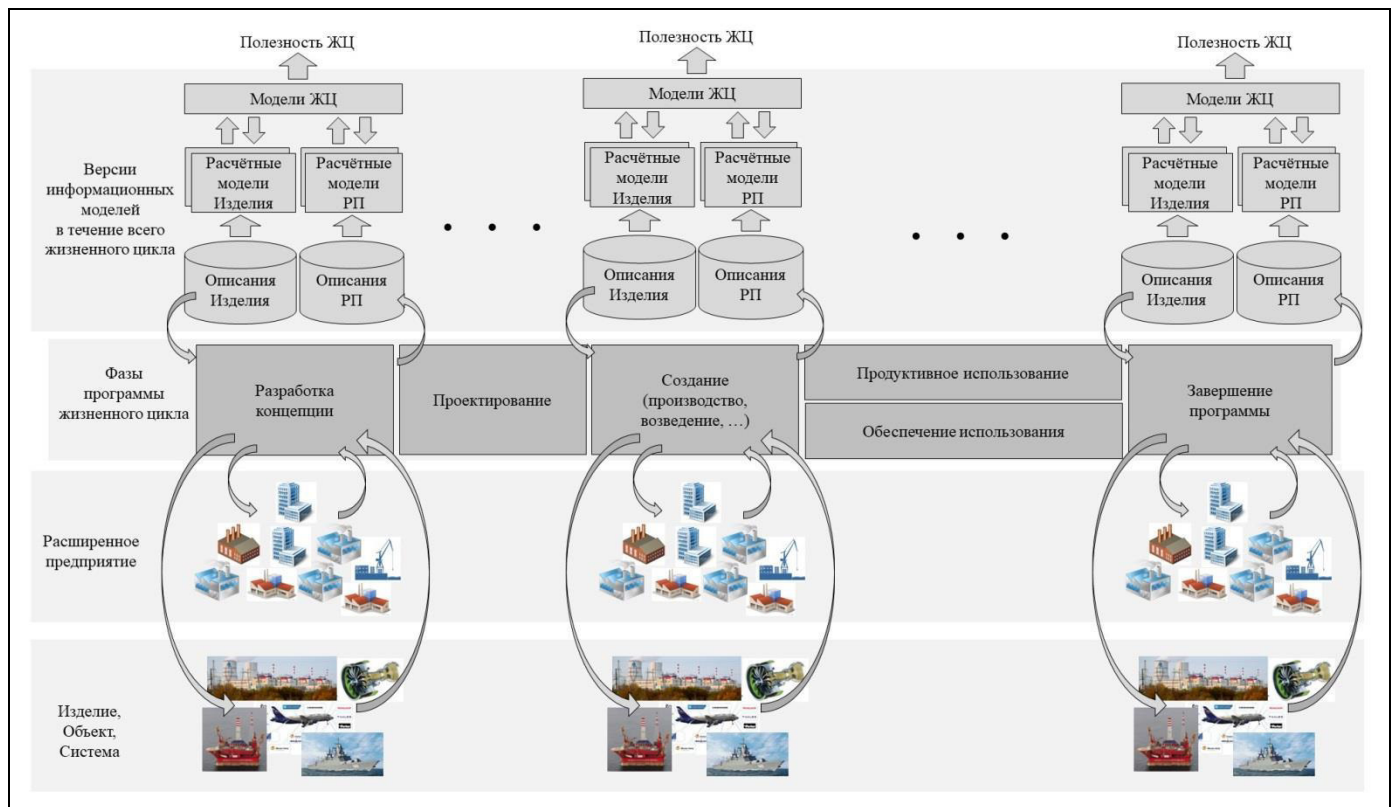


Рис. 1. Жизненный цикл, Изделие, расширенное предприятие и их информационные модели

- координируемую назначенной для этого выделенной группой специалистов – офисом управления программой ЖЦИ;

- в целях обеспечения рыночно/экономически обоснованных значений характеристик полезности программы и достижения таким образом целей программы ЖЦИ;

- заключающуюся в:

- сборе, систематизации и предоставлении прогнозных и фактических данных, определяющих значения характеристик полезности;

- определении и согласовании целевых значений характеристик, на её основе – лимитов на характеристики Изделия и РП, которые в свою очередь, декомпозируются на лимиты по компонентам Изделия и РП, группам работ РП;

- принятии конструкторских, проектных, технологических, производственных и других решений в целях соблюдения лимитов на характеристики на основании прогнозирования эволюции ЖЦИ (и Изделия, и РП);

- реализации ответственности за соблюдение лимитов теми фирмами, подразделениями и конкретными сотрудниками (конструкторами, технологами и др.), чьи решения/действия влияют на соответствующий компонент Изделия и/или РП.

По существу, ЖЦИ является не чем иным, как реализацией одного или нескольких элементов де-

ятельности, направленных на получение выгод, т. е. бизнесом или несколькими бизнесами на основании создания, производства, использования предмета ЖЦИ (изделия, системы, объекта). Такой взгляд на ЖЦИ позволяет сформулировать обобщённую структуру целей деятельности/бизнеса, идентичную структуре формирования полезности. На рис. 2 такая структура, соотносённая с фазами ЖЦИ, представлена применительно к сложному объекту или системе, а на рис. 3 – применительно к сложному изделию.

Структуры полезности/целей сформированы с точки зрения реализующего ЖЦИ субъекта, структуры в целом самоочевидны и не требуют комментариев: прямоугольники с закруглёнными углами представляют цели и подцели, стрелки соединяют подцели с целями. Штриховыми стрелками показаны зависимости полезности Изделия от работ по проектированию (в том числе концептуальному), производству, обеспечению функционирования и утилизации, эти зависимости также носят характер связей «цель – подцель»: чтобы Изделие обладало полезными для потребителя свойствами, эти свойства должны быть заложены в ходе проектирования, производства и т. д.

Заметим, что содержание всех фаз ЖЦИ, кроме «Продуктивного использования», включает в себя выполнение работ различных видов – по проекти-

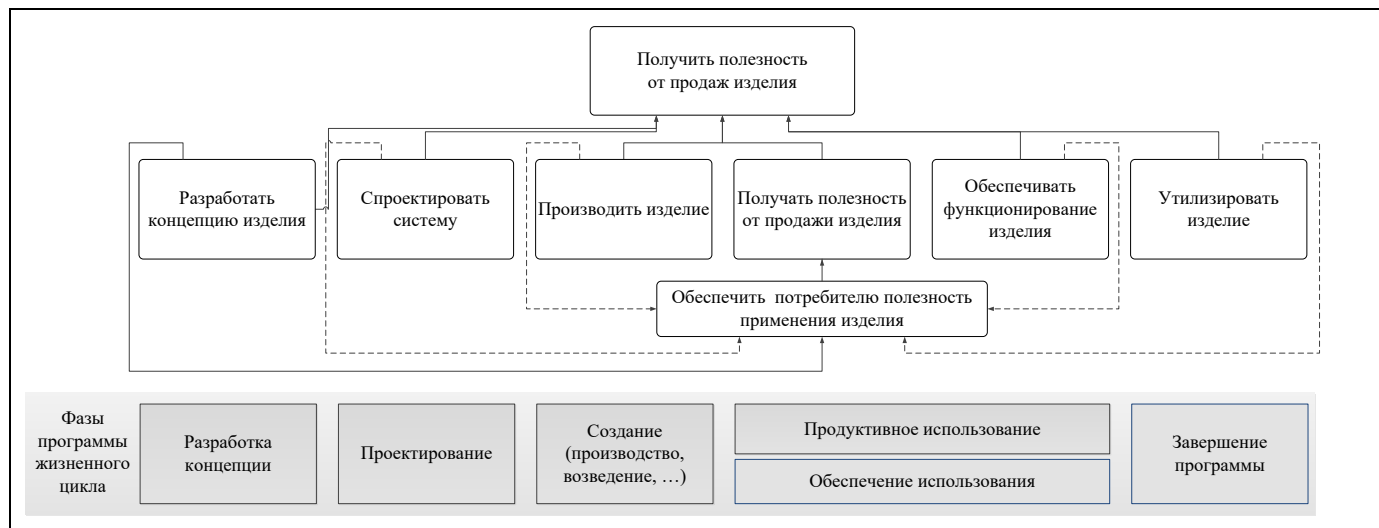


Рис. 2. Структура формирования полезности или целей комплексной деятельности, выполняемой в ходе ЖЦ сложной системы или объекта

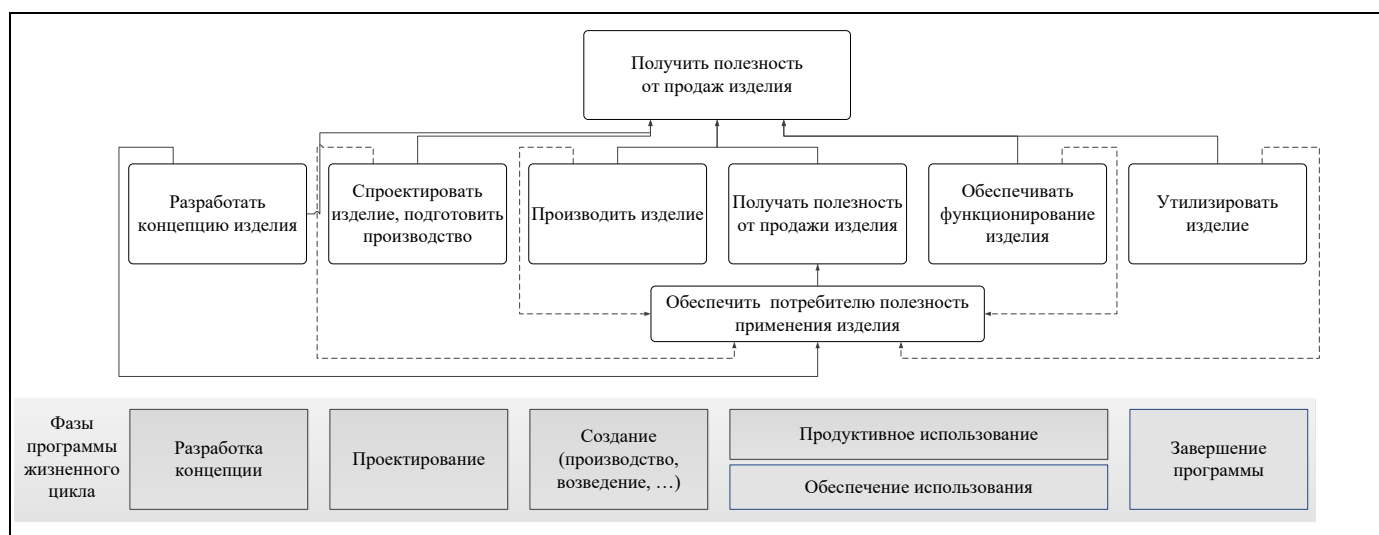


Рис. 3. Структура формирования полезности или целей комплексной деятельности, выполняемой в ходе ЖЦ сложного изделия

рованию, производству, обеспечению функционирования и утилизации Изделий. Для фазы «Продуктивное использование» характерно прежде всего получение целевой полезности, выгод (вместе с выполнением сопутствующих работ). Фактически работы всех видов в течение ЖЦИ носят вспомогательный, но неизбежный характер и выполняются лишь ради получения целевой полезности и выгод в ходе фазы «Продуктивного использования». На уровне общесистемного «кросс-индустриального» обобщения содержание ЖЦИ может быть сформулировано следующим образом.

- Все фазы ЖЦИ характеризуются издержками выполнения соответствующих видов работ, направленных на создание и целенаправленное изменение Изделия и РП, а также их информацион-

ных моделей. При этом достигаемые цели деятельности и формируемая полезность носят вспомогательный, «внутренний», характер – цели достигаются и полезность формируется в интересах субъекта ЖЦИ, а не внешних потребителей.

- Фазе «Продуктивное использование» свойственно получение целевой для субъекта ЖЦИ полезности на основании полезности и выгод, предоставляемых внешним потребителям в результате применения Изделия.

В бизнес-практике управляющим субъектом (или субъектом, реализующим ЖЦИ) обычно является офис управления программой ЖЦИ во главе с одним из руководителей головного предприятия, а управляемым объектом – всё РП, реализующее ЖЦИ. Управляющее воздействие представляет со-

бой всю совокупность принимаемых офисом управления программой ЖЦИ решений и оформленных как договоры, распоряжения, регламенты, письма и другие документы в электронной или бумажной форме. Поведением управляемого объекта является вся совокупность элементов КД РП (производственных, инженерных, технологических, логистических, сбытовых, административных, финансовых и др.), включая также управленческую деятельность вышестоящих хозяйствующих субъектов над подчинёнными.

При рассмотрении любой проблемы управления объектом, в состав которого входят люди, ключевым свойством является их способность активного выбора – действовать соответственно своим внутренним мотивам и предпочтениям. Кроме того, РП представляет собой многоуровневую иерархическую организацию (взаимосвязанную и иерархически подчинённую совокупность предприятий, их подразделений и сотрудников), поэтому процессы функционирования РП и управления им носят многоуровневый иерархический характер. При этом и наличие людей в составе РП, и их свойство активного выбора, и их ключевая роль в осуществлении ЖЦИ являются универсальными свойствами, характерными для всех без исключения ЖЦИ и РП.

Традиционным в таких случаях является применение теоретико-игровых подходов и методов теории иерархических игр [43], теории активных систем [44], теории управления организационными системами [45], теории контрактов [46]. С точки зрения этой области знаний расширенное предприятие составляет многоуровневую иерархическую динамическую сетевую активную систему с неопределённостью и с ограничениями на совместную деятельность активных элементов⁴ (АЭ) в виде технологических сетей [47–49]. На практике для расширенного предприятия, как правило, соблюдаются все предположения⁵, которые позволяют применять теоремы о декомпозиции, сфор-

⁴ Активными элементами на практике являются фирмы, департаменты, отделы, цеха, рабочие группы, сотрудники.

⁵ Гипотеза рационального поведения сотрудников – предположение о том, что субъект с учётом всей имеющейся у него информации выбирает действия, которые приводят к наиболее предпочтительным для него результатам деятельности; предположение о взаимной однозначности технологических функций относительно действий субъектов и результатов их предшественников в текущем периоде или предположение о полной наблюдаемости действий субъектов со стороны вышестоящего управляющего центра; предположение об информированности управляющего центра об общественно обусловленных значениях функции затрат и резервной полезности субъектов, которое справедливо в условиях развитого рынка труда.

мулированные и доказанные в работах [47–49]. Тогда из теорем о декомпозиции следует, что для любой осуществимой траектории ЖЦИ и независимо от конкретных технологических связей между АЭ (от технологии ЖЦИ и организации РП) управляющий субъект может построить компенсаторную систему стимулирования АЭ, которая:

- реализует траекторию действий АЭ как равновесие в доминантных стратегиях;
- декомпозирует задачу управления по АЭ, их действиям и по периодам времени;
- обеспечивает гарантированно (по всем возможным дальновидностям АЭ) минимальные затраты управляющего субъекта на реализацию этой траектории.

Такая система стимулирования отражает принцип согласованного управления⁶ и даёт возможность применить «схему оптимизации управления предприятием» (подраздел 3.4.5 [49]). Это, в свою очередь, позволяет математически корректно устранить неопределённость активного выбора АЭ и рассматривать управляющее воздействие как совокупность *планов действий* всех АЭ, выполнение которых выгодно этим АЭ и которые поэтому все АЭ будут стремиться выполнять. Реализация принципа согласованного управления в бизнес-практике означает, что вышестоящие менеджеры таким образом формируют задания/планы и системы стимулирования для подчинённых сотрудников, подразделений, предприятий, чтобы выполнение планов было выгодно подчинённым и они стремились бы их выполнять. С помощью такого управления, в частности, происходит транслирование стратегических целей фирмы всем сотрудникам вплоть до рядовых.

Определим класс методов и подходов исследования ЖЦИ, имеющих «кросс-индустриальный» характер и пригодных для применения в различных отраслях, для этого рассмотрим несколько важных особенностей реализации ЖЦИ и, как следствие, моделей управления ЖЦИ (см. рис.1).

Прежде всего, расширенное предприятие, реализуя ЖЦИ, играет двойственную роль: оно выступает и как субъект, и как объект комплексной деятельности, так как практически всегда в рамках программы ЖЦИ возникает необходимость создавать и изменять кооперацию предприятий, создавать новые технологии и, следовательно, новые предприятия.

⁶ Согласованное управление [45] – управление, при котором выполнение плана выгодно субъектам (является равновесием их игры).



Кроме того, будучи сложными системами, и Изделие, и РП требуют представлений с различных точек зрения [2] (например, функциональной, геометрической, энергетической, экономической, надёжностной и др.), поэтому на практике и Изделие, и РП всегда характеризуются множественными описаниями и моделями.

К тому же, если сами изделия, объекты, системы имеют существенную индустриальную специфику и нередко бывают уникальными, то расширенные предприятия, а также жизненные циклы имеют множество общесистемных, «кросс-индустриальных» сходных функций и видов деятельности (финансово-экономическую, кадровую, в существенной степени логистическую и др.), что позволяет использовать для них унифицированные описания и модели. На практике это выражается в том, что все предприятия используют одни и те же лучшие практики организации операционной деятельности, одни и те же шаблоны бизнес-процессов, одни и те же информационно-технологические платформы (ERP, CRM, MES и т. д.).

Наконец, в подавляющем большинстве случаев (если не всегда) полезность ЖЦ оценивается с экономической точки зрения, а экономические подходы, в свою очередь, носят «кросс-индустриальный» характер, отражающие обобщающие свойства экономической области знаний. Поэтому экономические описания и модели Изделия, расширенного предприятия и жизненного цикла являются типовыми для различных индустрий, что позволяет применять унифицированные подходы. Также именно в экономической сфере проявляется существенная рефлексивность ЖЦИ: экономические показатели Изделия, с одной стороны, определяют экономические показатели ЖЦИ и РП, с другой – зависят от них. В частности, себестоимость Изделия с учётом всего ЖЦ зависит от характеристик РП, и наоборот. Поэтому экономические описания и модели Изделия, и РП, и ЖЦИ представляют собой взаимосвязанную систему.

Таким образом, в основу общесистемного «кросс-индустриального» представления ЖЦИ положим экономические подходы и методы, описывающие процессы формирования полезности/ценности и сопутствующие этому издержки.

Перейдём теперь к описанию количественной модели управления ЖЦИ – сформулируем необходимые четыре компонента оптимизационной задачи:

- переменные состояния управляемой системы и внешней среды;
- ограничения;

- закономерности, отражающие связи между переменными;
- целевые функции активных участников и критерий эффективности управления.

2. ФОРМАЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМИ ЦИКЛАМИ СЛОЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ, ОБЪЕКТОВ, СИСТЕМ

Практический анализ особенностей жизненных циклов позволяет охарактеризовать управление ЖЦИ как разворачивающийся во времени многошаговый процесс принятия решений в условиях неопределённости с целью достичь наиболее предпочтительного для субъекта управления результата на всём ЖЦИ.

В рамках сложившейся практики хозяйственной жизни (бизнеса) ЖЦИ рассматриваются как активы – объекты, которые формируют или должны формировать положительный хозяйственный/бизнес-результат. Поэтому в качестве критерия управления ЖЦИ целесообразно использовать оптимизацию единого количественного показателя – эффекта или полезности ЖЦИ, выбирая в качестве такого показателя одну из широко распространённых в экономике характеристик прибыльности, денежного потока, добавленной стоимости или иных.

Задачу будем рассматривать в дискретном представлении времени, состояние ЖЦИ будем характеризовать на каждом периоде t некоторой (может быть, векторной) величиной $x(t)$, принимающей значения из множества X возможных значений, $x(t) \in X$. Полагаем, что субъект управления выбирает в периоде t элемент $u(t)$ из множества возможных решений (и действий) U , $u(t) \in U$. Управляющее воздействие $u(t)$ на практике (при условии использования согласованной системы стимулирования, см. выше) соответствует совокупности планов действий всех составляющих элементов РП (фирм, их подразделений и отдельных сотрудников), формируемых в ходе следования планам офиса управления программой ЖЦИ.

Независимо от выбора управляющего воздействия $u(t)$ и состояния ЖЦИ $x(t)$, в каждом периоде реализуется некоторое значение неопределённых факторов различной природы, описываемое вектором $\omega(t) \in \Omega$, где Ω – множество всех возможных значений неопределённых факторов.

На природу элементов и размерность векторов $x(t)$, $u(t)$ и $\omega(t)$, как и на множества X , U и Ω , не будем накладывать никаких ограничений (за исключением обеспечивающих достижимость соответ-

ствующих максимумов или минимумов). Также значения состояний ЖЦИ и неопределённых факторов будем понимать в расширенном смысле, включая в них, при необходимости, элементы, относящиеся к текущему периоду t и некоторому набору предыдущих периодов (возможно, всей предыстории от начального периода моделирования t_1 до текущего периода t включительно). В частности, под переменными состояниями ЖЦИ $x(t)$ можно понимать полную информационную модель пары <само Изделие (объект, система); расширенное предприятие, реализующее ЖЦИ>.

Значение неопределённых факторов $\omega(t)$ неизвестно субъекту на момент выбора управляющего воздействия $u(t)$, но становится известным апостериори. В зависимости от реализовавшихся значений $x(t)$, $u(t)$ и $\omega(t)$, ЖЦИ эволюционирует и к следующему $(t + 1)$ -му шагу его состояние принимает значение

$$x(t + 1) = F(x(t), u(t), \omega(t), t), \quad (1)$$

где $F(\cdot)$ – функция динамики ЖЦИ, некоторая известная функция, описывающая закономерности изменения состояния ЖЦИ во внешней среде в зависимости от принимаемых решений – управляющих воздействий.

Эффект или полезность ЖЦИ $\Phi(\cdot)$ в течение периода моделирования $[t_1; t_2]$ будем описывать в традиционной форме:

$$\begin{aligned} \Phi(\{x(\cdot), u(\cdot), \omega(\cdot)|t_1; t_2\}) &= \\ &= \sum_{\tau=t_1}^{t_2} \delta_{\tau, t_1, t_2} \varphi(x(\tau); u(\tau); \omega(\tau); \tau). \quad (2) \end{aligned}$$

где $\varphi(\cdot)$ – известная частная функция полезности ЖЦИ с точки зрения субъекта управления, δ_{τ, t_1, t_2} – функция дальновидности управляющего субъекта, а нотация $\{x(\cdot), u(\cdot), \omega(\cdot)|t_1; t_2\}$ означает зависимость от кортежа значений $x(\cdot)$, $u(\cdot)$, $\omega(\cdot)$ на промежутке моделирования $[t_1; t_2]$.

В дальнейших выкладках для упрощения записи функцию дальновидности δ_{τ, t_1, t_2} указывать в явном виде не станем, предполагая, что она, будучи заданной, может быть учтена как множитель в частной функции полезности $\varphi(\cdot)$.

Использование дискретного представления времени, приведение принимаемых решений и влияния неопределённости к единому (в каждом периоде) моменту времени отражает сложившуюся практику функционирования РП, когда планирование и отчётность реализуются применительно к отчётным периодам (для ЖЦИ это фазы, этапы и более детальные периоды, не обязательно равной продолжительности) и не сужает возможности данного формализма.

Фрактальная иерархия элементов деятельности, работ и, соответственно, принимаемых решений также адекватно реализуется в рамках предложенного формализма: деятельность и принятие решений подчинённых уровней иерархии моделируется в описании (2) процесса эволюции ЖЦИ – функции $F(\cdot)$.

Проявление неопределённости, порождаемой каждым из возможных источников [41] – внешней средой, технологией и предметом КД, комплексным субъектом деятельности – полноценно отражается через влияние неопределённых факторов – процесса $\omega(\cdot)$ – и на эволюцию ЖЦИ (функцию $F(\cdot)$), и на эффект, полезность ЖЦИ (функцию $\varphi(\cdot)$).

Тогда задачу оптимального управления ЖЦИ поставим как максимизацию эффекта ЖЦИ на промежутке $[t_1; t_2]$ в многошаговой постановке (3) с учётом выражений (1) и (2):

$$\Phi(\{x(\cdot), u(\cdot), \omega(\cdot)|t_1; t_2\}) \rightarrow \max_{\{u(\cdot)|t_1; t_2\}; u(t) \in U} \cdot \quad (3)$$

Сформулированная задача (1)–(3) представляет собой классическую задачу динамического программирования с дискретным временем и неопределённостью. Не накладывая ограничений на характер неопределённости, с помощью нотации $\text{def}_{\omega(\cdot)} \{ \cdot \}$ обозначим оператор устранения неопределённости $\omega(\cdot)$ (с помощью метода гарантированного результата, ожидаемой полезности или иного метода).

Тогда задача оптимального управления примет вид

$$\text{def}_{\omega(\cdot)} \{ \Phi(\{x(\cdot), u(\cdot)|t_1; t_2\}; \{ \omega(\cdot)|t_1; t_2 \}) \} \rightarrow \max_{\{u(\cdot)|t_1; t_2\}; u(t) \in U} \cdot \quad (4)$$

с учётом выражений (1), (2) и при начальных условиях $x(t_1 - 1) = x_0$.

3. АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Сформируем в наиболее общем виде алгоритм поиска оптимального управления – последовательности решений $u^*(t)$, обеспечивающих максимальное возможное значение эффекта ЖЦИ.

Решение задачи (1)–(4) будем основывать на принципах оптимальности Беллмана и обратной индукции. Следуя им, запишем задачу (4) в виде

$$\begin{aligned} &\text{def}_{\omega(\cdot)} \{ \Phi(\{x(\cdot), u(\cdot)|t_1; t_2\}; \{ \omega(\cdot)|t_1; t_2 \}) \} = \\ &= \text{def}_{\omega(\cdot)} \sum_{\tau=t_1}^{t_2} \varphi(x(\tau); u(\tau); \omega(\tau); \tau) \rightarrow \max_{\{u(\cdot)|t_1; t_2\}; u(t) \in U} \cdot \end{aligned}$$



Введём функцию Беллмана $J(x, t) = \max_{\{u(\cdot); t; t_2; u(\tau) \in U(\cdot)\}} \text{def}_{\omega(\cdot)} \sum_{\tau=t}^{t_2} \varphi(x(\tau); u(\tau); \omega(\tau); \tau)$ и получим для неё рекуррентное выражение, начиная с t_2 -го периода и уменьшая номер периода.

Для финального t_2 -го периода будет справедливо

$$J(x, t_2) = \max_{u \in U} \{ \text{def}_{\omega(t_2)} \{ \varphi(x, u, \omega(t_2), t_2) \} \}. \quad (5)$$

Для $(t_2 - 1)$ -го периода

$$\begin{aligned} J(x, t_2 - 1) &= \\ &= \max_{u \in U} \{ \text{def}_{\omega(t_2-1)} \{ \varphi(x, u, \omega(t_2-1), t_2-1) \} \} + \\ &+ \max_{u \in U} \{ \text{def}_{\omega(t_2-1)} \{ \text{def}_{\omega(t_2)} \{ \varphi(F(x, u, \omega(t_2-1), t_2-1), \\ &\quad u(t_2), \omega(t_2), t_2) \} \} \} = \\ &= \max_{u \in U} \{ \text{def}_{\omega(t_2-1)} \{ \varphi(x, u, \omega(t_2-1), t_2-1) + \\ &\quad + J(F(x, u, \omega(t_2-1), t_2-1), t_2) \} \}. \end{aligned}$$

Продолжая по индукции и уменьшая номер периода, получим в общем случае рекуррентное выражение для функции Беллмана для всех $t \in [t_1; t_2 - 1]$ в порядке убывания в виде

$$J(x, t) = \max_{u \in U} \left\{ \text{def}_{\omega(t)} \left\{ \varphi(x, u, \omega(t), t) + \right. \right. \\ \left. \left. + J(F(x, u, \omega(t), t), t+1) \right\} \right\}. \quad (6)$$

Выражения (5) и (6) позволяют вычислить последовательность функций $J(x, t)$ для всех $t \in [t_1; t_2]$ в порядке убывания номера периода t . После получения решения $J(x, t)$, подставив начальное значение x_0 при $t_1 - 1$, можно получить также для всех $t \in [t_1; t_2]$ в порядке возрастания номера периода t оптимальную стратегию управления – последовательность оптимальных решений $u^*(t)$ – вместе с оптимальной траекторией $x^*(t)$ реализации ЖЦИ.

$$u^*(t) = \arg \max_{u \in U} \{ \text{def}_{\omega(t)} \{ \varphi(x^*(t), u, \omega(t), t) + \\ + J(F(x^*(t), u, \omega(t), t), t+1) \} \}; \quad (7)$$

$$x^*(t+1) = \text{def}_{\omega(t)} \{ F(x^*(t), u^*(t), \omega(t), t) \}. \quad (8)$$

Полученные соотношения (5)–(8) задают строгий алгоритм принятия оптимальных решений по управлению ЖЦИ и таким образом составляют формальные основания управления ЖЦИ, базирующиеся на следующем формализме:

- состояние и поведение ЖЦИ формализовано вектором $x(t) \in X$;
- принимаемые управленческие решения описаны вектором $u(t) \in U$,
- неопределённость всех видов представлена вектором $\omega(t) \in \Omega$;

- динамика ЖЦИ и внешней среды описана функцией $F(\cdot)$ – соотношение (1);

- эффект ЖЦИ формализован в виде функции $\varphi(\cdot)$ и соотношения (2).

Рассматриваемой задаче (1)–(4) и алгоритму её решения (5)–(8) присущ ряд фундаментальных свойств. Обсудим эти свойства и способы применения данного подхода для практического управления ЖЦИ, согласования и интеграции разнородных (инженерных, финансово-экономических, организационных и других решений, принимаемых в ходе реализации ЖЦИ).

Запишем два частных случая оптимизационной задачи, имеющих важное практическое значение.

Во многих случаях частная функция полезности принимает форму разности между полученными выгодами $h(\cdot)$ и суммой издержек $c_i(\cdot)$ различных видов:

$$\begin{aligned} \varphi(x(\tau), u(\tau), \omega(\tau), \tau) &= h(x(\tau), u(\tau), \omega(\tau), \tau) + \\ &+ \sum_i c_i(x(\tau); u(\tau); \omega(\tau); \tau). \quad (9) \end{aligned}$$

Эффект, в свою очередь, определяется как дисконтированная с постоянным коэффициентом δ сумма частных полезностей $\varphi(\cdot)$:

$$\begin{aligned} \Phi(\{x(\cdot), u(\cdot), \omega(\cdot)\}; t_1; t_2) &= \\ &= \sum_{\tau=t_1}^{t_2} \delta^{(\tau-t_1)} [h(x(\tau); u(\tau); \omega(\tau); \tau) - \\ &- \sum_i c_i(x(\tau); u(\tau); \omega(\tau); \tau)]. \quad (10) \end{aligned}$$

Функция (9) представляет большинство (если не все) экономических постановок, так как позволяет трактовать выгоды и издержки как элементы и денежного потока, и счёта прибылей и убытков, и накопленной ценности. Соответственно, эффект (10) может интерпретироваться и как чистый денежный поток (*net present value*) жизненного цикла как инвестиционного актива, и как взвешенная суммарная прибыль, и как добавленная стоимость (*economic value added, shareholders value added, market value added*).

В этом случае уравнения Беллмана примут вид:

$$J(x, t_2) = \max_{u \in U} \left\{ \text{def}_{\omega(t_2)} \left\{ h(x(t_2); u(t_2); \omega(t_2); t_2) - \right. \right. \\ \left. \left. - \sum_i c_i(x(t_2); u(t_2); \omega(t_2); t_2) \right\} \right\}. \quad (11)$$

$$J(x, t) = \max_{u \in U} \left\{ \text{def}_{\omega(t)} \left\{ h(x(t); u(t); \omega(t); t) - \right. \right. \\ \left. \left. - \sum_i c_i(x(t); u(t); \omega(t); t) + \right. \right. \\ \left. \left. + \delta J(F(x, u, \omega(t), t), t+1) \right\} \right\}. \quad (12)$$

Ещё одним частным случаем является продолжительный ЖЦ с не заданным априори сроком завершения и, начиная с некоторого периода времени, стационарной динамикой

$$x(t+1) = F(x(t), u(t), \omega(t)). \quad (13)$$

В этом случае уравнения Беллмана сводятся к единственному уравнению (14):

$$J(x) = \max_{u \in U} \left\{ \text{def}_{\omega} h(x; u; \omega) - \sum_i c_i(x; u; \omega) + \delta J(F(x, u, \omega)) \right\}. \quad (14)$$

Решение данного уравнения $J(\cdot)$ даёт оптимальное управление (15):

$$u^* = \arg \max_{u \in U} \left\{ \text{def}_{\omega} h(x; u; \omega) - \sum_i c_i(x; u; \omega) + \delta J(F(x, u, \omega)) \right\}. \quad (15)$$

Реализующее ЖЦИ расширенное предприятие включает в себя в качестве основных элементов сотрудников – индивидов, обладающих способностью активного выбора, т. е. РП является активной системой. Эта особенность проблемы, рассмотренная выше в § 1 (а также в работах [47–49]), задаёт условия оптимизации управления ЖЦИ в виде необходимости соблюдения гипотезы рационального поведения, предположения о взаимной однозначности технологических функций и предположения об информированности управляющего субъекта (см. сноску 5 выше, а также работы [47–49]).

Существенно также, что расширенное предприятие является многоуровневой активной системой, включающей в себя иерархию технологически связанных фирм, их подразделений, рабочих групп, сотрудников. В таких условиях практическое формирование оптимального управления $u^*(t_{\text{тек}})$ заключается в согласованном планировании в многоуровневой иерархической динамической активной системе. Данная задача подробно рассмотрена в подразделе 2.2 [50] и подразделе 7.1 [49], разработанные в указанных работах алгоритмические модели согласованного планирования целесообразно применить для формирования оптимального плана $u^*(t_{\text{тек}})$ реализации ЖЦИ.

Другой важной особенностью задачи оптимального управления ЖЦИ является не столько необходимость учёта неопределённых факторов $\omega(\cdot)$, сколько характер и особенности этих факторов. Следуя изложенному в работе [41], все возможные виды неопределённости будем относить к истинной неопределённости (возможность наступ-

ления уникальных или редко повторяющихся событий, которые не объясняются существующими фундаментальными законами и для которых нет достаточного объёма априорных наблюдений) или измеримой неопределённости (возможность наступления априори непредсказуемых, но многократно повторявшихся ранее или/и описываемых фундаментальными закономерностями событий). В рассматриваемой проблеме управления ЖЦИ принципиальным является присутствие не только измеримой, но также и истинной неопределённости. Это вызвано, прежде всего, длительностью ЖЦИ и изменчивостью (технологической, политической, хозяйственной и т. д.) внешнего окружения, креативным характером процессов ЖЦИ (как минимум, на ранних стадиях – при проектировании самого изделия, фактически заключающемся в создании новых знаний о самом будущем изделии, его функционировании во внешней среде и производстве изделия), а также наличием индивидов с их способностью активного выбора в составе комплексного субъекта деятельности. Присутствие истинной неопределённости, задающей поведение $\omega(\cdot)$, а следовательно, и ЖЦИ, и его эффекта (из-за зависимостей (1), (2)) затрудняет устранение неопределённости и решение задачи.

Традиционно для устранения неопределённости используются априорные знания об источниках и механизмах порождения (устраняемой) неопределённости. В данной задаче из-за истинной неопределённости такие знания никогда не могут считаться объективными и исчерпывающе полными (относительно описываемых объектов и явлений) и, как следствие, – неизменными. Недостаток знаний об объективных закономерностях заставляет использовать субъективные оценки и предположения для устранения неопределённости – оператор $\text{def}\{\cdot\}_{\omega(t)}$ в алгоритме (5)–(8). Применительно к дина-

мически развивающимся явлениям, таким как ЖЦИ, оценки и предположения, на практике формируются в виде наборов сценариев [51], описывающих эволюцию явлений в условиях, когда управление является гибким – зависит заранее рассчитанным образом от реализовавшихся значений факторов неопределённости. Сценарный подход [51] широко применяется для принятия решений, в частности, прогнозирования и планирования, в областях, где истинная неопределённость наиболее значительна – в экономике, в социальной, политической сфере. В основе подхода лежит экспертное формирование сценариев поведения анализируемой системы и использование их для расчётов и



прогнозов. Применение сценарного подхода является, по сути, субъективным, эвристическим способом формирования знаний со всеми присущими ему недостатками. Однако в условиях, когда инструментальное объективное исследование невозможно, на практике применяется именно такой подход. В данной задаче сценарии $\{x_0; \{\Omega_n^*(t) | t_1 \leq t \leq t_2\}; \{U_n^*(t) | t_1 \leq t \leq t_2\}\}$ состоят из начальных значений x_0 , упорядоченных по номеру периода t последовательностей множеств $\Omega_n^*(t)$ состояний неопределённых факторов и множеств $U_n^*(t)$ управленческих решений (зависящих от вектора $\omega(t)$).

Ещё одним важным аспектом данной задачи и практического применения предлагаемого оптимизационного подхода является изменчивость условий внешней среды и реализации истинной неопределённости технологии, предмета и субъекта, что приводит к потере актуальности полученных оптимальных стратегий управления с течением времени. Поэтому целесообразной практикой следует считать регулярное решение задачи (с учётом всей имеющейся текущей информации) и формирование оптимальных управлений. То есть перед принятием решения в каждом текущем периоде $t_{\text{тек}}$ целесообразно повторять решение задачи (1)–(15) для промежутка $t_{\text{тек}} \leq t \leq t_2$, предварительно актуализировав используемые априорные знания (сценарии и другие предположения). Таким образом, фактически из всего оптимального управления $\{u^*(\cdot) | t_{\text{тек}}; t_2\}$ всегда используется только ближайший по времени план $u^*(t_{\text{тек}})$, поэтому, вообще говоря, остальные управления $\{u^*(\cdot) | t_{\text{тек}} + 1; t_2\}$ можно и не рассчитывать, следуя выражениям (7)–(8). С практической точки зрения описанную актуализацию оптимальной стратегии необходимо выполнять при фиксации каждой базовой конфигурации (*baseline*) [2] в ходе всего ЖЦИ.

При использовании сценарного подхода интерпретация результатов решения задачи включает в себя оговорку об оптимальности управления при соблюдении принятых предположений – реализации одного из сценариев. С одной стороны, подобные оговорки снижают ценность оптимизации, с другой – такое обоснование является, несомненно, лучшим среди возможных, особенно если набор рассматриваемых сценариев настолько широк, что возможность реализации ЖЦИ по пути, отличному от всех таких сценариев, пренебрежимо мала. Данное замечание является ещё одним условием оптимизации управления ЖЦИ.

Векторы $x(\cdot)$ состояния управляемого объекта, ЖЦИ, управления $u(\cdot)$, неопределённых факторов

$\omega(\cdot)$ и соответствующие множества их возможных значений X , U , и Ω описывают сложные объекты и явления ЖЦИ (Изделие, РП, технологию, их эволюцию и функционирование в сложной технологической, политической, экономической внешней среде). Функция $F(\cdot)$ формализует всё разнообразие эволюции ЖЦИ – изменения пары <Изделие; расширенное предприятие> – вследствие принятия управленческих решений, выполнения конструкторских, технологических, производственных и других работ, формирования и согласования планов, контроля их исполнения и реализации других активностей внутри РП. В свою очередь, функция $\varphi(\cdot)$ (а также выгоды $h(\cdot)$ и издержки $c_i(\cdot)$) отражает зависимость эффекта ЖЦИ от всех значимых аспектов реализации ЖЦИ.

Вместе с тем аналитическое решение задачи (1)–(15) в общем случае не представляется возможным. Поэтому для практической реализации алгоритма (5)–(8) и (11)–(15) необходимо использование индустриально-специфических моделей, которые представят функции $F(\cdot)$, $\varphi(\cdot)$, $h(\cdot)$ и $c_i(\cdot)$ и отразят сложные взаимосвязи между характеристиками состояний ЖЦИ $x(\cdot)$, принимаемых управленческих решений $u(\cdot)$ и неопределённых факторов $\omega(\cdot)$, а также их влияние на эффект ЖЦИ $\varphi(\cdot)$. Такие модели обеспечат быстрое получение численных значений $F(\cdot)$, $\varphi(\cdot)$, $h(\cdot)$ и $c_i(\cdot)$ при различных сценариях и позволят применить предложенные алгоритмы (5)–(8) и (11)–(15), графическая метафора этих алгоритмов приведена на рис. 4.

И наконец, перечислим в виде единого списка все рассмотренные ранее условия оптимизации управления ЖЦИ – условия, при которых предложенный подход остаётся математически строгим.

- Гипотеза рационального поведения сотрудников РП – предположение, что субъект с учётом всей имеющейся у него информации выбирает действия, которые приводят к наиболее предпочтительным для него результатам деятельности.

- Предположение о взаимной однозначности технологических функций РП относительно действий субъектов и результатов их предшественников в текущем периоде или предположение о полной наблюдаемости действий субъектов со стороны вышестоящего управляющего центра.

- Предположение о взаимной однозначности технологических функций РП относительно действий субъектов и результатов их предшественников в текущем периоде или предположение о полной наблюдаемости действий субъектов со стороны вышестоящего управляющего центра.

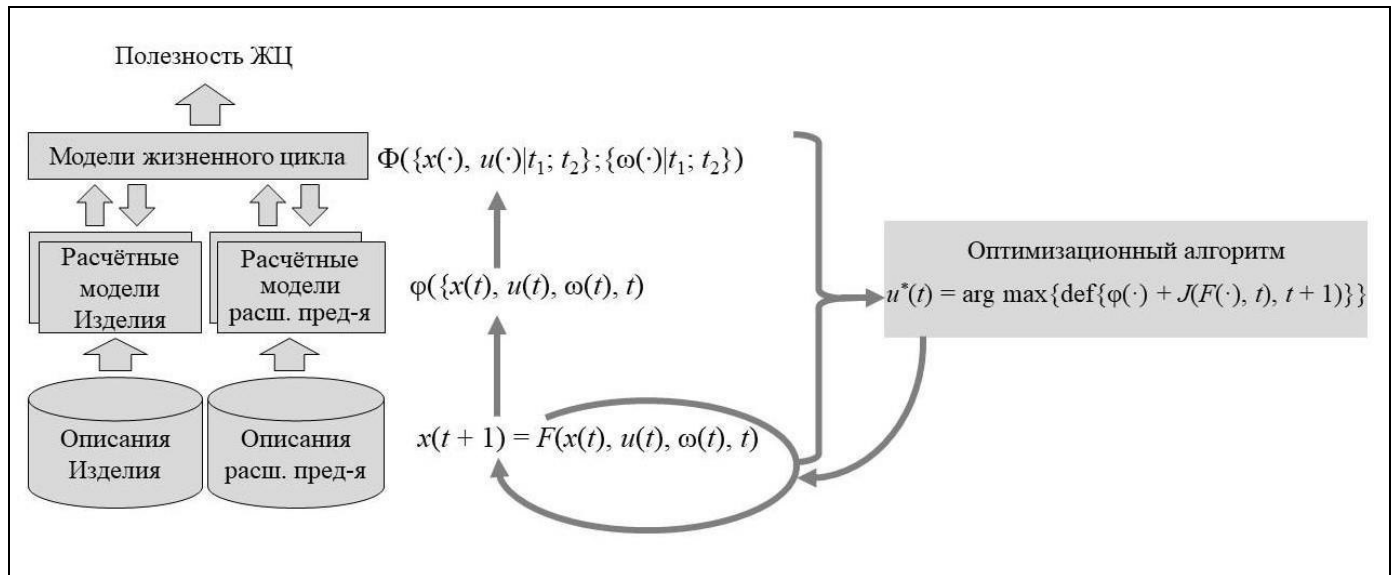


Рис. 4. Логика реализации оптимизационного алгоритма

ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

ИНСТРУМЕНТ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЖЦИ

В заключение перечислим полученные ранее результаты.

- Сформулирована математически строгая задача оптимального управления жизненными циклами сложных изделий аэрокосмической, энергетической, ядерной, транспортной и другой сложной техники, капитальных объектов и систем энергетики, телекоммуникаций, транспорта, сельского хозяйства, сырьевых и других отраслей, а также информационно-технологических систем.

- Предложен формальный алгоритм решения задачи оптимального управления.

- Предложен практический способ применения алгоритма решения задачи на практике, основанный на сценарном подходе, перечислены условия оптимизации управления ЖЦИ – условия, при которых оптимизация возможна.

Данные результаты фактически составляют *инструмент оптимального управления ЖЦИ*.

ЛИТЕРАТУРА

1. *The Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK) v. 1.2* / Ed. by Pyster A., Olwell A. (eds). – Hoboken: The Trustees of the Stevens Institute of Technology, 2013. – <http://www.sebokwiki.org> просмотрен 29-08-2021.
2. *ISO/IEC/IEEE 15288:2015. Systems and Software Engineering – System Life Cycle Processes*.
3. *Новиков, Д.А. Кибернетика: Навигатор. История кибернетики, современное состояние, перспективы развития* – М.: Ленанд, 2016. – 160 с. [Novikov, D.A. Kibernetika: Navigator.

Istoriya kibernetiki, sovremennoe sostoyanie, perspektivy razvitiya – Moscow: Lenand, 2016. – 160 s. (In Russian)]

4. *Перегудов, Ф.И. Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ* – М.: Высшая школа, 1989. – 320 с. [Peregudov, F.I. Tarasenko, F.P. Vvedenie v sistemnyi analiz. – Moscow: Vysshaya shkola, 1989. – 320 s. (In Russian)]
5. *ГОСТ Р 54871-2011. Проектный менеджмент. Требования к управлению программой*. [GOST R 54871-2011. Proektnyi menedzhment. Trebovaniya k upravleniyu programmoi. (In Russian)]
6. *ГОСТ Р 56136-2014. Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения*. [GOST R 56136-2014. Upravlenie zhiznennym tsiklom produktsii voennogo naznacheniya. Terminy i opredeleniya. (In Russian)]
7. *Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем*. – М.: Мир, 1973. – 344 с. [Mesarovich, M., Mako, D., Takahara, I. Teoriya ierarkhicheskikh mnogourovnevnykh sistem. – Moscow: Mir, 1973. – 344 s. (In Russian)]
8. *Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа*. – М.: Наука, 1981. – 488 с. [Moiseev, N.N. Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza. – M.: Nauka, 1981. – 488 s. (In Russian)]
9. *Rebovich, G. Enterprise Systems Engineering: Advances in the Theory and Practice* / Rebovich, G., White, B. (Eds). – Boca Raton: CRC Press, 2011. – 459 p.
10. *Farr, J.V. Systems Life Cycle Costing: Economic Analysis, Estimation, and Management (Engineering Management)*. 1st Edition. – CRC Press, 2011. – 316 p.
11. *Gupta, Y., Chow, W.S. Twenty-Five Years of Life Cycle Costing Theory and Application: A Survey* / The Intern. Journal of Quality and Reliability Management. – 1985. – Vol. 2. – P. 51–76.
12. *Leszczynski, Z., Jasinski, T. Comparison of Product Life Cycle Cost Estimating Models Based on Neural Networks and Parametric Techniques—A Case Study for Induction Motors. – Sustainability*. – 2020. – Vol. 12, art. no. 8353. – P. 2 – 14. – DOI: 10.3390/su12208353.
13. *Liu, H., Gopalkrishnan, V., Ng, W.K., et al. An Intelligent System for Estimating Full Product Life Cycle Cost at the Early*



- Design Stage // Intern. Journal of Product Lifecycle Management. – 2008. – No. 2(2-3). – P. 96–113.
14. *Loyer, J.L.* A MBSE Probabilistic Framework for Preliminary Lifecycle Costing of Mechanical Products / J.L. Loyer, E. Henriques // INCOSE International Symposium. – Las Vegas, NV, 2014. – Vol. 24, iss. 1. – P. 182–195.
 15. *Oduyemi, O., Okoroh, M. and Dean, A.* Developing an artificial neural network model for life cycle costing in buildings. In: Raidén, A.B. and Aboagye-Nimo, E. (Eds). – Proc 31st Annual ARCOM Conference. – Lincoln, UK, 2015. – P. 843–852.
 16. *Wang, G., Roedler, G.J., Pena, M., Valerdi, R.A.* A Generalized Systems Engineering Reuse Framework and its Cost Estimating Relationship // INCOSE International Symposium. – Las Vegas, NV, 2014. – Vol. 24, iss. 1. – P. 274–297.
 17. *Captain, T.* Can we afford our own future? Why R&D programs are late and over-budget – and what can be done to fix the problem. – Deloitte Development LLC, 2009. – 28 p.
 18. *NASA Cost Estimating Handbook. Version 4.0.* – NASA Headquarters. Cost Analysis Division. – Washington, DC (US): National Aeronautics and Space Administration, 2015.
 19. *GAO Cost Estimating and Assessment Guide. Best Practices for Developing and Managing Capital Program Costs.* GAO-09-3SP. – United States Government Accountability Office. – Washington, D.C., 2009. – 440 p.
 20. *Holland, J.* Studying Complex Adaptive Systems // Journal of Systems Science and Complexity. – 2006. – Vol. 19(1). – P. 1–8.
 21. *North, M.* A Theoretical Formalism for Analyzing Agent-based Models // Complex Adaptive Systems Modeling, 2014. – Vol. 2, art. no. 3. – DOI: 10.1186/2194-3206-2-3. – <http://link.springer.com/article/10.1186/2194-3206-2-3>.
 22. *Rzevski, G., Skobelev, P.* Managing Complexity. – London: WIT Press, 2014. – 216 p.
 23. *Sanchez-Anguix, V., Tunali, O., Aydoğan, R., Julian, V.* Can Social Agents Efficiently Perform in Automated Negotiation? – Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, art. no. 6022. – <https://doi.org/10.3390/app11136022>.
 24. *Alagar, V.S., Periyasamy, K.* Calculus of Communicating Systems. In: Specification of Software Systems. in Computer Science. London: Springer, 2011. – https://doi.org/10.1007/978-0-85729-277-3_15.
 25. *Bergstra, J.* Process Algebra for Synchronous Communication / Information and Control. – 1984. – Vol. 60. – P. 109–137.
 26. *Hoare, C.* Communicating Sequential Processes. – New York: Prentice Hall, 1985. – 256 p.
 27. *Milner, R.* A Calculus of Communicating Systems. – Lecture Notes in Computer Science. – Heidelberg: Springer Verlag, 1980. – Vol. 92. – 171 p.
 28. *Estefan, J.* Survey of MBSE Methodologies. – Seattle, Wa: INCOSE, 2008. – 70 p. – http://www.omg-sml.org/mbse_methodology_survey_revb.pdf.
 29. *The Oxford Handbook of the Economics of Networks.* – Oxford: Oxford University Press, 2016. – 856 p.
 30. *Jackson, M.* Social and Economic Networks – Princeton: Princeton University Press, 2010. – 520 p.
 31. *Бурков, В.Н., Горюдзе И.А., Ловецкий С.Е.* Прикладные задачи теории графов. – Тбилиси: ВЦ АН ГССР, 1974. – 232 с. [*Burkov, V.N., Gorydze, I.A., Lovetskii, S.E.* Prikladnyye zadachi teorii grafov. – Tbilisi: VTs AN GSSR, 1974. – 232 s. (In Russian)]
 32. *Голенко-Гинзбург, Д.И.* Стохастические сетевые модели планирования и управления разработками – Воронеж: Научная книга, 2010. – 284 с. [*Golenko-Ginzburg, D.I.* Stokhasticheskie setevye modeli planirovaniya i upravleniya raz-
 33. *Матвеев, А.А., Новиков Д.А., Цветков А.В.* Модели и методы управления портфелями проектов – М.: ИПУ РАН, 2005. – 206 с. [*Matveev, A.A., Novikov, D.A., Tsvetkov, A.V.* Modeli i metody upravleniya portfelyami proektov – М.: IPU RAN, 2005. – 206 s.]
 34. *Kelly, F., Yudovina, E.* Stochastic Networks. – Cambridge: Cambridge University Press, 2014. – 230 p.
 35. *Клейнер Г.Б.* Эволюция и модернизация теории предприятия // Экономическая трансформация и экономическая теория. 5-й Междунар. симпозиум по эволюционной экономике. – М.: ИЭ РАН., 2004. – 27 с. [*Kleiner, G.B.* Evolyutsiya i modernizatsiya teorii predpriyatiya // Ekonomicheskaya transformatsiya i ekonomicheskaya teoriya. 5-i Mezhdunar. simpozium po evolyutsionnoi ekonomike. – М.: IE RAN., 2004. – 27 s. (In Russian)]
 36. *Возжаков А.В., Гитман М.Б., Столбов В.Ю.* Модели принятия коллективных решений в производственных системах // Управление большими системами. – 2015. – Вып. 58. – С. 161–178. [*Vozhakov, A., Gitman, M., Stolbov, Y.* Models of collective decision-making in production. – Large-Scale System Control. – 2015. – Iss. 58. – P. 161–178. (In Russian)]
 37. *Минцберг, Г.* Структура в кулаке: создание эффективной организации. Пер. с англ. под ред. Ю. Н. Каптуревского. – СПб.: Питер, 2004. – 512 с. [*Mintzberg, H.* Structure in Fives: Designing Effective Organizations. – Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1983. – 312 p.]
 38. *Adizes, I.* Managing Corporate Lifecycles: An updated and expanded look at the Corporate Lifecycles. – The Adizes Institute Publishing, 2004. – 460 p.
 39. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide).* 6th edition. – Project Management Institute, 2017. – 579 p.
 40. *Белов М.В., Новиков Д.А.* Модели деятельности. – М.: Ленанд, 2021. – 220 с. [*Belov, M.V., Novikov, D.A.* Modeli deyatel'nosti. – Moscow: Lenand, 2021. – 220 s. (In Russian)]
 41. *Белов М.В., Новиков Д.А.* Методология комплексной деятельности. – М.: Ленанд, 2018. – 320 с. [*Belov, M.V., Novikov, D.A.* Methodology of Complex Activity: Foundations of Understanding and Modelling. – Cham: Springer, 2020. – 223 p.]
 42. *ISO/IEC/IEEE 24748-1:2018.* Systems and software engineering – Life cycle management – Part 1: Guidelines for life cycle management.
 43. *Гермейер, Ю.Б.* Игры с непротивоположными интересами. – М.: Наука, 1976. – 327 с. [*Germeier, Yu.B.* Igra s neprotivopolozhnymi interesami. – М.: Nauka, 1976. – 327 s. (In Russian)]
 44. *Бурков, В.Н.* Основы математической теории активных систем. – М.: Наука, 1977. – 255 с. [*Burkov, V.N.* Osnovy matematicheskoi teorii aktivnykh sistem. – М.: Nauka, 1977. – 255 s. (In Russian)]
 45. *Новиков Д.А.* Теория управления организационными системами: 3-е изд. – М.: Физматлит, 2012. – 604 с. [*Novikov, D.A.* Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami: 3-e izd. – М.: Fizmatlit, 2012. – 604 s.]
 46. *Bolton, P., Dewatripont, M.* Contract Theory. – Cambridge: MIT Press, 2005. – 740 p.
 47. *Белов М.В.* Согласованное управление многоэлементными динамическими организационными системами. Ч. 1. Динамическая организационная система в составе одного центра и множества агентов // Проблемы управления. – 2020. – № 1. – С. 39–47. [*Belov, M.V.* Incentive-Compatible

- Control in Dynamic Multi-Agent Systems. Part 1. Contracts In Dynamic System With One Principal And Multiple Agents. – Control Sciences. – 2020. – No. 1. – P. 39–47. (In Russian)]
48. Белов М.В. Согласованное управление многоэлементными динамическими организационными системами. Ч. 2. Многоуровневая динамическая организационная система // Проблемы управления. – 2020. – № 2. – С. 36–46. [Belov, M.V. Incentive-Compatible Control in Dynamic Multi-Agent Systems. Part 2. Contracts in Dynamic Hierarchical Multi-Agent System. – Control Sciences. – 2020. – No. 2. – P. 36–46. (In Russian)]
49. Belov, M., Novikov, D. Optimal Enterprise. Structures, Processes and Mathematics of Knowledge, Technology and Human Capital. – CRC Press, 2021. – 344 p.
50. Белов М.В., Новиков Д.А. Управление жизненными циклами организационно-технических систем. – М.: Ленанд, 2020. – 384 с. [Belov, M.V., Novikov, D.A. Upravlenie

zhiznennymi tsiklami organizatsionno-tehnicheskikh sistem. – Moscow: Lenand, 2020. – 384 s. (In Russian)]

51. Dewar, J. Assumption Based Planning a Tool for Reducing Avoidable Surprises. – Cambridge: Cambridge University Press, 2002. – 248 p.

Статья представлена к публикации членом редколлегии чл.-корр. РАН Д.А. Новиковым.

*Поступила в редакцию 25.09.2021,
Принята к публикации 22.11.2021.*

Белов Михаил Валентинович – д-р техн. наук, Сколковский институт науки и технологий, г. Москва,
✉ mbelov59@mail.ru.

OPTIMAL CONTROL OF THE LIFE CYCLE OF COMPLEX SYSTEMS

M.V. Belov

Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia

✉ mbelov59@mail.ru

Abstract. This paper considers optimal decision-making during the life cycle management of complex systems of aerospace, power, nuclear, transport, and other complex entities, capital objects and systems of the power, telecommunications, transport, agriculture, raw material, and other industries as well as information systems. The system-wide peculiarities of the life cycles of complex systems are identified and analyzed. Qualitative formalisms to represent life cycles are proposed; mathematical foundations of the problem of their optimal control are described. A mathematically rigorous optimal control problem for the life cycle of complex products, objects, and systems is stated. An algorithmic solution of the optimal control problem based on the formalisms of dynamic programming is developed. A practical way of applying this algorithm based on the scenario approach is proposed; the conditions of life cycle control optimization (under which optimization is possible) are listed. The results presented below are an optimal control tool for the life cycle of complex products, objects, and systems.

Keywords: optimal control; dynamic programming; life cycles of complex products, objects, and systems.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ СОЦИАЛЬНО-ЭТИЧЕСКИХ НОРМ ПОВЕДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ТЕОРЕТИКО-ИГРОВЫХ ПОДХОДОВ

К.Е. Красников

Аннотация. Представлен обзор теоретико-игровых подходов, позволяющих смоделировать, какое влияние оказывают на развитие некоторого сообщества такие преобладающие среди его представителей нормы поведения, как эгоизм и альтруизм, мораль (на примере императива Канта или золотого правила нравственности), а также изучается вопрос определения эффективности сообщества в зависимости от преобладающего среди его представителей мировоззрения. Для сообществ, представители которых преследуют в какой-то степени соблюдение общественных интересов, а не сугубо личных, исследуется вопрос равновесности точки максимума кооперативного дохода. Эффективность сообществ, представители которых следуют таким нравственным критериям, как императив Канта или золотое правило нравственности, исследуется на примере игровой модели социального выбора между двумя нормами поведения: одной – общепринятой, но устаревшей, и другой – новой, ещё не распространённой, но более передовой и прогрессивной. Полученные результаты могут быть использованы для оценки эффективности проводимой воспитательной работы и государственного планирования в сферах воспитания и образования.

Ключевые слова: теория игр, конфликтные равновесия, моделирование социально-этических норм поведения.

ВВЕДЕНИЕ

Чем руководствуется каждый индивидуум при выборе своей модели поведения? Известны два основных, по сути, противоположных ответа на этот вопрос.

Например, в экономике ещё начиная с работ Адама Смита сложилась традиция полагать, что человеком движет прежде всего интерес максимизации личного дохода. Есть и другой принцип, когда между индивидуумами складываются отношения сотрудничества и взаимопомощи, и они готовы в чём-то поступиться личными интересами для достижения лучшего общего результата. Этот принцип может иметь и экономическую интерпретацию, когда между участниками рассматриваемого процесса нет абсолютного антагонизма, а имеет место некое пересечение интересов и интеграция.

Но также вопрос выбора между двумя указанными моделями поведения (максимизацией личного дохода или же учёта общих интересов) может иметь и более общую и не менее важную

морально-этическую интерпретацию. Ведь вопрос о том, какое влияние оказывают на развитие общества преобладающие среди его представителей этические принципы и жизненные установки, поднимался неоднократно.

В качестве лишь одного примера можно привести работу [1], авторы которой Т.Н. Микушина и М.Л. Скуратовская указывают на кризисное положение в таких сферах, как образование, здравоохранение, экология и др. и связывают такое положение дел не с экономической или политической обстановкой, но со снижающимся уровнем нравственности в обществе.

Однако данный вопрос может быть исследован и с математических позиций. В настоящей работе делается попытка проанализировать, какое влияние оказывают этические принципы, которыми руководствуются индивидуумы, на достижимость наиболее благоприятных ситуаций. При традиционном подходе, когда предполагается, что каждый участник максимизирует лишь собственный доход, точкой равновесия (по Нэшу)

может оказаться далеко не самая выгодная для всех участников ситуация, что иллюстрируется хорошо известным примером – так называемой «дилеммой заключённого».

В модели же, предполагающей, что участники, помимо преследования сугубо личного интереса, с некоторым весовым коэффициентом учитывают интересы других (что моделирует уровень сотрудничества и взаимопомощи между участниками), оказывается, что наиболее выгодная игровая ситуация становится сильным равновесием.

Также в работе исследуется влияние морали (понимаемой здесь в смысле императива Канта или близкого к нему по значению золотого правила нравственности) на процесс принятия решений индивидуумами в некотором человеческом сообществе. Для этого рассматривается игровая модель выбора между двумя нормами поведения: одной – общепринятой, но менее эффективной, и второй – новой, ещё малоизвестной, но при этом более благоприятной для сообщества в целом в случае её повсеместного распространения. Данная модель весьма показательно иллюстрирует, как превалирующие среди представителей сообщества морально-этические нормы могут вести сообщество либо к прогрессу и благополучию, либо, напротив, к упадку и деградации.

Однако, прежде чем приступить к изложению основной части работы, дадим краткий обзор имеющихся в данной области результатов, полученных представителями отечественной и зарубежной научных школ.

1. ОБЗОР МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОЦИАЛЬНО-ЭТИЧЕСКИХ НОРМ ПОВЕДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ТЕОРЕТИКО-ИГРОВЫХ ПОДХОДОВ

Со времён отца-основателя экономической теории Адама Смита [2] было принято считать, что человеком движет прежде всего индивидуалистический мотив максимизации личного благосостояния. Появился даже термин *homo economicus* – «человек рациональный».

Однако даже сам Адам Смит ставил под сомнение эту предпосылку. Например, в работе «Теория нравственных чувств» [3] он уже вводит понятие «симпатии», которое присуще людям и заставляет их порой поступать в ущерб исключительно личным интересам.

В XX в. появилось такое направление, как поведенческая экономика (*behavioral economics*), изучающее, какое влияние оказывают на принятие

решений психологические, морально-этические, когнитивные и культурные факторы. И такой анализ является крайне востребованным, поскольку более реалистично учитывает все аспекты, влияющие на принятие решения человеком, в отличие от ставшей классической, но тем не менее упрощённой и часто довольно грубой модели *homo economicus*.

Поскольку одним из математических инструментов, используемых для анализа экономических явлений, является теория игр, то и в этой области сделано немало для моделирования процессов и явлений, которые, как прежде казалось, были предметом изучения скорее социологии, философии и психологии.

Одна из первых попыток смоделировать морально-этические нормы поведения с помощью теоретико-игровых подходов была предпринята в 1955 г. профессором Р.Б. Брайсвайтом в прочитанной им в Кембридже лекции [4] и с тех пор такие попытки регулярно появляются в работах разных исследователей, занимающихся теорией игр.

Например, нобелевский лауреат Дж. Харсаньи в своей работе «Модели теории игр и принятия решений в этике» [5] утверждает, что этическое (или моральное) поведение основано на понятии коллективной рациональности, которая выходит за рамки традиционной для теории игр концепции максимизации каждым участником сугубо индивидуального или кооперативного дохода: «Теорию рационального поведения в социальной среде можно разделить на теорию игр и этику. Теория игр имеет дело с двумя или более индивидами, часто имеющими очень разные интересы, которые пытаются максимизировать свои собственные (эгоистичные или бескорыстные) интересы рациональным образом против всех других индивидов, которые также пытаются максимизировать свои собственные интересы (эгоистичные или бескорыстные)».

А в работе «Утилитаризм правил и теория принятия решений» [6] Дж. Харсаньи использует основополагающие концепции утилитаризма для построения более реалистичной модели принятия решений индивидуумами в социуме. Утилитаризм – направление в этике, согласно которому моральная или нравственная ценность любого поступка определяется совокупной *полезностью* или пользой, которую этот поступок приносит всем индивидуумам, на которых данное действие оказывает влияние [7]. В этой связи в теоретико-игровой интерпретации Дж. Харсаньи вводит *функцию социальной полезности*, значение которой для каждого участника в каждой точке (каждой стратегии пове-



дения) определяется средним значением полезностей всех участников [5]. Отметим, что более подробно теория полезностей излагается в работе [8].

В настоящее время идеи Дж. Харсаньи были существенно развиты в работах многих современных специалистов по поведенческой экономике (*behavioral economics*) и теории игр [9–11].

Отдельного внимания заслуживает так называемая эволюционная теория игр, являющаяся применением теории игр к исследованию развития популяций в биологии, а также в социологии. Особенностью этой теории является то, что в ней, как правило, рассматриваются повторяющиеся игры и, соответственно, каждая стратегия оценивается по тому, насколько она является эволюционно устойчивой, т. е. способной пройти проверку временем. Например, применительно к биологии различные стратегии представляют собой определяющие поведение особей генетические черты, которые наследуют потомки от своих пращуров. Именно с позиций эволюционной теории игр удалось обосновать нередко наблюдаемые в природе, особенно у социальных видов, примеры «джентльменского» и даже альтруистического поведения, т. е. поведения на благо вида, что никак не согласовалось с дарвиновским предположением о том, что естественный отбор происходит на индивидуальном уровне [12, 13].

В заключение данного весьма краткого и вовсе не претендующего на полноту обзора зарубежной литературы выделим работу С. Дж. Брамса «Теория игр и гуманитарные науки: соединяя два мира» [14], в которой приложением для теоретико-игровых подходов выступают такие гуманитарные дисциплины, как литература, политика, история и даже теология. Через призму задачи о выборе оптимальной стратегии поведения автор рассматривает дилеммы, возникающие перед героями таких классических литературных произведений, как «Гамлет», «Макбет», «Много шума из ничего» и др., а также Библейских преданий об Аврааме, исходе евреев из Египта, сказании о Самсоне и Далиле и др.

Среди работ представителей отечественной научной школы можно привести в пример монографию Ю.Б. Гермейера и И.А. Вателя «Игры с иерархическим вектором интересов» [15]. Рассматривая задачу распределения ресурсов между личными и общественными нуждами, авторы вводят понятие «эгоизма» по отношению к нуждам данного сообщества в том случае, если участник предпочитает тратить все имеющиеся в его распоряжении средства исключительно на личные цели, игнорируя при этом интересы сообщества.

Ряд идей, предложенных Ю.Б. Гермейером и И.А. Вателем, нашёл своё отражение в работах, посвящённых модели согласования общих и частных интересов (СОЧИ-модель) [16, 17]. В этой модели рассматривается двухуровневое сообщество и, как и в работе [15], исследуется вопрос распределения ресурсов между частными и общественными нуждами. При этом в работе [17] вводятся классы «индивидуалистов» и «коллективистов», на которые можно поделить участников задачи в зависимости от того, на личные или общественно полезные цели они предпочитают расходовать свои ресурсы.

Довольно большую известность приобрели и работы В.А. Лефевра, в частности вышедшая под заголовком «Алгебра совести» книга [18]. В данной работе автором моделируется процесс принятия решения человеком в целом и элемент рефлексии или, иначе говоря, анализ субъектом самого себя и других участников ситуации. Данная модель строится на основе булевых функций, вследствие чего множество исходов сводится, по сути, к двум: благоприятному и неблагоприятному. Также и множество допустимых каждым участников стратегий бинарно и представляет собой выбор между «добром» и «злом».

Особого внимания заслуживает разработанная В.И. Жуковским, К.С. Вайсманом и др. концепция равновесия по Бержу, предлагаемая авторами как аналог «эгоистического» равновесия по Нэшу. Авторы вводят новый тип игрового равновесия, отличающегося от классического равновесия по Нэшу тем, что, например, экстремум функции полезности (функции выигрыша) участника ищется не на множестве его допустимых стратегий, а на произведении множеств допустимых стратегий всех остальных участников, что предлагается авторами интерпретировать так: «...каждый игрок направляет все свои усилия, чтобы увеличить выигрыши остальных, «забывая о себе», о собственных интересах» [19].

Интерес представляют и работы Ф.Л. Зака [20, 21]. В работе [21] рассматривается модель альтруистического поведения, предложенную К. Саито [22], а в работе [20] – ещё одна модель принятия решения, основанная на понятии *кантовского равновесия*. Более подробно соответствующие концепции будут рассмотрены далее по тексту в § 5 и 6 соответственно.

В 2017 г. в специализирующемся на теории игр журнале «*Games*» (Базель, Швейцария) вышел специальный выпуск под заголовком «Этика, Мораль и Теория Игр» [10], в котором были собраны статьи разных современных авторов, объединённые

общей тематикой моделирования морально-этических норм и их влияния на принятие решений участниками игровой задачи.

Особенно хочется отметить работу «Стратегии поведения моралистов и альтруистов» [11], которая примечательна тем, что в ней помимо уже отмечавшихся нами типов поведения, основанных на индивидуализме и коллективизме, вводится также третий тип участников, которые руководствуются при выборе своей стратегии поведения императивом Канта, согласно которому, «человек должен стремиться к тому, чтобы максима его поступка могла стать частью всеобщего законодательства» [7], или же золотым правилом нравственности: «Как ты хочешь, чтобы с тобой поступали люди, так и ты поступай с ними» [23]. Суть такого поведения применительно к теоретико-игровой модели сводится к тому, что прежде чем выбрать свою стратегию, каждый участник допускает, что с определённой вероятностью все участники выберут ту же стратегию, и уже исходя из этого допущения принимает решение, как именно следует поступить.

По аналогии с термином *homo economicus* – «человек рациональный», которым именуется первый тип участников-индивидуалистов, руководствующихся исключительно интересом максимизировать свой личный доход, игроки третьего класса именуется в работе [11] *homo moralis* – «человек нравственный».

Этот тип поведения может быть весьма успешно использован для моделирования некоторых социальных, экономических и других процессов, поскольку он в ряде случаев более реалистично описывает процесс принятия решения человеком, нежели классическая модель максимизации (минимизации) собственной платёжной функции.

В настоящей работе на примере задачи на согласование (*coordination game*) рассматривается динамическая модель социального выбора между двумя нормами поведения: одной – традиционной, но менее благоприятной и эффективной, и новой, ещё не применяемой большинством участников. Однако применение новой нормы подавляющей частью представителей рассматриваемого сообщества позволит сообществу в целом достичь гораздо лучших результатов. При этом показывается, что именно игроки класса *homo moralis* способны в каком-то смысле послужить примером, использовать новую норму поведения, даже находясь первое время в меньшинстве и терпя убытки, и тем

самым постепенно вывести общество на принципиально новый качественный уровень.

Однако поскольку в естественных условиях, как показывается в работе, переход на новую норму поведения может не произойти, рассматривается также модель обучения, предполагающая, что уровень морали и «сознательности» в сообществе в результате некоторой просветительской деятельности повышается по определённому закону. Это приводит к тому, что всё большее количество индивидуумов переходит на новую норму поведения и постепенно она становится общепринятой в обществе, что ведёт сообщество к несомненному прогрессу.

2. МОДЕЛЬ

В данной работе рассматривается игровая модель с числом участников N , предполагающая, что все участники выбирают свои стратегии из одного и того же множества допустимых стратегий.

Допущение 1. Пусть Q – метрическое пространство, G – компактное множество: $G = Q^{\Delta N} = \underbrace{Q \times \dots \times Q}_N$.

Пусть на множестве G определены непрерывные функции (функционалы) $J_i(q)$, $i = \overline{1, N}$, $q = (q_1, \dots, q_N) \in G$; q_i – стратегия i -го игрока, $q_i \in Q$, $q^i = (q_1, \dots, q_{i-1}, q_{i+1}, \dots, q_N)$ – стратегии остальных $N - 1$ игроков при фиксированной стратегии q_i i -го игрока, $q^i \in Q^{N-1}$; $J_i(q)$ – платёжная функция (функционал) игрока i , которая определяет размер некоего блага или ресурса, который получает i -й участник при выборе им стратегии q_i и при выборе стратегии q^i остальными участниками. При этом функции $J_i(q)$, $i = \overline{1, N}$ предполагается рассматривать как *трансферабельные*, то есть предполагающие возможность любого деления и распределения дохода между игроками. Отметим, что применение механизмов управления организационными системами с трансферабельными функциями полезности подробно рассматривается в обзоре [24].

Пусть $G(q_i)$ и $G(q^i)$ – сечения (срезы) множества G при фиксированной стратегии i -го игрока (q_i) или всех игроков, кроме i -го (при обстановке q^i), соответственно.



Пусть $J(q) = \sum_{k=1}^N J_k(q)$ – суммарная платёжная функция всех игроков, $J^i(q) = \sum_{k \neq i}^N J_k(q)$ – суммарная платёжная функция всех игроков, кроме i -го.

Определение 1. Игровую задачу, удовлетворяющую допущению 1, будем называть классической игрой (или игрой Γ), если каждый из игроков, выбирая стратегию $q_i \in Q$, стремится обеспечить максимум своей платёжной функции $J_i(q_i, q^i)$. ♦

Это классическая постановка задачи теории игр, моделирующая поведение, основанное на преследовании исключительно личных интересов. Чтобы отразить тот факт, что каждый игрок максимизирует лишь собственную платёжную функцию, и обозначить её отличие от модели, определяемой в следующих пунктах, будем называть её также моделью участников-«индивидуалистов» или же моделью *homo economicus*, как она называется в работе [11].

В качестве альтернативы рассматривается класс игровых задач, в которых предполагается, что каждый игрок с некоторым весовым коэффициентом учитывает интересы других участников задачи. Данный факт моделируется переходом от первоначально поставленной задачи, характеризующейся набором платёжных функций $\{J_i, i = \overline{1, N}\} = \{J_i\}$, к вспомогательной задаче, определяемой параметрическим семейством функций полезности $\{U_i(J_k, \alpha)\} = \{U_i\}$.

Определение 2. Игровую задачу, удовлетворяющую допущению 1, будем называть игрой Γ^α (или игрой в классе участников-«альтруистов»), если каждый из игроков стремится обеспечить максимум своей функции полезности U_i , которая выражается через платёжную функцию данного игрока $J_i(q)$ и суммарную платёжную функцию остальных игроков $J^i(q)$ так:

$$U_i(q) = (1 - \alpha)J_i(q) + \frac{\alpha}{N-1}J^i(q), \quad q \in G, \quad \alpha \in \mathbb{R},$$

$$\alpha \in \left[0, \frac{N-1}{N}\right], \quad i = \overline{1, N}. \quad \blacklozenge \quad (1)$$

Мы используем термин «функция полезности» для U_i , чтобы подчеркнуть переход от первоначальных платёжных функций $J_i(q)$, на которых сформулирована задача, к некоторым новым, вообще говоря, искусственного сконструированным целевым функциям, призванным смоделировать

особый вид рациональности или логики принятия решения агентом.

Термин «альтруизм» (от лат. *alter* – другой) использован для обозначения данного типа игровых задач с целью подчеркнуть особый вид рациональности или логики принятия решений игроками данного класса: они учитывают с некоторым весовым коэффициентом интересы других участников. В работе [15] подобный тип рациональности называется *коллективизмом*, а подобный вид поведения принято называть *просоциальным*.

Воспользуемся заменой $\beta = \alpha \frac{N}{N-1}$. Поскольку $\alpha \in \left[0, \frac{N-1}{N}\right]$, то $\beta \in [0, 1]$, и функцию полезности $U_i(q)$ можно записать в виде

$$U_i(q) = (1 - \beta)J_i(q) + \frac{\beta}{N}J(q), \quad \beta \in [0, 1]. \quad (2)$$

В такой форме модель, определяемую функциями полезности (2), можно рассматривать как *игру на общественное благо (public goods game)*, где функции $\beta J_i(q)$ определяют взнос i -го участника, который он делает на некоторые общественно значимые нужды. Слагаемое $(1 - \beta)J_i(q)$ определяет ту часть ресурса, которую он оставляет для собственных нужд, а сумма $\frac{\beta}{N}J(q)$ определяет то, что он получает от общества.

В разных игровых задачах бывает удобно пользоваться разными представлениями функции U_i . Например, в задачах с двумя участниками, т. е. когда $N = 2$, формула (1) приобретает вид: $U_i(q) = (1 - \alpha)J_i(q) + \alpha J^i(q)$, что весьма удобно для использования. В задачах же со многими участниками удобнее пользоваться выражением (2), для которого и получены основные результаты в данной работе.

Отметим, что приём замены исходных целевых функций для каждого из участников некими новыми функциями, представляющими собой линейную комбинацию исходных целевых функций остальных участников, применяется и в теории активных систем для решения задач *критериального управления*, рассматриваемых, в частности, В.Н. Бурковым, Д.А. Новиковым и соавторами в работах [25, 26]. Поскольку для активных элементов, составляющих активную систему, индивидуальная рациональность (выгода) может отличаться от коллективной, то при наличии некоторого третьего лица (центра), заинтересованного в достиже-

нии именно наибольших коллективных результатов и наделённого соответствующими полномочиями, первоначальные индивидуальные целевые функции игроков заменяются линейными комбинациями целевых функций остальных участников, что отражает требование, предъявляемое к активным элементам: работать сообща на общий результат, критерий эффективности которого определяется центральным управляющим органом, вследствие чего становится возможно определить коэффициенты в линейной комбинации.

Также отметим вывод, к которому приходят в заключении авторы обзорной работы по современному состоянию дел в области согласования интересов [24]: «Эффективность функционирования социально-экономических систем не может быть обеспечена без согласования интересов участников системы».

3. СИСТЕМА КОНФЛИКТНЫХ РАВНОВЕСИЙ

Прежде всего, дадим определение классического равновесия по Нэшу с учётом введённых выше обозначений.

Определение 3. Ситуацию $q^* \in G$ назовём равновесием по Нэшу (\bar{C}^N -экстремальной), если

$$\max_{q_i \in G(q^*)} J_i(q^*, q_i) = J_i(q^*), \quad i = \bar{1}, N, \quad (3)$$

где $q^i = (q_1, \dots, q_{i-1}, q_{i+1}, \dots, q_N)$. ♦

Максимум в выражении (3) берётся по всем допустимым стратегиям i -го участника q_i из сечения множества G с зафиксированными в равновесной ситуации q^* стратегиями остальных участников (обстановке) q^{i*} .

Однако данное равновесие обладает рядом недостатков: оно существует далеко не всегда и даже когда существует, может определять далеко не самую выгодную для всех участников задачи ситуацию (что будет продемонстрировано на разбираемом ниже примере). Поэтому, помимо этого ставшего классическим равновесия, в работе используется также система конфликтных равновесий, разработанная Э.Р. Смольяковым [27, 28]. Данная система представляет собой набор усиливающихся равновесий, самое слабое из которых существует в любой игровой задаче, удовлетворяющей допущению 1. Таким образом, для любой такой задачи можно найти наиболее сильное из существующих равновесий, что и будет являться её решением.

Ниже приводятся определения некоторых базовых равновесий данной системы.

Определение 4. Ситуацию (точку) $q^* \in G$ назовём A_i -экстремальной, если или $G(q^{i*}) = q_i^*$, или каждой стратегии $q_i \in G(q^{i*}) \setminus q_i^*$ i -го игрока можно поставить в соответствие по крайней мере одну ответную стратегию $\hat{q}^i = \hat{q}^i(q_i)$ остальных $N-1$ игроков, такую, чтобы

$$J_i(\hat{q}^i, q_i) \leq J_i(q^i).$$

Обозначая через A_i множество всех A_i -экстремальных ситуаций, ситуацию (точку) $q^* \in G$ назовём ситуацией симметричного слабого активного равновесия или, короче, A -равновесием, если $q^* \in A_1 \cap \dots \cap A_N = A$. ♦

Запись $\hat{q}^i(q_i)$ обозначает, что остальные участники выбирают свою ответную стратегию \hat{q}^i как реакцию на выбор стратегии q_i i -м участником в том случае, если он решит отклониться от равновесной стратегии $q_i^*(q_i \in G(q^*) \setminus q_i^*)$.

Проще говоря, смысл равновесия, задаваемого определением 4, заключается в том, что если i -й участник пожелает отклониться от своей равновесной стратегии q_i^* , выбрав какую-то другую допустимую для него в данной игровой ситуации стратегию q_i (в погоне за более высоким значением своей платёжной функции J_i), то остальные участники могут «наказать» отступника ответной стратегией $\hat{q}^i(q_i)$, в результате чего i -й участник получит не больше, чем он получил бы в равновесной игровой ситуации q^* . Поэтому ситуация q^* и называется равновесной в том смысле, что ни одному из участников не выгодно отклоняться от неё, поскольку иначе они рискуют быть «наказанными» остальными игроками.

Симметричное A -равновесие является самым слабым из предлагаемой к рассмотрению системы конфликтных равновесий. В работе [27] доказывается, что данное равновесие существует во всяком случае в любой ε -аппроксимации, $\forall \varepsilon > 0$, в любых игровых задачах, удовлетворяющих довольно общим допущениям 1. Поскольку при численном решении реальных задач равновесные ситуации ищутся приближённо, то для приложений неважно, окажется ли ситуация q^* точным A -равновесием или же равновесной с допустимой точностью ε , где ε – сколь угодно малое число. Таким образом, введение данного равновесия решает проблему существования решения игровой задачи.



Однако, как правило, A -равновесные ситуации оказываются не единственными. Поэтому следующие понятия определяют естественные усиления (сужения) множества A -равновесий.

Определение 5. Ситуацию (точку) $q^* \in A_i$ назовём B_i -экстремальной, если она удовлетворяет условию

$$\max_{q^i \in A_i(q_i^*)} J^i(q_i^*, q^i) = J^i(q^*). \quad (4)$$

Назовём ситуацию $q^* \in B$ -равновесием, если $q^* \in \bigcap_{i=1}^N B_i = B$, где B_i – множество всех B_i -экстремальных ситуаций. ♦

Логика построения B -равновесия такова, что каждый из участников, отобрав для себя круг игровых ситуаций, от которых ему невыгодно отклоняться ввиду наличия угроз уменьшения выигрыша (множества A_i -равновесных ситуаций), предоставляет теперь остальным участникам возможность выбрать на этом множестве наилучшие для них игровые ситуации. Тем самым равновесная ситуация становится более устойчивой по отношению к отклонениям от неё участников задачи.

Поэтому в выражении (4) выбирается наилучшая для остальных участников ситуация в сечении множества A_i фиксированной в равновесной точке стратегией i -го участника q_i^* .

Равновесие, задаваемое следующим определением, является одним из возможных усилений B -равновесия.

Определение 6. Ситуацию (точку) $q^* \in A_i$ назовём C_i -экстремальной, если она удовлетворяет условию

$$\max_{q^i \in G(q_i^*)} J^i(q_i^*, q^i) = J^i(q^*). \quad (5)$$

Ситуацию $q^* \in G$ назовём C -равновесием, если $q^* \in \bigcap_{i=1}^N C_i = C$, где C_i – множество всех C_i -экстремальных ситуаций. ♦

Отличие B - и C -равновесий заключается в том, что при поиске B -равновесия i -й участник предлагает остальным выбрать наилучшие для себя ситуации на множестве A_i -экстремальных ситуаций (максимум в выражении (4) берётся по сечению $A_i(q_i^*)$). Тогда как при поиске C -равновесия остальным участникам в выражении (5) предлагается выбрать наилучшую ситуацию на всём сечении игрового множества $G(q_i^*)$, что делает C -равновесие более устойчивым к отклонениям участников, нежели B -равновесие.

В играх двух лиц C -равновесие и равновесие по Нэшу совпадают.

Дадим ещё несколько определений, усиливающих соответственно B - и C -равновесия.

Определение 7. Ситуацию $q^* \in B_i$ назовём \bar{D}_i -экстремальной, если она удовлетворяет условию

$$\max_{q \in B_i} J_i(q) = J_i(q^*) \quad (6)$$

или (то же самое, только в развёрнутом виде) условию

$$\max_{q_i \in Pr_{Q_i, A_i}} J_i \left(\text{Arg} \max_{q^i \in A_i(q_i)} J^i(q_i, q^i) \right) = J_i(q^*)$$

и назовём её \bar{D} -равновесием, если $q^* \in \bigcap_{i=1}^N \bar{D}_i = \bar{D}$. ♦

Данное понятие равновесия усиливает введённое выше понятие C -равновесия.

Смысл его заключается в том, что после того, как все участники, кроме i -го, отобрали для себя наиболее выгодные ситуации в сечениях множества $A_i(q_i)$, для каждой допустимой стратегии i -го участника (множество B_i -экстремальных ситуаций, аргумент функции J_i в выражении (6)) i -й участник выбирает стратегию (из проекции множества A_i на множество его допустимых стратегий $Q_i = Pr_{Q_i, A_i}$), доставляющих максимум целевому функционалу J_i .

Аналогичный смысл имеет даваемое ниже определение D -экстремальных ситуаций, с той лишь разницей, что выбор i -м игроком производится не на множестве B_i , а на множестве C_i .

Определение 8. Ситуацию $q^* \in C_i$ назовём D_i -экстремальной, если она удовлетворяет условию

$$\max_{q \in C_i} J_i(q) = J_i(q^*),$$

и назовём её D -равновесием, если $q^* \in \bigcap_{i=1}^N D_i = D$. ♦

В качестве примера рассмотрим использование данных равновесий для обоих классов игроков Γ и Γ^a .

4. СРАВНЕНИЕ РАЗНЫХ СИСТЕМ КОНФЛИКТНЫХ РАВНОВЕСИЙ

Отметим, что приведённый здесь принцип угроз и контругроз в разных вариациях используется и в других системах конфликтных равновесий, в частности, в концепции *равновесий в безопасных стратегиях* (РБС), предложенной и разрабатываемой М.Б. Исаковым и соавторами в работах [29, 30] и др.

Одним из ключевых понятий в этой концепции является понятие угрозы i -му игроку со стороны j -го в какой-то игровой ситуации $q \in G$.

Угрожающей называется такая ситуация (q_j^i, q^j) , что $J_j(q_j^i, q^j) \geq J_j(q)$, а $J_i(q_j^i, q^j) < J_i(q)$ [29].

Отметим два момента.

- В концепции РБС предполагается, что игроки угрожают друг другу по отдельности. То есть, например, возможность двух игроков совместно выбрать такую ситуацию, чтобы третий был «наказан», угрозой не считается. В работе [30] отмечено, что построение конструкции, аналогичной РБС для коалиционного взаимодействия, «пока представляется затруднительным». Из приведённого же здесь определения A -равновесия следует, что остальные игроки могут создавать угрозы коллективно (в виде общей стратегии $\hat{q}^i = \hat{q}^i(q_i)$ остальных участников в ответ на стратегию q_i i -го участника).

- При построении A -равновесия предполагается, что игроки могут угрожать друг другу даже в ущерб себе, иначе говоря, отсутствует требование $J_j(q_j^i, q^j) \geq J_j(q)$, которое означает, что в угрожающей ситуации (q_j^i, q^j) значение платёжной функции угрожающих игроков должно быть больше чем в ситуации $q \in G$, содержащей угрозу.

Отсутствие этого требования объясняется тем, что, вообще говоря, между игроками могут существовать какие-либо договорённости и скрытые коалиции, и кто-то может пожертвовать собой, закрыть, так сказать, грудью амбразуру – пойти на уменьшение собственной целевой функции, чтобы его команда в итоге победила. Но, как уже отмечалось выше, коллективное взаимодействие в РБС не рассматривается.

Ввиду перечисленных особенностей эти две системы проблематично сопоставить, поскольку, например, некая A -равновесная ситуация может содержать угрозы со стороны других игроков и поэтому не будет являться простым РБС (порядок безопасности 0 [29, 30]).

РБС же более высоких порядков может содержаться во множестве A -равновесных ситуаций, как, например, это имеет место быть в следующей матричной игровой задаче из работы [30]:

$$J_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, J_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix};$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} + & + \\ + & . \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} + & . \\ + & + \end{bmatrix}, A = A_1 \cap A_2 = \begin{bmatrix} + & . \\ + & . \end{bmatrix};$$

$$B_1 = (a_{11}, a_{21}), B_2 = (a_{21}, a_{22}), B = \{a_{21}\};$$

$$C_1 = \{a_{11}\}; C_2 = \{a_{21}\}; C = \emptyset;$$

$$\bar{D}_1 = \{a_{21}\}; \bar{D}_2 = \{a_{22}\}; \bar{D} = \emptyset.$$

Таким образом, сильнейшим игровым равновесием из приведённых является $B = \{a_{21}\}$. В этой ситуации, кстати, достигается и максимум кооперативного дохода.

Простым РБС же здесь оказывается не самая выгодная для обоих участников ситуация a_{11} , однако РБС первого порядка будет уже a_{21} (см. работу [30]).

Отметим, что помимо различий, у сравниваемых систем прослеживается общий итеративный принцип построения. Например, если на начальной (нулевой) итерации мы бы не нашли ни одного равновесия более сильного, нежели равновесие A , то нам пришлось бы рассмотреть следующую итерацию (первую), которая отличалась бы тем, что в качестве множества допустимых игровых ситуаций мы рассматривали бы не всё множество G , а лишь его подмножество A -равновесных ситуаций. И для этой новой игровой задачи мы бы нашли соответствующие равновесия A^1, B^1, C^1, D^1 . Этот процесс можно продолжать до тех пор, пока на очередном шаге не найдено достаточно сильное равновесие. Аналогично и в концепции РБС мы ищем равновесия нулевого, первого и так далее порядков.

Ещё одним примером итеративной процедуры поиска равновесной ситуации является концепция *двойного наилучшего ответа*, описываемая в работе Н.И. Базенкова [31], однако алгоритм нахождения равновесия, описанный в этой работе, останавливается после второй итерации.

В заключение заметим, что в работе [30] М.Б. Исаков, рассматривая систему конфликтных равновесий Э.Р. Смольякова, предполагает, что РБС может быть включено в эту систему как одно из равновесий среди A, B, C, D и др.

5. СУЩЕСТВОВАНИЕ КОНФЛИКТНЫХ РАВНОВЕСИЙ В КЛАССЕ Γ^a

Ещё раз приведём обозначения, введённые в допущении 1:

– суммарную платёжную функцию игроков в исходной игре G будем обозначать

$$J(q) = \sum_{i=1}^N J_i(q) \quad q \in G;$$



– суммарная платёжная функция всех игроков кроме i -го: $J^i(q) \triangleq \sum_{k \neq i} J_k(q)$;

– функция полезности i -го игрока в игре Γ^α : $U_i(q) \triangleq (1-\alpha)J_i(q) + \frac{\alpha}{N-1} \sum_{k \neq i} J_k(q)$ $q \in G$.

Определение 9. Будем говорить, что в игровой ситуации $q^* \in G$ достигается максимум суммарной платёжной функции J , если $\forall q \in G, q \neq q^* : J(q^*) \geq J(q)$. ♦

Исходя из допущения 1, $J_i(q)$ – непрерывные функции, определённые на G – компактном множестве, заданном в произведении $Q_1 \times \dots \times Q_N$ метрических пространств $Q_i, i = \overline{1, N}$. Из чего можно сделать вывод, что и их сумма – суммарная платёжная функция $J(q) = \sum_{i=1}^N J_i(q)$ – является непрерывной функцией на множестве G .

Поскольку непрерывная функция достигает на компактном множестве своих точной верхней и нижней граней, то функция J достигает своего максимального значения на множестве G .

Сформулируем теорему существования равновесия по Нэшу в игровых задачах, удовлетворяющих допущению 1. Будем обозначать через $\Gamma^{\alpha_{NE}}$ игровые задачи типа Γ^α , в которых коэффициент α принимает значения α_{NE} .

Теорема. Пусть в игровой задаче, удовлетворяющей допущению 1, в ситуации q^* достигается максимум суммарной платёжной функции. Тогда

существует $\alpha_{NE} \in \mathbb{R}, \alpha_{NE} \in \left[0, \frac{N-1}{N}\right]$ такое, что:

– в игре $\Gamma^{\alpha_{NE}}$ ситуация q^* будет равновесием по Нэшу (\bar{C}^N -экстремальной),

– $\forall \alpha \in \left[\alpha_{NE}, \frac{N-1}{N}\right]$ в игровой задаче класса Γ^α ситуация q^* также будет равновесной по Нэшу.

Доказательство теоремы 1 приводится в приложении. Аналогичным образом могут быть сформулированы и доказаны аналогичные теоремы существования для других введённых понятий равновесия (B, C, D).

Из сформулированной теоремы можно сделать вывод: в игровой задаче Γ^α , которая моделирует наличие элемента сотрудничества, взаимной интеграции между участниками, при определённом

значении коэффициента $\alpha = \alpha_{NE}$ наиболее выгодная ситуация (т. е. та, в которой достигается максимум кооперативного дохода) становится равновесной (по Нэшу). И при всех α , больших данного значения, эта ситуация остаётся равновесием.

Понятно, что в неантогонистических играх, предполагающих возможность кооперации между участниками, стороны могут договориться о выборе соответствующих стратегий, реализующих ситуацию максимума кооперативного дохода, даже если она не является равновесием. Сказанное верно при одном условии: стороны смогут договориться о справедливом разделе кооперативного дохода, обладающем свойством устойчивости, т. е. ни один игрок не пожелает от него уклониться. К сожалению, классическая теория кооперативных игр не даёт такого решения.

Тем не менее, подходы, используемые в теории поиска справедливого дележа кооперативного дохода, могут быть применены для определения значений коэффициентов α . В работе «Справедливый делёж в кооперативных играх» [32] Э.Р. Смольяков предлагает способ раздела кооперативного дохода коалиции из N участников P_N , который достигается в некоторой игровой ситуации q^0 , пропорционально значениям платёжных функций участников коалиции в точке наисильнейшего равновесия q^* (которая предполагается единственной). Основные равновесия, используемые для нахождения наисильнейшего, мы определили в предыдущем разделе. Их различные модификации определены в работе [27]. В работе [32] также приводится схема связей между равновесиями, позволяющая всегда выделить наисильнейшее равновесие из существующих в игре.

При этом раздел кооперативного дохода $J_{P_N}(q^0) = \sum_{k \in P_N} J_k(q^0)$ коалиции P_N в точке максимального дохода коалиции q^0 выглядит так: $x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_N = J_{P_N}(q^0)$, где x_i – доход i -го участника.

При этом $x_i = \gamma_i \cdot J_{P_N}(q^0)$, где

$$\gamma_i = \frac{J_i(q^*)}{J_{P_N}(q^*)} = \frac{J_i(q^*)}{\sum_{k \in P_N} J_k(q^*)}, i = 1, 2, \dots, N. \quad (7)$$

При этом из вида выражения (7) следует, что $\sum_{k \in P_N} \gamma_k = 1$.

Для гетерогенных сообществ (т. е. тех, в которых значение коэффициента α для разных участ-

ников может отличаться) функции полезности $U_i(q)$ (2) могут быть представлены в виде

$$U_i(q) = (1 - \gamma_i)J_i(q) + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N J_k(q) \gamma_k, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (8)$$

где значение коэффициента γ_i для каждого участника определяется согласно формуле (7) как доля значения целевой функции i -го участника J_i от кооперативного дохода $J(q^*) = \sum_{i=1}^N J_i(q^*)$,

т. е. $\gamma_i = \frac{J_i(q^*)}{J(q^*)}$ в точке q^* , в которой достигается

сильнейшее равновесие.

Отметим, что функции полезности в форме (2) и (8), по сути, задают правило распределения средств в рассматриваемом сообществе. Например, в работе Ф.Л. Зака «О некоторых моделях альтруистического поведения» [33] функция, подобная (8), используется для построения модели налогообложения. Если $J_i(q)$ интерпретировать как доход i -го участника, а γ_i – как налоговую ставку, то первое слагаемое в выражениях (8) представляет собой средства, оставшиеся у i -го участника после уплаты налогов.

Второе слагаемое в формуле (8) выражает размер получаемых каждым индивидуумом общественных благ, в данном случае одинаково распределённых между всеми членами сообщества. Недостатком такого вида распределения ресурсов в сообществе является то, что, как подчёркивает Ф.Л. Зак, равновесная по Нэшу ситуация оказывается неэффективной, т. е. может быть далека от ситуации, в которой достигается максимум кооперативного для всех участников дохода. Это происходит, поскольку каждый агент предполагает, что затраченные им усилия мало влияют на размер получаемых им общественных благ.

Конечно, вопрос справедливого распределения ресурсов в сообществе выходит за рамки чистой математики в область социологии, экономики и даже философии. Так, если принять во внимание тезис, предлагаемый некоторыми мыслителями, в частности, в работе [34], о том, что размер общественных благ, который причитается индивидууму, должен быть пропорционален вкладу, который данный индивидуум в эти самые общественные блага вносит, функцию $U_i(q)$ можно записать в виде

$$U_i(q) = (1 - \gamma_i)J_i(q) + \gamma_i \sum_{k=1}^N J_k(q) \gamma_k, \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

Разница с выражением (8) здесь в том, что суммарные блага $\sum_{i=1}^N J_i(q) \gamma_i$ распределяются между участниками сообщества не поровну, а пропорционально γ_i – доле вклада i -го участника в кооперативный доход $J(q^*)$ в точке сильнейшего равновесия.

В качестве выхода из затруднения Ф.Л. Зак предлагает рассмотреть несколько иной, отличный от нэшевского механизм определения равновесной ситуации, основанный на так называемом *кантовском равновесии*. Близкая по смыслу модель будет рассмотрена нами в следующем разделе.

6. МОДЕЛИРОВАНИЕ МОРАЛИ В СМЫСЛЕ СЛЕДОВАНИЯ ЗОЛОТОМУ ПРАВИЛУ НРАВСТВЕННОСТИ ИЛИ ИМПЕРАТИВУ КАНТА

Переходя к рассмотрению третьей модели, отметим, что у типов поведения и принятия решения, задаваемых определениями 1 и 2, есть нечто общее. Как игроки-индивидуалисты, так и игроки-коллективисты (или альтруисты, как их называют в ряде работ) несколько неразборчивы в средствах: если первые преследуют исключительно личный интерес, то вторые с некоторым весовым коэффициентом заботятся и об общественном благосостоянии. Однако, поскольку согласно допущению 1 множество возможных стратегий (действий) у всех участников одинаковое (Q), то игроки обоих классов не учитывают при выборе своей стратегии, что произойдёт в случае, если остальные участники выберут ту же стратегию. Однако такой анализ осуществляют игроки третьего класса – *homo moralis*, «человек нравственный», как он именуется в работах [11, 35].

В основе типа поведения, соответствующего данному классу, лежит известный этический принцип – категорический императив Канта: «*поступай так, чтобы максима твоей воли могла бы быть всеобщим законом*» [36]. Близкий по смыслу принцип известен в этике как золотое правило нравственности: «*Поступай с другими так, как желаешь, чтобы другие поступали с тобой*» [37].

В работах [11, 35] данный принцип предлагает моделировать следующим образом. Пусть i -й



участник предполагает, что каждый из оставшихся игроков с вероятностью $k_i \in [0, 1]$ (которую можно воспринимать как уровень морали данного участника) выберет ту же стратегию, что и он, и с вероятностью $(1 - k_i)$ – отличную стратегию. Таким образом, каждый участник, выбирая стратегию $q_i \in Q$, получает известную из теории вероятностей схему Бернулли из $N - 1$ испытания (соответствующих оставшимся игрокам) и с двумя исходами для j -го испытания, $j = \overline{1, N - 1}$: j -м участником выбрана стратегия $q_j = q_i$ или же выбрана другая стратегия ($q_j \neq q_i$). При этом вместо первоначальных платёжных функций игра проводится на функциях полезности, которые для каждого игрока представляют собой математические ожидания описанного биномиального распределения.

Определение 10. Игровую задачу, удовлетворяющую допущению 1, будем называть игрой Γ^{hm} (игрой в классе участников-«моралистов»), если каждый из игроков вместо своей первоначальной платёжной функции J_i стремится обеспечить максимум функции полезности W_i , определяемой как математическое ожидание случайной величины $J_i(q_i, \tilde{q}^i)$:

$$W_i(q_i, q^i) = \mathbb{E}_{k_i}[J_i(q_i, \tilde{q}^i)], \quad q_i \in Q, \\ k_i \in \mathbb{R}, \quad k_i \in [0, 1], \quad i = \overline{1, N}, \quad (9)$$

где \tilde{q}^i – случайный $(N - 1)$ -мерный вектор, принимающий значения из множества Q^{N-1} и имеющий такое распределение: с вероятностью $k_i^m(1 - k_i)^{N-m-1}$ ровно $m \in \{0, \dots, N - 1\}$ из его компонент принимают значение равное q_i , а остальные компоненты сохраняют свои первоначальные значения. ♦

Отметим, что для каждого m имеется $\binom{N-1}{m} = C_{N-1}^m$ способов выбрать m из $N - 1$ компоненты q^i .

Отметим также, что при $k_i = 0$ ненулевая (а единичная, т. е. полная) вероятность будет только у одного значения случайного вектора $\tilde{q}^i = q^i$. То есть случайный вектор принимает единственное значение – то, которое стоит в аргументе функции W_i . В этом случае $W_i(q_i, q^i) \equiv J_i(q_i, q^i)$, т. е. игроки класса *homo moralis* с нулевым значением коэффициента k_i фактически являются участниками-индивидуалистами первого класса Г. Более нагляд-

но это будет продемонстрировано в рассматриваемой ниже модели социального выбора.

Например, для игры трёх лиц функция полезности (9) приобретает вид:

$$W_i(q_i, q_j, q_k) = (1 - k_i)^2 J_i(q_i, q_j, q_k) + \\ + k_i(1 - k_i) J_i(q_i, q_i, q_k) + \\ + k_i(1 - k_i) J_i(q_i, q_j, q_i) + k_i^2 J_i(q_i, q_i, q_i).$$

Наоборот, при $k_i = 1$ данная модель принятия решения фактически будет идентичной предложенной впервые Дж. Дж. Лаффоном [38] и развитой впоследствии Дж. Рёмером [39, 40] модели кантовского равновесия. При кантовской оптимизации игроки спрашивают себя: «Если я отклонюсь от своей стратегии и все другие участники аналогичным образом отклонятся от своих стратегий, то предпочту ли я новое состояние?» [33].

7. СОЦИАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ВЫБОРА МЕЖДУ ДВУМЯ ПОВЕДЕНЧЕСКИМИ НОРМАМИ

В качестве простого примера игры на согласование рассмотрим следующую задачу. Пусть семейная пара должна принять решение, как провести вечер: пойти в гости или остаться дома. При этом значение платёжных матриц больше в диагональных элементах, которым соответствует то обстоятельство, что пара проводит вечер вместе (в гостях или дома). Таблица иллюстрирует платёжную матрицу данной задачи, где в скобках указаны значения выигрыша для каждой из сторон. Нетрудно видеть, что данная задача имеет два равновесия по Нэшу в случае, если супруги примут решения провести вечер вместе: в гостях или дома. Причём ситуация «пойти вдвоём в гости» является эффективной по Парето по отношению к ситуации «остаться вдвоём дома».

Задача «Семейный выбор»

	Пойти в гости	Остаться дома
Пойти в гости	(10, 10)	(0, 0)
Остаться дома	(0, 0)	(5, 5)

Отметим также, что игры на согласование имеют и массу экономических приложений, что показывается в работе [5].

Теперь перейдём к рассмотрению игры на согласование, описанной в работе [2] и представляющей собой социальную модель вы-

бора в задаче со многими участниками. Пусть N участников некоторого сообщества независимо друг от друга делают выбор между двумя нормами поведения (стратегиями) A и B . Причём норма A является более эффективной, чем норма B в том смысле, что если все индивидуумы перейдут на норму A , то благосостояние (в широком смысле этого слова) каждого участника будет выше, чем в случае, когда все выбирают норму B . Однако норма B является общепринятой, поэтому в начале рассматриваемой социальной модели все участники выбирают норму B , а норма A является для них новой.

Например, нередко мы сталкиваемся с тем, что молодые люди, проходя процесс социализации, оказываясь в новых социальных группах (однокурсники, друзья, однокурсники и т. д.), перенимают от некоторых представителей этих групп не всегда полезные привычки. Но бывают и обратные примеры. Представим себе компанию знакомых, зависимых от какой-либо вредной привычки. Если кому-то из этой компании удаётся расстаться с этой привычкой, то первое время он испытывает определённый дискомфорт, поскольку становится своего рода «белой вороной». Однако постепенно примеру этого человека начинают следовать другие и, начиная с некоторой критической доли отказавшихся, уже на тех, кто подвержен вредной привычке, начинают «косо смотреть». Постепенно и в обществе в целом начинает изменяться отношение к этой вредной привычке: вводится запрет на её рекламу в СМИ, запрещается продажа несовершеннолетним и т. д. Таким образом, изменение отношения в обществе и всё усиливающиеся ограничения делают следование вредным привычкам всё более и более сложным, пока, наконец, здоровый образ жизни не становится нормой. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению различных заболеваний, рождению более здоровых детей, укреплению генофонда – одним словом, переход на новую норму поведения оказывает весьма позитивное воздействие на развитие сообщества в целом. Можно привести массу других аналогичных примеров.

Постараемся выяснить, при каких условиях общество способно будет перейти с менее эффективной, старой нормы B на более эффективную новую норму A . Для этого сформулируем описанную модель в терминах игровой задачи. Сначала рассмотрим статический случай, а потом исследуем, как будет вести себя модель в динамике.

Пусть $q_i \in Q = \{0, 1\}$ – выбор i -го участника, где $q_i = 1$ означает, что выбрана норма A , а $q_i = 0$ – что выбрана норма B . Если i -й участник выбирает

норму A , и n_A других участников выбирают эту же норму, то платёжная функция i -го участника принимает значение $a n_A$. Если же он выбирает норму B и n_B других участников поступает так же, то значение его функции полезности равно $b n_B$. Будем полагать, что $0 < b < a$.

В модели участников-индивидуалистов Γ платёжные функции выглядят так:

$$J_i(q_i, q^i) = a q_i \sum_{\substack{j=1, \\ j \neq i}}^N q_j + b(1 - q_i) \sum_{\substack{j=1, \\ j \neq i}}^N (1 - q_j), \quad (10)$$
$$q_i \in Q, q^i \in Q^{N-1}.$$

Для участников-коллективистов Γ^α функция полезности принимает вид:

$$U_i(q_i, q^i) = (1 - \alpha) J_i(q_i, q^i) + \frac{\alpha}{N-1} \sum_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^N J_k(q_k, q^k), \quad q_i \in Q, q^i \in Q^{N-1}, \quad (11)$$

где J_i и J_k определяются формулой (10),

$\alpha \in \left[0, \frac{N-1}{N}\right]$ – параметр, определяющий в какой

степени каждый индивидуум отдаёт предпочтение общественным интересам. При $\alpha = 0$ функции (10) и (11) становятся эквивалентными: $J_i \equiv U_i$. Нетрудно видеть, что как для первого класса игроков, так и для второго вне зависимости от значения коэффициента α в задаче будут две равновесные по Нэшу ситуации: либо когда все участники выбирают норму A : $q = (1, \dots, 1)$, либо когда все выбирают норму B : $q = (0, \dots, 0)$.

Таким образом в случае, если норма B считается общепринятой и каждый игрок полагает, что остальные выберут именно её, а игроков достаточно много и прямая договорённость (кооперация) между ними невозможна, то для участников, преследующих исключительно личные интересы, норма B продолжит оставаться равновесием, поскольку, решив выбрать норму A в одиночку, игрок ничего не получит.

Аналогичная ситуация сложится и в классе игроков Γ^α , учитывающих интересы других. Даже при наибольшем значении коэффициента α , когда

$$U_i(q) = \frac{1}{N} J(q) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N J_k, \quad \text{т. е. функция полезности,}$$

которую максимизирует каждый игрок, прямо пропорциональна суммарной платёжной функции, ни один из игроков не пожелает отклониться от менее эффективной нормы B , поскольку сообщество в целом от перехода одного участника на норму A получит меньше.



Таким образом, в обоих классах норма B продолжит оставаться равновесием, т. е. сообщество в целом не сможет перейти на новую норму.

Однако ситуация в корне меняется для третьего класса игроков – *homo moralis*. Функции полезности, максимум которым стремятся доставить игроки данного класса, в соответствии с определением 3 имеют вид математического ожидания:

$$W_i(q) = \mathbb{E}_{k_i} [J_i(q_i, \tilde{q}^i)],$$

где \tilde{q}^i – случайный вектор, распределение которого таково, что с вероятностью $k_i^m (1 - k_i)^{N-m-1}$ ровно $m \in \{0, \dots, N-1\}$ из его компонент принимают значение, равное q_i , а остальные компоненты сохраняют свои первоначальные значения. Это распределение похоже на широко известное из теории вероятностей биномиальное распределение $B_{k_i}^{N-1}$, однако отличается от него тем условием, что $(N-m-1)$ компонент должны сохранить свои первоначальные значения (т. е. значения в точке $q \in G$, в которой определяется значение функции $W_i(q)$).

Таким образом, значение функции $W_i(q_i, q^i)$ определяется выражением

$$W_i(q_i, q^i) = \sum_{m=0}^{N-1} \binom{N-1}{m} k_i^m (1-k_i)^{N-m-1} \times \\ \times \left[\underbrace{a q_i \left(m q_i + \frac{N-1-m}{N-1} \sum_{\substack{j=1, \\ j \neq i}}^N q_j \right)}_{\text{I}} + \right. \\ \left. + \underbrace{b(1-q_i) \left(m(1-q_j) + \frac{N-1-m}{N-1} \sum_{\substack{j=1, \\ j \neq i}}^N (1-q_j) \right)}_{\text{II}} \right], \quad (12)$$

где выражение I отвечает случаю, когда $q_i = 1$, а II – случаю, когда $q_i = 0$. Слагаемые с коэффициентом $\frac{N-1-m}{N-1}$ отражают положение о том, что остальные игроки, кроме тех m , стратегии которых считаются равными q_i , сохраняют свои первоначальные стратегии.

Нетрудно убедиться, что при $k_i = 0$ формулы (10) и (12) становятся тождественными, что ещё раз наглядно демонстрирует уже отмечавшуюся нами особенность: при $k_i = 0$ $W_i(q_i, q^i) \equiv J_i(q_i, q^i)$, т. е. участники *homo moralis* с нулевым значением коэффициента k_i становятся игроками индивидуалистами.

Если все игроки выбирают стратегию A , то i -й участник получает $(n-1)a$, также выбирая страте-

гию A , а в случае, если он решает выбрать стратегию B , его функция полезности равна

$$W_i(0, q^i = (1, \dots, 1)) = \\ = \sum_{m=0}^{N-1} \binom{N-1}{m} k_i^m (1-k_i)^{N-m-1} m. \quad (13)$$

Упростим выражение (13). Так как при $m=0$ соответствующий член ряда также равен нулю, то суммирование можно производить начиная с $m=1$.

Выражение (13) можно переписать в виде

$$W_i(0, q^i = (1, \dots, 1)) = b(n-1)k_i.$$

Если же все игроки выбирают стратегию B , то поступая как все, i -й участник получает $W_i(0, \dots, 0) = (N-1)b$, а выбирая в одиночку стратегию A , он получает

$$W_i(1, q^i = (0, \dots, 0)) = \sum_{m=0}^{N-1} \binom{N-1}{m} k_i^m \times \\ \times (1-k_i)^{N-m-1} m = a(n-1)k_i.$$

Таким образом, при $k_i > \frac{b}{a}$ оказывается, что

$W_i(1, q^i = (0, \dots, 0)) > W_i(0, \dots, 0)$, т. е. игрок с достаточно высоким значением коэффициента k_i готов перейти на более эффективную норму A даже в одиночестве. А в гомогенном (однородном) сообществе, где у всех участников одинаковое значение коэффициента $k_i > \frac{b}{a}$, ситуация $q = (1, \dots, 1)$, т. е. когда все участники выбирают норму A , оказывается единственным равновесием по Нэшу.

Однако более реалистичным является так называемый гетерогенный (неоднородный) случай, когда коэффициенты k_i у разных представителей рассматриваемого сообщества могут различаться.

8. ПОРОГОВЫЕ ЗНАЧЕНИЯ В МОДЕЛИ НЕОДНОРОДНЫХ СООБЩЕСТВ

Чтобы исследовать такие неоднородные сообщества, введём понятие *порогового значения*. Под пороговым значением θ_i i -го участника будем понимать наименьшую долю от общего количества других участников сообщества, перешедших на норму A , необходимую для того, чтобы i -й участник также сделал выбор в пользу нормы A . Например, i -й участник переходит на норму A , если он полагает, что её выберет половина сообщества, а j -й – если треть. Тогда $\theta_i = \frac{1}{2}$, а $\theta_j = \frac{1}{3}$.

Отметим, что впервые концепция пороговых значений для описания динамики принятия решений в больших сообществах появилась в работах американского социолога М. Грановеттера [41] и Т. Шеллинга [3], однако эта концепция нашла многих сторонников и получила существенное развитие в работах современных исследователей. В частности, отметим работы В.В. Бреера [42–44], посвящённые исследованию так называемого *конформного поведения* – поведения, основанного на следовании устоявшимся социальным нормам.

Определить пороговое значение для каждого номера можно исходя из следующих соображений. Пусть i -й участник предполагает, что $i \in \{1, N\}$ $\tilde{n} \in \{0, \dots, N-1\}$ других участников выберут норму A . Тогда его функция полезности в случае выбора B примет вид:

$$\begin{aligned} W_i(0, q^i) &= b \sum_{m=0}^{N-1} \binom{N-1}{m} k_i^m (1-k_i)^{N-1-m} \times \\ &\times \left[\frac{N-1-m}{N-1} (N-\tilde{n}-1) + m \right] = \\ &= b [(N-\tilde{n}-1) + \tilde{n}k_i]. \end{aligned}$$

Если при тех же условиях i -й участник выбирает норму A , то он получает

$$\begin{aligned} W_i(1, q^i) &= \\ &= b \sum_{m=0}^{N-1} \binom{N-1}{m} k_i^m (1-k_i)^{N-1-m} \left[\frac{N-1-m}{N-1} \tilde{n} + m \right] = \\ &= a [(1-k_i)\tilde{n} + (N-1)k_i] = a [\tilde{n} + (N-\tilde{n}-1)k_i]. \end{aligned}$$

Таким образом, i -й участник сделает выбор в пользу нормы A , если $W_i(1, q^i) > W_i(0, q^i)$: $a [\tilde{n} + (N-\tilde{n}-1)k_i] \geq b [(N-\tilde{n}-1) + \tilde{n}k_i]$. Это условие равносильно следующему:

$$\frac{\tilde{n}}{N-1} \geq \frac{b-k_i a}{(a+b)(1-k_i)} \triangleq \theta_i,$$

где θ_i – пороговое значение – минимальная доля выбравших норму A участников от общего количества, при которой i -й участник также готов сделать выбор в пользу нормы A . Отметим, что при $k_i > \frac{b}{a}$ пороговое значение θ_i будет отрицательным, что можно трактовать таким образом, что при достаточно большом значении коэффициента k_i (определяющего уровень морали, как он интерпретируется в работе [2]) i -й участник готов перейти на новую норму даже в одиночестве.

Отметим также, что у игроков с самым низким допустимым значением коэффициента $k_i = 0$ пороговое значение $\theta_i = \frac{b}{a+b}$. То есть если доля перешедших на норму A представителей сообщества превышает эту отметку, то даже игроки-индивидуалисты переходят на норму A .

Чтобы смоделировать неоднородность сообщества относительно коэффициента k_i и соответствующего ему порогового значения θ_i каждого индивидуума, рассмотрим функцию распределения $F(x): \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$, значения которой равны доле от общего количества тех представителей сообщества, пороговое значение θ_i которых не превосходит x .

Если пороговое значение θ у некоторого представителя сообщества представить в качестве случайной величины, принимающей значения на интервале $(-\infty, \frac{b}{a+b}]$, то функцию $F(x)$ можно понимать также как функцию распределения данной случайной величины: $F(x) = P(\theta < x)$, где P – соответствующая вероятность, равная доле от общего количества тех представителей сообщества, пороговое значение θ которых не превосходит значения x .

Для численного определения параметров распределения порогового значения, в соответствии с которым представители сообщества готовы перейти на новую норму поведения, может пригодиться опыт специального раздела статистических исследований – моральной статистики.

Моральная статистика охватывает широкий круг проблем, связанных как с негативными явлениями в обществе, такими как различного рода преступления и нарушения общественного порядка, а также нарушения морально-этических норм, так и с позитивными, которые характеризуют участие граждан в общественных организациях по охране окружающей среды, бескорыстное донорство, участие в различного рода спасательных службах и т. д. [45].

Например, если допустить, что на некотором предприятии или в вузе происходит регулярный добровольный сбор донорской крови, то у каждого сотрудника предприятия или учащегося есть две стратегии: участвовать в сборе (норма A) или нет (норма B). Поскольку чувство морального удовлетворения, которое испытывает человек, участвующий в таких мероприятиях, трудно формализовать,

определить численные значения коэффициентов a и b не представляется возможным. Однако численные значения пороговых значений перехода от нормы A к норме B вполне поддаются численному определению.

Для этой цели можно провести социологическое исследование среди пришедших сдавать кровь, в результате которого выяснить у участников, какое количество их знакомых участвовало в сдаче крови прежде, чем они сами решились на такой поступок. Это позволит определить пороговое значение для каждого участника.

Конечно, конкретный вид функции распределения будет отличаться от задачи к задаче. Однако в связи с тем, что рассматриваемая социальная модель предполагает достаточно большое количество участников, для дальнейших рассуждений в качестве вида функции $F(x)$ порогового значения можно выбрать функцию нормального распределения (Гаусса) с математическим ожиданием μ и дисперсией σ^2 , где μ и σ – параметры, характери-

зующие сообщество:
$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(u-\mu)^2}{2\sigma^2}} du$$

(рис. 1).

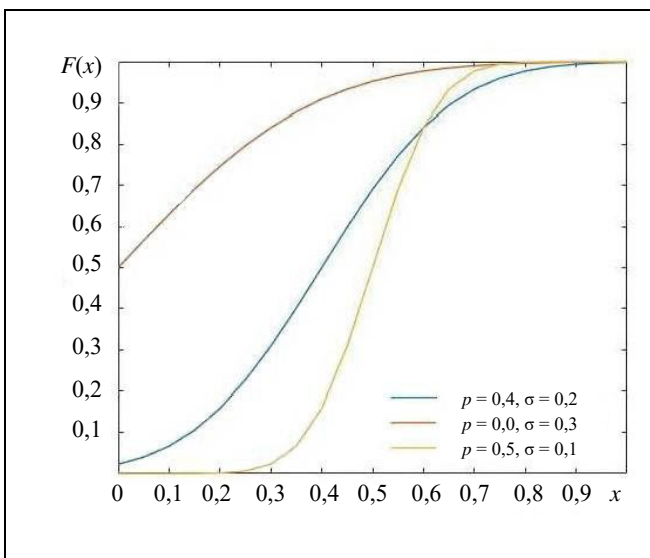


Рис. 1. График функции распределения $F(x)$ порогового значения θ .

Однако отметим, что в литературе имеются примеры использования и других функций распределения пороговых значений. В частности, в работе [44] предлагается использовать β -распределение.

В рассмотренном примере со сдачей крови среднее значение пороговых значений для всех опрошенных участников позволит определить ма-

тематическое ожидание, а средний квадрат отклонений от математического ожидания – дисперсию.

Графики распределения при разных значениях параметров μ и σ представлены на рис. 2. Отметим, что $F(x) = 1$ при $x \geq \frac{b}{a+b}$.

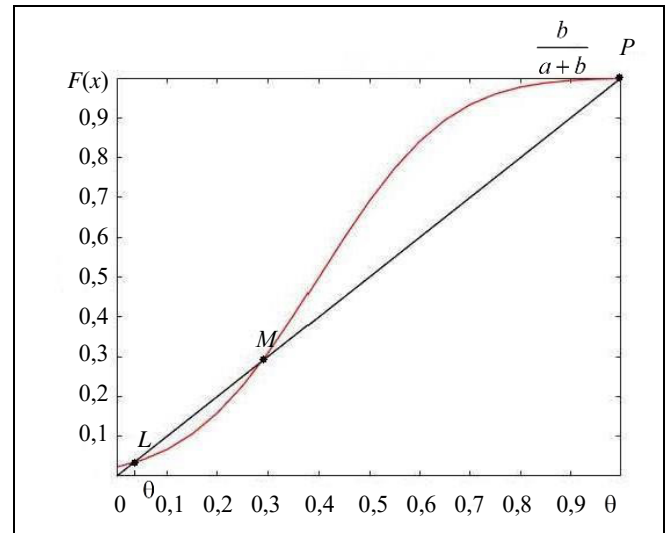


Рис. 2. График функции распределения пороговых значений с отмеченными точками состояний равновесия

Нормальное распределение использовано здесь лишь в качестве некоторого приближения, поскольку в реальности при анализе социальных процессов следует учитывать человеческий фактор ввиду способности людей к самоорганизации и наличия у них памяти.

В ряде классических работ (например, Ф. Блэкмена [46], Л. Берталанфи [47]) для описания функции распределения вероятности смены состояния в социальных системах используется логистическая модель и, соответственно, сигмоидальная (S -образная) функция, что вполне подходит для наших дальнейших рассуждений.

В работах же ряда современных авторов (Д.О. Жуков, Т.Ю. Хватова и др. [48, 49]) исследуется стохастическая динамика в социальных системах на основе клеточного автомата с учётом наличия у представителей системы памяти, т. е. зависимости состояния, в котором находится каждый индивидум, от его же состояния в предшествующие моменты времени. Данная модель позволяет, задав некоторые начальные параметры системы (например, количество контактов между представителями сообщества), построить функцию распределения пороговых значений, необходимых для перехода сообщества в целом от одного состояния к другому.

Теперь проанализируем, как будет протекать процесс перехода между нормами A и B в динамике.

9. СОЦИАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ В ДИНАМИКЕ

Будем рассматривать динамику перехода представителей сообщества между нормами A и B на некотором временном промежутке $[t_0, T]$. Вначале рассмотрим модель с неким дискретным шагом Δt , а затем устремим Δt к нулю. Пусть $N_A(t)$ – количество представителей сообщества, выбирающих норму A в момент времени t . По условию задачи $N_A(t_0) = 0$.

Тогда $\frac{N_A(t)}{N-1}$ задаёт долю перешедших на норму A в момент t . A в соответствии с определением функции $F(x)$, $F\left(\frac{N_A(t)}{N-1}\right)$ есть доля от общего количества индивидуумов, пороговое значение у которых не превосходит $\frac{N_A(t)}{N-1}$. Поэтому количество перешедших на норму A в некий следующий момент времени определяется отношением $N_A(t + \Delta t) = F\left(\frac{N_A(t)}{N-1}\right) N$. Если полагать, что общество достаточно большое, то $N-1 \approx N$. Обозначив через $x(t) = \frac{N_A(t)}{N}$ долю перешедших на норму A участников в момент времени t , получим соотношение

$$x(t + \Delta t) = F(x(t)) \quad (14)$$

или

$$x(t + \Delta t) - x(t) = F(x(t)) - x(t).$$

Из последнего выражения следует, что если $F(x) > x$, то $x(t)$ и, соответственно, $N_A(t)$ возрастают по времени, а если $F(x) < x$, то убывают. Если же в равенстве (14) устремить Δt к нулю, то получим условие равновесия $x(t) = F(x(t))$, при котором количество индивидуумов, перешедших на норму A , стабилизируется. Состояниям равновесия соответствуют неподвижные точки отображения F , однако эти состояния могут быть как устойчивы, так и неустойчивы. Чтобы проиллюстрировать этот факт, обратимся к примеру.

10. УСТОЙЧИВОСТЬ СОСТОЯНИЙ РАВНОВЕСИЯ

Рассмотрим сообщество, которому соответствует функция распределения $F(x)$ порогового значения θ , график которой представлен на рис. 2. Сначала рассмотрим модель с дискретным временем. По условию задачи $N_A(t_0) = 0$. Первыми на норму A перейдут индивидуумы с отрицательным значением пороговой величины, поэтому $N_A(\Delta t) = F(0) \cdot N$. В следующий момент перейдут те, чьё пороговое значение не превышает долю участников, выбравших A в предыдущий момент времени. То есть $N_A(2 \cdot \Delta t) = F\left(\frac{N_A(\Delta t)}{N}\right) = F(F(0))$

и т. д. Устремив Δt к нулю, получим процесс, непрерывный по времени.

Функция F , изображённая на рис. 2, имеет три неподвижные точки и соответствующие им состояния равновесия: точку L вблизи нуля, точку M и точку P вблизи единицы.

При этом точки L и P обладают свойством устойчивости: если доля перешедших на норму A индивидуумов подходит близко к пороговому значению θ_L или θ_P , то она будет колебаться вблизи этих значений. Действительно, как показано выше, при $x < \theta_L$ $F(x) > x$, поэтому количество $N_A(t)$ будет увеличиваться. И наоборот, $N_A(t)$ будет уменьшаться при $x > \theta_L$.

Равновесная точка M же является неустойчивой: если доля перешедших на норму A превышает θ_M на сколь угодно малую величину, то $F(x) > x$, $N_A(t)$ будет возрастать, пока доля выбравших A не стабилизируется, достигнув ближайшей устойчивой равновесной точки $\theta_P = 1$, что будет соответствовать тому, что сообщество в целом перешло на норму A . И наоборот, если доля $x(t) = \frac{N_A(t)}{N}$ сколь угодно меньше порогового значения θ_M , то она продолжит уменьшаться пока не стабилизируется вблизи порогового значения θ_L , т. е. сообщество «скатится» обратно к неэффективной норме B . Более подробно теория устойчивости неподвижных точек применительно к ряду экономических, социальных и биологических процессов рассматривается в работе [50].

Отметим, что для непрерывной функции распределения неподвижные точки, в которых дости-



гается равновесие, будут точками изменения состояния выпуклости и вогнутости функции. Если в неподвижной точке функция вогнута слева, то точка устойчива, если же выпукла, то неустойчива.

Поскольку $F(x)=1$ при $x > \frac{b}{a+b}$, то функция $F(x)$ будет выпуклой при $x \rightarrow 1-0$. Поэтому точка $x=1$, соответствующая тому, что всё сообщество перешло на новую норму A , всегда будет устойчивой. Но если функция распределения F такова, что существует неподвижная точка, являющаяся устойчивым равновесием, со значением меньшим единицы, то сообщество никогда полностью не перейдет на более эффективную норму, «застряв» в окрестности ближайшей к нулю точки устойчивого равновесия, если не предположить, что в обществе проводится некоторая просветительская (образовательная) деятельность, в результате которой повышается уровень морали в обществе и соответственно общество в целом способно перейти на более совершенную норму поведения. Более подробно наличие элементов обучения в модели социального выбора и то, как изменяется в этом случае вид графика функции распределения вероятностей и, соответственно, положение точек равновесия на этом графике, рассматривается в работе [53, с.78–80].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная здесь модель поведения индивидуумов, следующих принципу морали в смысле императива Канта, разработанная и представленная в ряде работ (например, [11, 51]) И. Эджер и Й. Вибулом, показывает существенное отличие между поведением индивидуумов, которых мы обозначили *homo moralis*, и традиционно рассматриваемых в работах по теории игр *homo economicus*.

В качестве другой встречающейся в литературе модели можно рассмотреть модель коллективизма или альтруизма, которая предполагает учёт каждым участником с некоторым весовым коэффициентом интересов других участников. В ряде исследований (к примеру, в работах [9, 11]) коллективизм моделируется таким образом, что, например, в задаче с двумя участниками каждый стремится обеспечить максимум не своей первоначальной платёжной функции $J_i(q)$, но специальной функции полезности $U_i(q) = (1-\alpha)J_i(q) + \alpha J^i(q)$, $\alpha \in [0, 1]$, или, как она была обобщена для произвольного количества участников N в работе [52],

$$U_i(q) = (1-\alpha)J_i(q) + \frac{\alpha}{N} \sum_{k=1}^N J_k(q), \alpha \in [0, 1].$$

Частным случаем такой функции полезности при $\alpha=1$ можно считать предложенную Дж. Херсаньи [5] функцию $U_i(q) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N J_k(q)$.

Существенное отличие *homo moralis* от так называемых индивидуалистов (*homo economicus*) и даже альтруистов заключается в том, что если первые (*homo moralis*), оценивая преимущества, открывающиеся в случае, если все представители сообщества перейдут на новую норму поведения, способны стать своего рода катализаторами процесса, первопроходцами, то ни участники-индивидуалисты, ни так называемые альтруисты на это оказываются не способны.

Данная особенность позволяет говорить о наличии некоторой эволюционной устойчивости для такой модели поведения, что, оказывается, можно косвенно подтвердить и методами эволюционной теории игр. Как уже было сказано, в этой теории принято рассматривать повторяющиеся игры и исследовать каждую из стратегий поведения на успех не в одной конкретной игровой ситуации, но в долгосрочной перспективе, на основе длительной череды игровых ситуаций.

Например, особую модель альтруистического поведения исследовали на эволюционную устойчивость с помощью бесконечно повторяющейся дилеммы заключённого авторы работы [54].

Напомним, что суть дилеммы сводится к тому, что два игрока стоят перед выбором: сотрудничать или предать товарища. В случае, если оба игрока выбирают сотрудничество, они оказываются в плюсе. Но при этом каждый из них испытывает соблазн обмануть, поскольку, если обман удастся, обманувший получит даже больше, чем при обоюдном решении сотрудничать, а вот обманутый терпит убытки. Если же оба игрока, поддавшись соблазну, решают обмануть друг друга, то они становятся наказаны собственной алчностью, получив наименее благоприятную в игре игровую ситуацию.

Нетривиальным результатом, к которому пришли авторы работы [54], стало то, что альтруизм будет эволюционно более устойчивым (то есть суммарное значение функции полезности по итогам многих повторений дилеммы будет выше) только в том случае, если члены сообщества будут хотя бы приблизительно представлять предпочтения друг друга. Иначе, например, случайно попавший в общество альтруистов эгоист будет иметь существенные преимущества, поскольку будет

пользоваться хорошим расположением окружающих, пока характер его поведения не будет раскрыт. Именно этим обстоятельством авторы объясняют то, что альтруизм, или просоциальное поведение, как правило, возникает между родственниками, друзьями, коллегами – одним словом, людьми, которые знают что-то друг о друге.

Тем не менее, исходя из рассмотренных выше рассуждений об устойчивости равновесий в гетерогенных (разнородных) сообществах, можно сделать вывод, что в естественных условиях новая, более прогрессивная модель поведения может никогда не стать общепринятой нормой. В таком случае общество может навсегда «застыть» на старой, менее эффективной модели поведения, если не будут приняты некоторые дополнительные меры, способствующие подъёму уровня морали (роста коэффициента k_i в нашей модели). К таким мерам может относиться, в частности, просветительская, воспитательная работа.

Однако отметим, что недостатком рассмотренной модели является то, что используемые в ней параметры (например, коэффициенты k_i) являются трудноформализуемыми, что затрудняет их численное определение, необходимое для практического применения.

Вместе с тем применение различных статистических методов [45] позволит решить данную проблему, что, в свою очередь, позволит использовать представленную здесь теоретическую основу, например, для оценки эффективности проводимых на государственном уровне мероприятий в сфере образования и воспитания молодёжи.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Доказательство теоремы. Согласно определению 3, ситуация q^* будет равновесной по Нэшу, если выполняется соотношение

$$U_i(q^*) \geq U_i(q^*, q_i), \quad \forall q_i \in G(q^*), \quad i = \overline{1, N}, \quad (\text{П1})$$

где $q^* = (q_1^*, \dots, q_{i-1}^*, q_{i+1}^*, \dots, q_N^*)$ – вектор стратегий всех игроков, кроме i -го, образующих ситуацию q^* . Воспользовавшись определением платёжной функции (2), неравенство (П1) можно переписать в виде:

$$(1-\alpha)J_i(q^*) + \frac{\alpha}{N-1}J^i(q^*) \geq (1-\alpha)J_i(q^*, q_i) + \frac{\alpha}{N-1}J^i(q^*, q_i), \quad \forall q_i \in G(q^*), \quad i = \overline{1, N}. \quad (\text{П2})$$

Воспользуемся заменой $\beta = \alpha \frac{N}{N-1}$. Тогда платёжную функцию $U_i(q)$ можно записать в эквивалентной форме: $U_i(q) = (1-\beta)J_i(q) + \frac{\beta}{N}J(q), \beta \in [0, 1]$.

А неравенство (П2) примет вид:

$$(1-\beta)(J_i(q^*) - J_i(q^*, q_i)) + \frac{\beta}{N}(J(q^*) - J(q^*, q_i)) \geq 0, \quad (\text{П3})$$

$$\forall q_i \in G(q^*), \quad i = \overline{1, N}.$$

Выражение слева в неравенстве (П3) задаёт при $\beta \in [0, 1]$ отрезок на действительной прямой между точками:

$$Q(q_i) = J_i(q^*) - J_i(q^*, q_i), \quad (\text{П4})$$

$$P(q_i) = \frac{1}{N}(J(q^*) - J(q^*, q_i)).$$

Значение $P(q_i) \geq 0$, так как в точке q^* достигается максимум $J(q)$ при $q \in G$, поэтому $\forall q_i \in G(q^*)$ либо отрезок между точками $Q(q_i)$ и $P(q_i)$ лежит справа от нуля, если $Q(q_i) > 0$, либо ноль лежит внутри отрезка $[Q(q_i), P(q_i)]$, если $Q(q_i) < 0$, либо совпадает с одной из его границ, если $Q(q_i) = 0$ или $P(q_i) = 0$, либо совпадает с обеими границами, если $P(q_i) \equiv Q(q_i) = 0$ (в этом случае отрезок становится точкой). Иначе говоря, найдётся значение $\beta_{NE}^i(q_i) \in \mathbb{R}, \beta_{NE}^i \in [0, 1]$ такое, что $\forall \beta \in [\beta_{NE}^i, 1]$ справедливо неравенство (П4).

Поскольку мы можем каждому $q_i \in G(q^*)$ поставить в соответствие значение $\beta_{NE}^i(q_i) \in [0, 1]$, то таким образом мы можем задать ограниченную функцию $\beta_{NE}^i(q_i) \leq 1, \forall q_i \in G(q^*)$:

$$\beta_{NE}^i(q_i) = \begin{cases} \frac{-Q(q_i)}{P(q_i) - Q(q_i)}, & \text{если } Q(q_i) < 0, \\ 0, & \text{если } Q(q_i) \geq 0. \end{cases}$$

Пусть $\beta_{NE}^i = \sup_{q_i \in G(q^*)} \beta_{NE}^i(q_i)$. Поскольку $\beta_{NE}^i(q_i) \leq 1$, то $\beta_{NE}^i \leq 1$.

Введём $\beta_{NE} = \max_{i=1, N} \beta_{NE}^i$. Поскольку $\beta_{NE}^i \leq 1$, то и $\beta_{NE} \leq 1$ и $\forall \beta \in [\beta_{NE}, 1]$ точка q^* будет равновесием по Нэшу в игровой задаче с функциями полезности $U_i(q)$, определёнными по форме (2), где $\beta = \beta_{NE}$.

Возвращаясь, наконец, к исходным обозначениям параметров $\alpha_{NE} = \frac{N-1}{N}\beta_{NE}$, мы получили значение α_{NE} такое, что $\forall \alpha \in [\alpha_{NE}, \frac{N-1}{N}]$ ситуация q^* будет равновесием по Нэшу в игре $\Gamma^{\alpha_{NE}}$.

Тем самым оба утверждения теоремы доказаны. ♦

ЛИТЕРАТУРА

1. Микушина Т.Н., Скуратовская М.Л. Проблема нравственности и глобальный кризис общества // Материалы II международной научно-практической конференции “Мир на



- пороге новой эры. Как это будет?». – Саратов, 2014. – С. 74–79. [Mikushina, T.N., Skuratovskaya, M.L. Problema npravstvenno-sti i globalniy krizis obschestva // Materialy II mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Mir na poroge novoy eryi. Kak eto budet?”. – Saratov, 2014. – S. 74–79. (In Russian)]
2. Smith, A. An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations. – Oxford, UK: Oxford University Press, 1776.
 3. Smith, A. The Theory of Moral Sentiments. – Oxford, UK: Oxford University Press, 1759.
 4. Braithwaite, R.B. Theory of Games as a Tool for the Moral Philosopher. An Inaugural Lecture Delivered in Cambridge on 2 December 1954. – Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1955.
 5. Harsanyi, J.C. Chapter 19 Game and decision theoretic models in ethics // Handbook of Game Theory with Economic Applications. – Amsterdam: Elsevier, 1992. – Vol. 1. – P. 669–707.
 6. Harsanyi, J.C. Rule utilitarianism and decision theory // Erkenntnis. – 1977. – Vol. 11. – P. 25–53.
 7. Гусейнов А.А. История этических учений. М.: Академический проект; Трикта, 2015. – С. 716–724. [Guseynov, A.A. Istoriya eticheskikh ucheniy. M.: Akademicheskii projekt; Trikshta, 2015. – S. 716–724. (In Russian)]
 8. Льюис Р.Д., Райфа Х. Игры и решения. – М.: Издательство иностранной литературы, 1961. – С. 33–67. [Lyuys, R.D., Rayfa, H. Igryi i resheniya. – M.: Izdatelstvo inostrannoy literatury, 1961. – S. 33–67. (In Russian)]
 9. Kranz, S. Moral norms in a partly compliant society // Games and Economic Behavior. – Academic Press, 2010. – Vol. 68, no. 1. – P. 255–274.
 10. Alfano, M., Rusch, H., Uhl, M. Ethics, Morality, and Game Theory // Games. – 2018. – Vol. 9. – P. 1–4.
 11. Alger, I., Weibull, J.W. Strategic Behavior of Moralists and Altruists // Games. – 2017. – Vol. 8. – P. 1–21.
 12. Smith, J.M. Evolution and the Theory of Games. – Cambridge: Cambridge University Press, 1982.
 13. Newton, J. Evolutionary game theory: A renaissance // Games. – 2018. – Vol. 9. – P. 1–67.
 14. Brams, S.J. Game theory and the humanities: bridging two worlds. – London: The MIT Press, 2011.
 15. Гермейер Ю.Б., Ватель И.А. Игры с иерархическим вектором интересов // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1974. – № 3. – С. 54–69. [Germeyer, Yu.B., Vatel, I.A. Igryi s ierarhicheskim vektorom interesov // Izvestiya AN SSSR. Tehnicheskaya kibernetika. – 1974. – No. 3. – S. 54–69. (In Russian)]
 16. Горбанева О.И., Угольницкий Г.А. Цена анархии и механизмы управления в моделях согласования общественных и частных интересов // Математическая Теория Игр и её Приложения. – 2015. – Т. 7, № 1. – С. 50–73. [Gorbaneva, O.I., Ougolnitsky, G.A. Price of Anarchy and Control Mechanisms in Models of Concordance of Public and Private Interests // Matematicheskaya Teoriya Igr i Ee Prilozheniya. – 2015. – Vol. 7, no. 1. – P. 50–73. (In Russian)]
 17. Горбанева О.И. Модели сочетания общих и частных интересов независимых агентов // Математическая Теория Игр и её Приложения. – 2018. – Т. 10, № 4. – С. 3–15. [Gorbaneva, O.I. Models of social and private interests combining with independent agents // Matematicheskaya Teoriya Igr i Ee Prilozheniya. – 2018. – Vol. 10, no. 4. – P. 3–15. (In Russian)]
 18. Лефевр В.А. Алгебра совести / пер. с англ. – М.: “Когнитив-Центр,” 2003. – 426 с. [Lefevr, V.A. Algebra sovesti / per. s angl. – M.: “Kognitio Centri”, 2003. – 426 s. (In Russian)]
 19. Гусейнов А.А., Жуковский В.И., Кудрявцев К.Н. Математические основы Золотого правила нравственности: Теория нового альтруистического равновесия в противоположность “эгоистическому” равновесию по Нэшу. – М.: ЛЕНАНД, 2016. – 280 с. [Guseynov, A.A., Zhukovskiy, V.I., Kudryavcev, K.N. Matematicheskie osnovy Zolotogo pravila npravstvennosti: Teoriya novo-go al'truisticheskogo ravnovesiya v protivopolozhnost' “egoisticheskomu” ravnovesiyu po Neshu. – M.: LENAND, 2016. – 280 s. (In Russian)]
 20. Зак Ф.Л. О некоторых моделях альтруистического поведения // Журнал Новой экономической ассоциации. – 2021. – Т. 42, № 1. – С. 12–52. [Zak, F.L. Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia On some models of altruistic behavior // Journal of the New Economic Association. – 2021. – Vol. 42, no. 1. – P. 12–52.]
 21. Зак Ф.Л. Психологические игры в теории выбора. II. Стыд, сожаление, эгоизм и альтруизм // Журнал Новой экономической ассоциации. – 2014. – Т. 22, № 2. – С. 12–40. [Zak, F.L. Central Economics Mathematical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia Psychological Games in the Theory of Choice. II. Shame, Regret, Egoism and Altruism // Journal of the New Economic Association. – 2014. – Vol. 22, no. 2. – P. 12–40. (In Russian)]
 22. Saito, K. Impure Altruism and Impure Selfishness // J. Econ. Theory. – 2015. – Vol. 158. – P. 336–370.
 23. Гусейнов А.А. «Золотое правило» нравственности // Вестник Московского университета. Философия. – 1972. – Т. 4. – С. 53–63. [Guseynov, A.A. «Zolotoe pravilo» npravstvennosti // Vestnik Moskovskogo universiteta. Filosofiya. – 1972. – Vol. 4. – P. 53–63. (In Russian)]
 24. Бурков В.Н., Еналеев А.К., Коргин Н.А. Согласованность и неманипулируемость механизмов организационного управления: текущее состояние проблемы, ретроспектива, перспективы развития теоретических исследований // Автоматика и телемеханика. – 2021. – № 7. – С. 5–37. [Burkov, V.N., Enaleev, A.K., Korgin, N.A. Incentive compatibility and strategy-proofness of mechanisms of organizational behavior control: retrospective, state of the art, and prospects of theoretical research // Automation and Remote Control. – 2021. – Vol. 82, no. 7. – P. 1119–1143.]
 25. Леонтьев С.В., Новиков Д.А., Петраков С.Н. Критериальное и мотивационное управление в активных системах // Автоматика и телемеханика. – 2002. – № 7. – С. 107–116. [Leont'ev, S.V., Novikov, D.A., Petrakov, S.N. Control in Active Systems Based on Criteria and Motivation // Automation and Remote Control. – 2002. – Vol. 63, no. 7. – P. 1137–1145.]
 26. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Механизмы критериального управления активными системами в задачах стимулирования // Сборник трудов ИПУ РАН. – 2000. – С. 76–85. [Burkov, V.N., Novikov, D.A. Mekhanizmy kriterial'nogo upravleniya aktivnymi sistemami v zadachah stimulirovaniya // Sbornik trudov IPU RAN. – 2000. – S. 76–85. (In Russian)]
 27. Смольяков Э.Р. Методы решения конфликтных задач: Учебное пособие. – М.: МГУ, 2010. – 244 с. [Smol'yakov, E.R. Metody resheniya konfliktnykh zadach: Uchebnoe posobie. – M.: MGU, 2010. 244 s. (In Russian)]
 28. Смольяков Э.Р. Теория конфликтных равновесий. – М.: Эдиториал УРСС, 2005. [Smol'yakov, E.R. Teoriya konfliktnykh ravnovesij. – M.: Editorial URSS, 2005. (In Russian)]
 29. Искаков М.Б. Равновесие в безопасных стратегиях // Автоматика и телемеханика. – 2005. – № 3. – С. 139–153. [Iskakov, M.B. Equilibrium in safe strategies // Automation and Remote Control. – 2005. – Vol. 66, no. 3. – P. 465–478.]
 30. Искаков М.Б. Равновесие в безопасных стратегиях и равновесия в угрозах и контругрозах в некооперативных играх // Автоматика и телемеханика. – 2008. – № 2. – С.

- 114–134. [Iskakov, M.B. Equilibrium in safety strategies and equilibriums in objections and counterobjections in noncooperative games // Automation and Remote Control. – 2008. – Vol. 69, no. 2. – P. 278–298.]
31. Базенков Н.И. Динамика двойных наилучших ответов в игре формирования топологии беспроводной ad hoc сети // Управление большими системами. – 2013. – № 43. – С. 217–239. [Bazhenkov, N.I. Double best response dynamics in topology formation game for ad hoc networks // Large-Scale Systems Control. – 2013. – Vol. 43. – P. 217–239. (In Russian)]
32. Смольяков Э.Р. Справедливый делёж в кооперативных играх // Доклады Академии Наук. – 2008. – Т. 418, № 2. – С. 176–180. [Smolyakov, E.R. Spravedlivyj delyozh v kooperativnyh igrakh // Doklady Akademii Nauk. – 2008. – Vol. 418, no. 2. – S. 176–180. (In Russian)]
33. Зак Ф.Л. О некоторых моделях альтруистического поведения // Журнал Новой экономической ассоциации. – 2021. – Т. 1, № 49. – С. 12–52. [Zak, F.L. Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia On some models of altruistic behavior // Journal of the New Economic Association. – 2021. – Vol. 1, no. 49. – P. 12–52. (In Russian)]
34. Микушина Т.Н., Ильина Е.Ю. О России. – Омск: ИД “Сириус”, 2021. – 60 с [Mikushina, T.N., Il'ina, E.Yu. O Rossii. – Omsk: ID “Sirius,” 2021. – 60 s. (In Russian)]
35. Sarkisian, R. Team Incentives under Moral and Altruistic Preferences: Which Team to Choose? // Games. – 2017. – Vol. 8. – P. 1–24.
36. Кант И. Основы метафизики нравственности. Сочинения в шести томах. – М.: «Мысль». – 1963–1966. – С. 211–310. [Kant, I. Osnovy metafiziki nrvstvvennosti. Sochineniya v shesti tomah. – M.: «Mysl'». – 1963–1966. – S. 211–310. (In Russian)]
37. Галицкая З.И., Ильина Е.Ю., Марченко О.В., Павлова Г.Л. Нравственность – сила нации. Учебное пособие. – Омск: Фонд “ЗаНравственность!”. – 212 с. [Galickaya, Z.I., Il'ina, E.Yu., Marchenko O.V., Pavlova G.L. Nrvstvvennost' – sila natsii. Uchebnoe posobie. – Omsk: Fond “ZaNrvstvvennost'!”. – 212 s. (In Russian)]
38. Laffont, J.-J. Macroeconomic Constraints, Economic Efficiency and Ethics: An Introduction to Kantian Economics // Economica. – 1975. – Vol. 42, no. 168. – P. 430–437.
39. Roemer, J. How We Cooperate: A Theory of Kantian Optimization. – New Haven, CT: Yale University Press, 2019.
40. Roemer, J. Kantian Optimization: A Microfoundation for Cooperation // Journal of Public Economics. – 2014. – Vol. 127. – P. 45–57.
41. Granovetter, M., Soong, R. Threshold models of interpersonal effects in consumer demand // Journal of Economic Behavior & Organization. – 1986. – Vol. 7, no. 1. – P. 83–99.
42. Бреер В.В., Новиков Д.А., Рогаткин А.Д. Модели порогового коллективного поведения в задачах управления эколого-экономическими системами // Управление большими системами. – 2015. – № 55. – С. 35–54. [Breer, V.V., Novikov, D.A., Rogatkin, A.D. Models of collective threshold behavior in control problems of ecological-economic systems // Large-Scale Systems Control. – 2015. – No. 55. – P. 35–54. (In Russian)]
43. Бреер В.В. Теоретико-игровые модели бинарного коллективного поведения // Математическая теория игр и ее приложения. – 2020. – Т. 12, № 2. – С. 3–19. [Breer, V.V. Game-theory models of binary collective behavior // Matematicheskaya teoriya igr i ee prilozheniya. . – 2020. – Vol. 12, no. 2. – P. 3–19. (In Russian)]
44. Бреер В.В. Модели толерантного порогового поведения (от Т. Шеллинга к М. Грановеттеру) // Проблемы управления. – 2016. – № 1. – С. 11–20. [Breer, V.V. Models of Tolerant Threshold Behavior (From T. Shelling to M. Granovetter) // Control Sciences. – 2016. – No. 1. – P. 11–20. (In Russian)]
45. Соболевская М.К., Стрекалова С.А. Анализ показателей моральной статистики России за 2000–2015 гг. // Молодой ученый. – 2016. – № 20 (124). – С. 419–421. [Sobolevskaya, M.K., Strekalova, S.A. Analiz pokazatelej moral'noj statistiki Rossii za 2000–2015 gg. // Molodoy uchenyj. – 2016. – No. 20 (124). – P. 419–421. (In Russian)]
46. Blackman, F.F. Optima and limiting factors // Annals of Botany. Oxford Academic. – 1905. – Vol. os-19, no 2. – P. 281–296.
47. Bertalanffy, L. von, Woodger, J.H. Modern Theories of Development. – London: Humphrey Milford, 1938.
48. Istratov, L.A., Smychкова, A.G., Zhukov, D.O. Modeling group behavior based on stochastic cellular automata with memory and systems of differential kinetic equations with delay // Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. – Upravlenie, Vychislitel'naya Tekhnika i Informatika. – 2020. – No. 51. – P. 45–54.
49. Zhukov, D., Khvatova, T.Yu., Zaltzman, A.D. Modelling the stochastic dynamics of transitions between states in social systems incorporating self-organization and memory // Technological Forecasting and Social Change. – 2020. – Vol. 158. – P. 120–134.
50. McLennan, A. The Index +1 Principle. – Queensland, Australia: University of Queensland, 2016.
51. Alger, I., Weibull, J. Homo Moralis-Preference Evolution Under Incomplete Information and Assortative Matching // Econometrica. – 2013. – Vol. 81, no. 6. – P. 2269–2302.
52. Красников К.Е. Моделирование социально-этических принципов в терминах игровых задач // Экономика вчера, сегодня, завтра. – 2020. – Т. 10. – № 2а. – С. 221–237. [Krasnikov, K.E. Modeling of social and ethical principles in terms of game tasks // Economics: Yesterday, Today and Tomorrow. – 2020. – Vol. 10, is. 2A. – P. 224–240 (In Russian)]
53. Красников К.Е. Математическое моделирование некоторых социальных процессов с помощью теоретико-игровых подходов и принятие на их основе управленческих решений // Российский технологический журнал. – 2021 – Т. 9. – № 5 – С. 67–83. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-5-67-83> [Krasnikov, K.E. Mathematical modeling of some social processes using game-theoretic approaches and making managerial decisions based on them // Russian Technological Journal. – 2021. – Vol. 9, no. 5. – P. 67–83. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-5-67-83> (In Russian)]
54. Bester, H., Güth, W. Is altruism evolutionarily stable? // J. Econ. Behav. Organ. – 1998. – Vol. 34, no. 2. – P. 193–209.

Статья представлена к публикации членом редколлегии чл.-корр. Д.А. Новиковым.

Поступила в редакцию 21.06.2021,
после доработки 13.01.2022.
Принята к публикации 13.01.2022.

Красников Кирилл Евгеньевич – ассистент, Московский институт радиотехники электроники и автоматики (РТУ МИРЭА), г. Москва, ✉ krasnikovkirill@yandex.ru.



SOME SOCIAL AND ETHICAL NORMS OF BEHAVIOR: MATHEMATICAL MODELING USING GAME-THEORETIC APPROACHES

K.E. Krasnikov

Russian Technological University (MIREA), Moscow, Russia

✉ krasnikovkirill@yandex.ru

Abstract. This paper overviews game-theoretic approaches to model the impact of prevailing behavioral norms (selfishness and altruism, morality on the example of Kant's imperative or the Golden Rule of ethics) on the development of some community. In addition, we study the effectiveness of the community depending on the prevailing worldview of its representatives. The equilibrium of the maximum cooperative income is investigated for communities whose representatives observe, to some extent, public interests rather than personal ones. The effectiveness of communities whose representatives follow Kant's imperative or the Golden Rule of ethics is considered using a game-theoretic model of social choice between two norms of behavior: one generally accepted but obsolete, and another new, not yet widespread, but advanced and progressive. The results can be used to assess the effectiveness of ongoing pedagogical work and state planning in the areas of upbringing and education.

Keywords: game theory, conflict equilibria, modeling of social and ethical norms of behavior.

КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ ПРИКЛАДНОЙ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОИСКОВЫХ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИСТЕМ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ

А.И. Алчинов, И.Н. Гороховский

Аннотация. Изложена концепция создания прикладной географической информационной системы моделирования поисковых корреляционно-экстремальных навигационных систем (ПГИС КЭНС) для управления движущимися объектами. Показано, что развитие и массовое внедрение систем автономной навигации данного типа как единственной альтернативы спутниковым навигационным системам в настоящее время может базироваться на предметно-ориентированных информационных технологиях. С помощью ПГИС КЭНС могут быть собраны модели широкого спектра КЭНС и макеты технологий их настройки на работу в заданных районах с проведением необходимых вычислительных экспериментов. Для определения состава требуемых программных компонентов, структуры хранилища и особенностей интерфейса построена общая математическая модель, которая при сохранении всей специфики поисковых алгоритмов КЭНС охватывает не только известные алгоритмы совмещения изображений, но и включает в себя схему синтеза поисковых алгоритмов КЭНС нового типа, использующих методы распознавания образов и анализа сцен, кластеризации, обучения нейросетей, облачных технологий обработки данных. Важнейшим видом вычислительного эксперимента с моделями КЭНС является стрессовое тестирование. Построена математическая модель стрессовых воздействий для частного случая, обеспечивающая различные условия функционирования КЭНС, включая ее фатальные отклонения от нормального функционирования.

Ключевые слова: прикладная географическая информационная система, корреляционно-экстремальная навигационная система, съемочная система, распознавание образов, анализ сцен, обучающиеся машины, нейронная сеть, параллельные вычисления, облачные вычисления, математическое моделирование, стрессовое тестирование системы.

ВВЕДЕНИЕ

Корреляционно-экстремальные навигационные системы применяются для уточнения в автономном режиме сведений о местоположении, ориентации и других параметрах движущегося объекта, поступающих от основной навигационной системы (ОНС). Эти сведения используются системой управления для компенсации отклонений параметров движения объекта с целью удержания его на заданном маршруте. Поисковые КЭНС решают свою задачу посредством проверки гипотез о значениях параметров движения при помощи методов совмещения текущего изображения участка местности (ТИ), полученного бортовой съемочной системой (СС), с фрагментами эталонного изображе-

ния (ЭИ) района применения системы. Эталонные изображения готовят заблаговременно и заносят в память бортового вычислителя. В процессе поиска фрагмента ЭИ, близкого по содержанию к ТИ в смысле используемой в бортовом алгоритме функции близости, используется регулярная сетка сдвигов рамки, выделяющей очередной фрагмент ЭИ. Проверяются гипотезы о равенстве значений искомого параметра значениям в узлах сетки. Принимается гипотеза, для которой функция близости максимальна. Применяются глобальные схемы поиска, градиентные методы из арсенала методов поиска экстремума числовой функции, а также их сочетания [1].

До конца 1990-х гг. исследования и разработки по различным аспектам развития КЭНС велись



интенсивно. На разных этапах решение проблем управления движением и навигации было связано с поиском общих принципов синтеза, которые бы при конкретных обстоятельствах позволяли автоматически синтезировать параметры управления движущимися объектами. Были определены направления дальнейшего развития КЭНС:

- новые принципы построения бортовых алгоритмов, их интеллектуализация и самоорганизация;
- применение новых типов съемочных систем и их комплексирование;
- развитие параллельных процессоров, включая и специализированные процессоры для реализации алгоритмов с единой параллельной структурой.

Уровень развития информационных технологий и достижимые характеристики бортовых вычислителей тогда сдерживали практическую реализацию указанных выше направлений. Получили развитие спутниковые навигационные системы, и тематика КЭНС переместилась на второй план.

К настоящему времени ситуация кардинально изменилась. Актуальность ускоренного развития КЭНС по указанным выше направлениям значительно возросла в связи с интенсивным развитием беспилотных аппаратов различного назначения, включением в их системы управления современных съемочных систем и вычислителей с большой памятью, а также процессоров, ориентированных на параллельные схемы вычислений; массовым распространением и развитием средств программирования систем искусственного интеллекта; доступностью услуг по обучению нейросетей на больших данных в средах «облачных вычислений». Это обусловило необходимость более полного, чем в существующих решениях, раскрытия потенциала развития КЭНС как единственной альтернативы спутниковым навигационным системам [2].

Спутниковые системы управления движущимися объектами, как оказалось, в современных условиях стали уязвимыми. Мы все больше осознаем, что спутниковые системы управления надо защищать, укреплять и расширять. Орбитальные станции могут быть выведены из строя или просто уничтожены.

В этих условиях ускоренное развитие данной предметной области может быть обеспечено путем расширения исследований и разработок с использованием предметно-ориентированного вычислительного комплекса. Такой комплекс может предоставить специалисту все необходимые средства для сборки моделей широкого спектра КЭНС и макетов технологий их настройки на работу в заданных районах из готовых программных компо-

нентов посредством специального интерфейса к хранилищу компонентов и проводить с ними необходимые вычислительные эксперименты.

Заметим, что кроме специфического функционала, ориентированного на моделирование поисковых КЭНС и макетов технологий их настройки на работу в заданных районах, такой предметно-ориентированный комплекс должен предоставлять пользователю доступ (в том числе в форме API (*application programming interface*, программный интерфейс приложения) для внешних программ) ко всем универсальным средствам работы с геопространственной информацией, т. е. к функционалу общего назначения современных географических информационных систем (ГИС). Таким образом, он должен создаваться в форме прикладной географической информационной системы на базе средств расширения функционала ГИС общего назначения [3].

Следовательно, разработка предметно-ориентированного комплекса моделирования поисковых КЭНС в форме прикладной географической информационной системы (ПГИС КЭНС) является актуальной задачей. И в первую очередь необходимо на основе прогноза влияния на развитие КЭНС новых принципов построения бортовых алгоритмов, их интеллектуализации и самоорганизации, применения специализированных процессоров, ориентированных на специфику параллельной структуры алгоритмов КЭНС, использования новых типов съемочных систем и их комплексирования, а также влияния других достижений информационных технологий, обосновать состав указанных программных компонентов ПГИС КЭНС, выделить те из них, функционал которых уже реализован в смежных областях, определить специфическую именно для КЭНС схему сборки из этих компонентов различных вариантов бортовых алгоритмов и макетов технологий подготовки данных для них. Новые варианты поисковых КЭНС позволят улучшить динамику систем автономного управления, используя принципы перенастраиваемых структур.

В данной статье рассмотрены только КЭНС с двумерным зондированием, в которых сравниваются текущие и эталонные изображения местности применительно к активным и пассивным бортовым съемочным системам в диапазонах длин волн электромагнитного излучения, для которых средства стрессового воздействия имеются или могут быть разработаны.

Для достижения этих целей в § 1 статьи описана максимально общая, но вместе с тем сохраняющая всю специфику поисковых алгоритмов КЭНС математическая модель поисковых алго-

ритмов и процедур их настройки на решение своей задачи в заданном районе, которая включает в себя модель совмещения изображений в качестве частного случая и описывает схему сборки существенно более широкого спектра вариантов КЭНС из программных компонентов, относящихся к перечисленным выше перспективным информационным технологиям и направлениям.

Учитывая повышенные требования к надежности КЭНС, важнейшим видом вычислительного эксперимента с моделями КЭНС является их стрессовое тестирование. В § 2 статьи построена общая математическая модель стрессовых воздействий, обеспечивающих фатальные отклонения от условий нормального функционирования КЭНС, и обоснованы требования к средствам их моделирования в составе ПГИС КЭНС.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОИСКОВЫХ АЛГОРИТМОВ КЭНС

Рассмотрим КЭНС, в которых съемочная система фиксирует изображение S сцены на участке местности, а бортовой алгоритм уточняет плановые координаты носителя в момент съемки, т. е. уточняемый параметр $d = (X, Y)$. Эти ограничения приняты исключительно для обеспечения возможности наглядной иллюстрации основных положений математической модели и облегчения их восприятия. Они, в конечном счете, не повлияют ни на множество охваченных моделью вариантов КЭНС и процедур их настройки на решение своей задачи в заданном районе, ни на общность результатов анализа модели и их практическую значимость для формирования замысла ПГИС КЭНС.

Будем считать, что район задан, если задано множество D всех возможных значений уточняемого параметра движения носителя в момент съемки, т. е. $d \in D$. Обозначим M множество всех изображений S , которые могут поступить от СС на вход бортового алгоритма КЭНС в заданном районе, т. е. при выполнении условия $d \in D$.

Тогда можно считать, что КЭНС подготовлена к решению своей задачи в заданном районе, если для любого $S \in M$ бортовой алгоритм готов выдать в качестве ответа правильное приближение $\hat{d} = (\hat{X}, \hat{Y}) \in \hat{D}$ к истинному значению $d \in D$ в момент получения изображения S , где \hat{D} – множество все возможных ответов бортового алгоритма. Для известных поисковых алгоритмов множество \hat{D} конечно и равно набору координат узлов сетки сдвигов рамки, выделяющей очередной фрагмент ЭИ в процессе совмещения текущего и эталонного

изображений в районе применения КЭНС: $\hat{D} = \{\hat{d}_{j_1 j_2}\}$, $j_1 = 1, 2, \dots, N_1$; $j_2 = 1, 2, \dots, N_2$. Так как

мы временно ограничились $D \subset R^2$, то приближение можно считать правильным, если $\rho(\hat{d}, d) \leq \varepsilon$,

где ρ – функция расстояния между двумя точками плоскости R^2 , а ε – допустимая ошибка, выраженная, например, в метрах. Заметим, что такую интерпретацию подготовки КЭНС к выполнению своей задачи в заданном районе можно рассматривать как первую итерацию на пути к общей математической постановке этой задачи. В традиционных понятиях данная задача состояла в подготовке актуального ЭИ на заданный район.

Очевидно, что возможность решения КЭНС своей задачи в заданном районе определяется наличием связи между полученными от СС изображениями и значениями уточняемого параметра движущегося объекта в момент съемки. Опишем эту связь функцией $f(S): M \rightarrow D$. Заметим, что в общем случае это многозначная функция: нельзя гарантировать, что изображения, попавшие в кадр при различных значениях уточняемого параметра движущегося объекта, обязательно различны. Кроме того, не только значения уточняемого параметра определяют содержание изображения. Например, при уточнении плановых координат следует учитывать влияние на изображение высоты движущегося объекта. Будем называть такие факторы и параметры возмущающими. Следовательно, функция $f^{-1}(d)$, обратная к $f(S)$, в общем случае также многозначна.

К возмущающим факторам можно отнести время года, метеоусловия в районе применения КЭНС и т. п. Отдельно нужно рассматривать стрессовые воздействия на СС КЭНС, которые могут быть целенаправленными. При этом стрессовые воздействия могут обеспечить фатальные отклонения от условий нормального функционирования КЭНС, когда она не сможет выполнить поставленную задачу. Моделирование стрессовых ситуаций в составе ПГИС КЭНС изложено в § 2.

Таким образом, навигационные свойства района применения КЭНС и условия ориентирования в нем можно изучать, анализируя функцию $f(S): M \rightarrow D$.

Выберем форму задания исходной информации о приближаемой функции $I_0\{f(S): M \rightarrow D\}$ при решении задачи настройки КЭНС на работу в заданном районе. Положим, что эта информация задана в виде имитационной компьютерной модели СС:



$$I_0 \{f(S): M \rightarrow D\} = \hat{f}^{-1}(d, p), \quad d \in D, \quad p \in P,$$

где $p \in P$ – учтенные при моделировании СС возмущающие параметры, сведенные в один обобщенный параметр p с областью допустимых значений P . Имитационная модель СС должна приближать функцию $f^{-1}(d), d \in D$, обратную к $f(S): M \rightarrow D$, что и отражено в ее обозначении.

Перейдем к бортовым алгоритмам КЭНС.

Если КЭНС уже подготовлена к решению своей задачи в заданном районе, то для любого $S \in M$ бортовой алгоритм выдаст некоторое значение $\hat{d} \in \hat{D}$, т. е. он готов вычислить значение некой однозначной функции $\hat{f}: M \rightarrow \hat{D}$ для любого $S \in M$. Но тогда можно считать, что в процессе подготовки было выбрано значение некоторого обобщенного параметра $\alpha^* \in A$, ввод которого в бортовую память КЭНС настроил ее на вычисление значений именно этой функции, выделив ее из параметрического семейства, т. е. КЭНС можно рассматривать как техническую реализацию параметрического семейства однозначных функций $\{\hat{f}(\alpha; S)\}_{\alpha \in A}$, где $\hat{f}(\alpha; S): M \rightarrow \hat{D}$ – конкретная функция из этого семейства, выбор которой однозначно определяется значением обобщенного параметра $\alpha \in A$. В традиционном понимании этот параметр есть ЭИ района применения. По всем признакам при самых общих предположениях задача подготовки КЭНС к работе в заданном районе оказалась задачей приближения функций, так как в результате подготовки выбирается функция $\hat{f}(\alpha^*; S)$, приближающая функцию $f(S)$ в некотором точном смысле, вытекающем из практических требований к КЭНС. Будем считать, что задан критерий близости двух функций: $\rho_M(\hat{f}, f) \leq \varepsilon$, где ρ_M – метрика в пространстве таких функций, а ε – положительное число.

Из арсенала параметрических семейств, применяемых для приближения классических числовых функций, выберем простейшее, и обобщим на функции, аргументы которых представлены матрицами изображений S , а значения (в простейшем случае) лежат в плоскости R^2 . Простейшим можно считать семейство ступенчатых функции одной числовой переменной. Область задания их аргумента на числовой оси разбита на непересекающиеся отрезки, в пределах которых значение функции постоянно.

Представим область задания функции \hat{f} в виде объединения l непересекающихся множеств, которые будем называть классами:

$$M = \bigcup_{j=1}^l K_j, \quad \text{где } K_j \cap K_t = \emptyset \text{ при } j \neq t. \quad (1)$$

Назовем функцию $\hat{f}(S)$ обобщенной ступенчатой функцией, если она при условии (1) описывается выражением

$$\hat{f}(S) = \sum_{j=1}^l \chi_j(S) \hat{d}_j, \quad (2)$$

где $\chi_j(S) = 1$, если $S \in K_j$, иначе $\chi_j(S) = 0$ т. е. $\chi_j(S)$ представляют собой характеристические функции классов K_j , а $\hat{D} = \{\hat{d}_1, \hat{d}_2, \dots, \hat{d}_l\}$. Обозначим $\mathbf{d} = (\hat{d}_1, \hat{d}_2, \dots, \hat{d}_l)$, $\mathbf{X}(S) = (\chi_1(S), \chi_2(S), \dots, \chi_l(S))$.

Тогда в векторной форме выражение (2) примет вид:

$$\hat{f}(S) = \langle \mathbf{X}(S), \mathbf{d} \rangle. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что задача вычисления значения функции $\mathbf{X}(S)$ есть известная задача отнесения объекта к одному из l непересекающихся классов K_1, K_2, \dots, K_l , и любой алгоритм ее решения по определению является алгоритмом распознавания образов [4]. Очевидно, что известные поисковые алгоритмы решают частный случай задачи распознавания образов в предположении, что множество изображений M представлено в виде объединения $l = N_1 \times N_2$ непересекающихся классов $K_{j_1 j_2}$. Изображение S принадлежит классу $K_{j_1 j_2}$, если оно получено в малой окрестности $\hat{D}_{j_1 j_2}$ узла $\hat{d}_{j_1 j_2}$ сетки сдвигов $\hat{D} = \{\hat{d}_{j_1 j_2}\}$, $j_1 = 1, 2, \dots, N_1$; $j_2 = 1, 2, \dots, N_2$. При этом любое изображение $S \in K_{j_1 j_2}$ совпадает с соответствующим узлу $\hat{d}_{j_1 j_2}$ фрагментом ЭИ с «точностью» до случайного «слагаемого» с известным законом распределения, как правило нормальным. Подобные предположения могут относиться как к исходным пространствам изображений, полученным от СС, так и к пространствам, полученным в результате применения к ним предварительных преобразований из арсенала методов повышения качества изображений или составления описаний сцен на участках местности, попавших в кадр [5, 6]. Имеем частный случай метода сравнения с эталонами, когда каждый класс описывается единственным эталоном.

Предварительные преобразования изображений в контексте распознавания образов реализуют функцию выделения рабочих признаков распознавания и должны быть обязательно учтены в модели бортовых алгоритмов. С учетом предварительного преобразования $\pi(S)$ изображения выражения (1), (2) и (3) примут вид (4), (5) и (6) соответственно:

$$\pi M = \bigcup_{j=1}^l \pi K_j, \quad (4)$$

где $\pi K_j \cap \pi K_t = \emptyset$ при $j \neq t$;

$$\hat{f}(S) = \sum_{j=1}^l \chi_j(\pi(S)) \hat{d}_j, \quad (5)$$

где $\chi_j(\pi(S)) = 1$, если $\pi(S) \in \pi K_j$, иначе $\chi_j(\pi(S)) = 0$, т. е. являются характеристическими функциями классов πK_j .

Обозначим

$$\mathbf{X}(\pi(S)) = (\chi_1(\pi(S)), \chi_2(\pi(S)), \dots, \chi_l(\pi(S))).$$

Тогда в векторной форме выражение (5) примет вид:

$$\hat{f}(S) = \langle \mathbf{X}(\pi(S)), \mathbf{d} \rangle. \quad (6)$$

В определенных условиях известные поисковые алгоритмы сталкиваются с проблемой больших зон поиска, когда применение глобальных схем приводит к необозримому перебору, а локальные градиентные методы не гарантируют достижения глобального экстремума функции сравнения. В то же время при наличии мощных возмущающих факторов перебор приходится осуществлять и в пространстве возмущающих параметров, т. е. фактически затрачивать вычислительные ресурсы на решение посторонних задач. В этих условиях одним из вариантов решения могут стать иерархические разбиения множества M на классы. Пусть число уровней такого разбиения $r = 2$.

Выражение (5) для обобщенной ступенчатой функции, заданной на двухуровневом иерархическом разбиении, приобретает вид:

$$\hat{f}(S) = \sum_{j_1=1}^l \chi_{j_1}(\pi(S)) \sum_{j_2=1}^{h_{j_1}} \chi_{j_1 j_2}(\pi_{j_1}(S)) \hat{d}_{j_1 j_2}. \quad (7)$$

В общем случае для произвольного числа уровней r получим:

$$\begin{aligned} \hat{f}(S) = & \sum_{j_1=1}^l \chi_{j_1}(\pi(S)) \sum_{j_2=1}^{h_{j_1}} \chi_{j_1 j_2}(\pi_{j_1}(S)) \dots \\ & \dots \sum_{j_r=1}^{h_{j_1 j_2 \dots j_{r-1}}} \chi_{j_1 j_2 \dots j_r}(\pi_{j_1 j_2 \dots j_{r-1}}(S)) \hat{d}_{j_1 j_2 \dots j_r}. \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, настройка КЭНС на работу в заданном районе может быть поставлена как задача приближения функций:

– функция $f(S): M \rightarrow D$ задана алгоритмом вычисления значений функции $\hat{f}^{-1}(d, p)$, $d \in D$, $p \in P$, аппроксимирующей обратную к f функцию $f^{-1}(d): D \rightarrow M$;

– в параметрическом семействе обобщенных ступенчатых функций $\{\hat{f}(\alpha; S): M \rightarrow \hat{D}\}_{\alpha \in A}$ вида

(8) требуется найти такое значение $\alpha^* \in A$, чтобы функция $\hat{f}(\alpha^*; S)$ приближала функцию $f(S)$;

– пример критерия приближения: $\rho_M(\hat{f}, f) \leq \varepsilon$, где ρ_M – метрика в пространстве таких функций, а ε – положительное число.

На данном этапе исследования уточнение критериев аппроксимации обратной функции и критерия приближения не требуется. Достаточно принять, что имитационная модель съемочной системы, реализованная в форме алгоритма вычисления обратной функции $\hat{f}^{-1}(d, p)$, обеспечивает возможность получения представительных (в смысле описания поведения приближаемой функции на множестве M) наборов «отсчетов» вида $((d, p); S)$.

Рассмотрим иллюстративный пример реализации в бортовом вычислителе семейства обобщенных ступенчатых функций вида (7). В литературе, посвященной проблематике КЭНС, распространен термин «эталонная карта местности». В рассмотренном примере использована картографическая интерпретация понятий предложенной математической модели, что оправдано историей: составление и применение карт человеком для ориентации на местности лежит в основе деятельности по развитию КЭНС [5, 7–9].

На рис. 1 представлен принцип работы традиционной КЭНС, дополненной модулем приближенной предварительной оценки координат управляемого объекта. Дополнительный модуль приблизительно в три раза сужает зону поиска для точного модуля. Заметим, что назначение модулей приближенной оценки заключается не только и не столько в сужении зоны поиска для точных алгоритмов в пространстве координат. Такие модули являются универсальными агрегаторами, приводящими неопределенность к виду, для которого агрегируемые точные модули эффективны. Пусть, например, местность в районе коррекции такова, что используемая в модуле точного определения

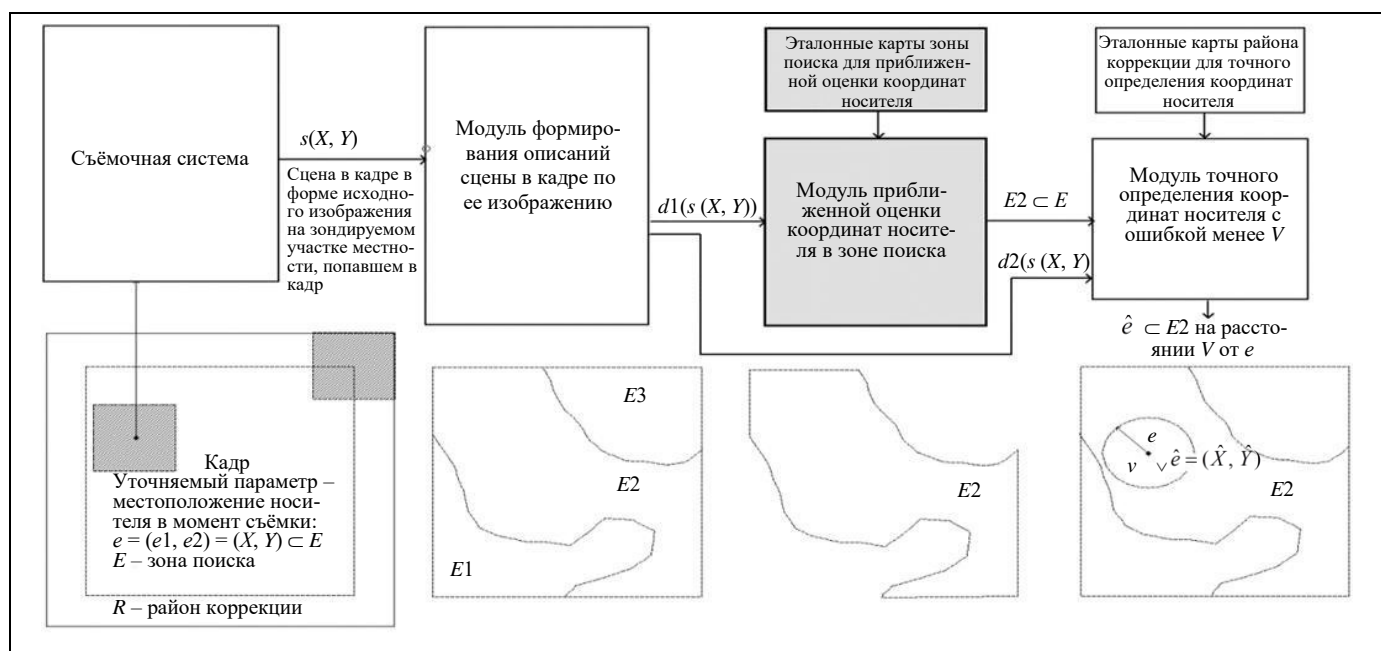


Рис. 1. Двухуровневый бортовой алгоритм КЭНС ($r = 2$)

координат функция сравнения текущего изображения с фрагментами эталонной карты имеет несколько близких по значению экстремумов. Тогда модуль не решит свою задачу в районе E . Если же районирование проведено так, что экстремум в пределах каждого из подрайонов $E1, E2, E3$ единственный, а агрегатор правильно определит, в котором из них получен кадр, то задача будет решена.

Указанные изменения в бортовых алгоритмах КЭНС порождают новые требования к ЭИ для КЭНС: если традиционные ЭИ являются аналитическими картами геофизических полей и составляются на районы, в границах которых лежат «рамки» всех изображений ландшафта, которые могут быть получены СС в период срабатывания в очередном сеансе уточнения и коррекции параметров движения ЛА с учетом отклонения значений этих параметров от запланированных, то ЭИ для дополнительных модулей иерархического поиска перспективных КЭНС должны состояться на зоны вероятных местоположений ЛА (зоны поиска), а не «рамки» изображений, а по своему содержанию они должны быть синтетическими специальными картами, описывающими типологию ландшафтов на участках местности, которые могут «попасть в кадр» в зоне поиска в период срабатывания датчика. Такие карты представляют собой карты районирования зон поиска, на которых в границах одного района лежат местоположения ЛА, которым соответствуют все кадры – участки зондирования, имеющие ландшафт одного типа, выявляемого по характеристикам ландшафта, ав-

томатически извлекаемым из данных, содержащихся в изображениях, полученных датчиками КЭНС во время сеанса коррекции. Состав информации определяется типом датчиков и бортовыми алгоритмами предварительного преобразования изображений и распознавания образов.

Изменения в содержании ЭИ показаны на рис. 2 и 3 на примере двухуровневой КЭНС (см. формулу (7)), в которой в процессе предварительного преобразования и выделения признаков формируется простейшее описание сцены на текущем изображении с помощью двух двоичных признаков $P1$ и $P2$: значение $P1$ равно единице, если на изображении обнаружен морфологический элемент местности «объект гидрографии», и нулю в противном случае; значение $P2$ равно единице, если на изображении обнаружен «объект суши», и нулю в противном случае.

Подобные описания сцен назовем морфологическими ориентирами [4]. Синтетические эталонные карты с границами областей $D1, D2, D3$ и тремя эталонами $(0,1), (1,0), (1,1)$ должны быть подготовлены заблаговременно [4]. Подчеркнем, что описан простейший пример, иллюстрирующий принцип, на котором работают модули предварительного оценивания: заблаговременная управляемая кластеризация множества возможных изображений, согласованная с районированием множества возможных значений местоположений, применение алгоритмов распознавания в смысле отнесения входного изображения к одному из заранее фиксированных классов по описанию этих классов на языке признаков.

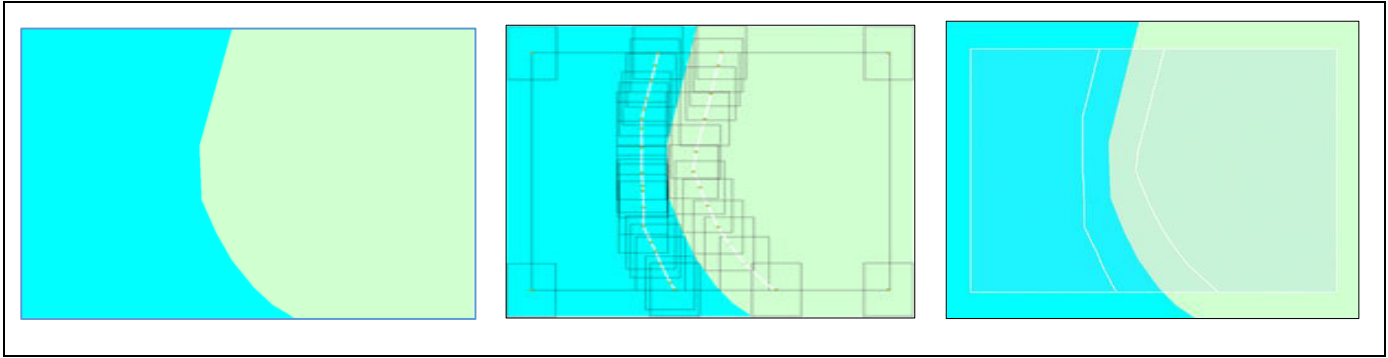


Рис. 2. Район коррекции, участки съемки (кадры), зона поиска

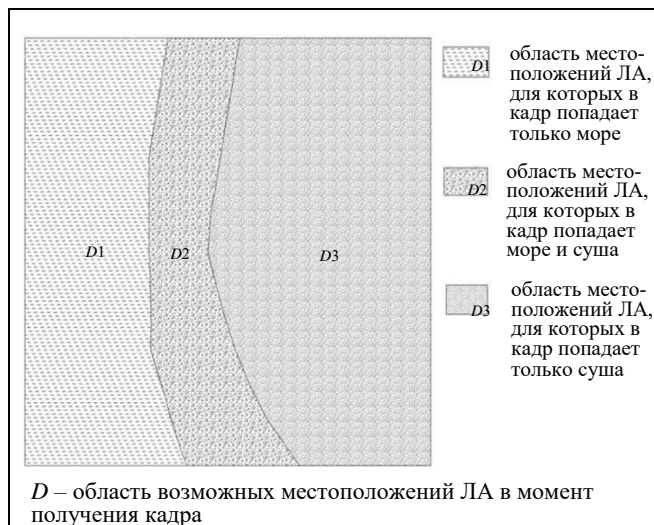


Рис. 3. Синтетическая эталонная карта районирования зоны поиска

Признаковое пространство – любое из апробированных в большой практике распознавания. Частный случай – структурные (морфологические, синтаксические) пространства признаков, например, рассмотренное выше, или смешанные – вектор долей площади, занимаемой каждым морфологическим элементом местности в кадре [4, 5, 9].

В общем случае морфологические описания могут быть построены с учетом множества объектов местности. Состав объектов морфологического ориентира ограничивается, с одной стороны, возможностью получения актуальных сведений о границах их распространения, а с другой – возможностью автоматического обнаружения этих объектов за допустимое время модулем предварительной обработки бортового алгоритма в период активизации.

Еще одно направление детализации морфологических описаний – учет отношений и связей между объектами сцены. В этом случае появляется возможность более полного учета специфики

местности при решении КЭНС своей задачи. Но кроме сведений о границах распространения объектов, потребуются сведения и об учитываемых отношениях между ними, а блок формирования описания сцен должен быть настроен на автоматическое распознавание этих отношений и связей во время сеанса активизации КЭНС. Например, отношение вложения (один объект расположен внутри другого) или отношение порядка, учитывающее порядок следования объектов при просмотре сцены по заданным правилам [10–12].

При существенном влиянии возмущающих параметров на сцены и их изображения могут потребоваться серии эталонных карт районирования по областям распространения морфологических ориентиров для определенных рядов значений этих параметров. Пусть, например, возмущающим параметром является высота съемки. Тогда серия соответствует специально выбранному набору высот, т. е. необходима мультимасштабная карта районирования по областям распространения морфологических ориентиров.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТРЕССОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Постановка задачи. Известно распределение яркостей физического поля a_{ij} в районе тестирования КЭНС. Имеется N средств стрессового воздействия. Пусть предложен вариант размещения указанных средств стрессового воздействия, состоящий в том, что k -е средство размещено в точке с пиксельными координатами (x_k, y_k) , $k = 1, \dots, N$. Требуется автоматически вычислить оптимальные мощности A_k каждого из N средств стрессового воздействия, обеспечивающие минимум корреляции между текущим изображением и изображением, полученным в результате стрессового воздействия. В простейшем случае считается, что корреляция вычисляется по окну $1 \leq i \leq Mx$, $1 \leq j \leq My$.



Решение задачи. В случае описанной расстановки средств стрессового воздействия яркость поля в точке (i, j) равна (9)

$$a_{ij} + \sum_{k=1}^N A_k \delta_k(i - x_k, j - y_k). \quad (9)$$

Корреляция между этими изображениями равна

$$C = \frac{\sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij} \left(a_{ij} + \sum_{k=1}^N A_k \delta_k(i - x_k, j - y_k) \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij}^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} \left(a_{ij} + \sum_{k=1}^N A_k \delta_k(i - x_k, j - y_k) \right)^2}}. \quad (10)$$

Для решения задачи необходимо найти вектор амплитуд (A_1, \dots, A_N) , при котором значение корреляции C минимально. Условием минимальности является равенство нулю всех частных производных C по A_k . Вычислим частные производные (9):

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial A_s} &= \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij}^2}} \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij} \delta_s(i - x_s, j - y_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} \left(a_{ij} + \sum_{k=1}^N A_k \delta_k(i - x_k, j - y_k) \right)^2}} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij} \left(a_{ij} + \sum_{k=1}^N A_k \delta_k(i - x_k, j - y_k) \right) \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} \left(\delta_s(i - x_s, j - y_s) \left(a_{ij} + \sum_{k=1}^N A_k \delta_k(i - x_k, j - y_k) \right) \right)}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} \left(a_{ij} + \sum_{k=1}^N A_k \delta_k(i - x_k, j - y_k) \right)^2 \right)^3}} \right\} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij}^2} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} \left(a_{ij} + \sum_{k=1}^N A_k \delta_k(i - x_k, j - y_k) \right)^2 \right)^3}} \times \\ &\quad \times \left\{ \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij} \delta_s(i - x_s, j - y_s) \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} \left(a_{ij} + \sum_{k=1}^N A_k \delta_k(i - x_k, j - y_k) \right)^2 - \right. \\ &\quad \left. - \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij} \left(a_{ij} + \sum_{k=1}^N A_k \delta_k(i - x_k, j - y_k) \right) \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} \left(\delta_s(i - x_s, j - y_s) \left(a_{ij} + \sum_{k=1}^N A_k \delta_k(i - x_k, j - y_k) \right) \right) \right\} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij}^2} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} \left(a_{ij} + \sum_{k=1}^N A_k \delta_k(i - x_k, j - y_k) \right)^2 \right)^3}} \times \\ &\quad \times \left\{ \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij} \delta_s(i - x_s, j - y_s) \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij}^2 + 2 \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij} \delta_s(i - x_s, j - y_s) \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} \sum_{k=1}^N A_k \delta_k(i - x_k, j - y_k) + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij} \delta_s(i - x_s, j - y_s) \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} \left(\sum_{k=1}^N A_k \delta_k(i - x_k, j - y_k) \right)^2 - \right. \\ &\quad \left. - \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij}^2 \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij} \delta_s(i - x_s, j - y_s) - \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij}^2 \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} \left(\delta_s(i - x_s, j - y_s) \sum_{k=1}^N A_k \delta_k(i - x_k, j - y_k) \right) \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} \left(a_{ij} \sum_{k=1}^N A_k \delta_k(i-x_k, j-y_k) \right) \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij} \delta_s(i-x_s, j-y_s) - \\
 & \left. - \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} \left(a_{ij} \sum_{k=1}^N A_k \delta_k(i-x_k, j-y_k) \right) \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} \left(\delta_s(i-x_s, j-y_s) \sum_{k=1}^N A_k \delta_k(i-x_k, j-y_k) \right) \right\} =
 \end{aligned}$$

(прим. авт. *подчеркнутые члены взаимно сокращаются, при равенстве всех A_k нулю все производные обращаются в нуль, что соответствует максимуму корреляции*)

$$\begin{aligned}
 & = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij}^2} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} \left(a_{ij} + \sum_{k=1}^N A_k \delta_k(i-x_k, j-y_k) \right)^2 \right)^3}} \times \\
 & \times \left\{ 2 \sum_{k=1}^N A_k \left(\sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij} \delta_s(i-x_s, j-y_s) \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij} \delta_k(i-x_k, j-y_k) \right) + \right. \\
 & + \sum_{k=1}^N A_k \left(\sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij}^2 \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} \delta_s(i-x_s, j-y_s) \delta_k(i-x_k, j-y_k) \right) - \\
 & - \sum_{k=1}^N A_k \left(\sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij} \delta_s(i-x_s, j-y_s) \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij} \delta_k(i-x_k, j-y_k) \right) + \\
 & + \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij} \delta_s(i-x_s, j-y_s) \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} \left(\sum_{k=1}^N A_k \delta_k(i-x_k, j-y_k) \right)^2 - \\
 & \left. - \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} \left(a_{ij} \sum_{k=1}^N A_k \delta_k(i-x_k, j-y_k) \right) \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} \left(\delta_s(i-x_s, j-y_s) \sum_{k=1}^N A_k \delta_k(i-x_k, j-y_k) \right) \right\} = \\
 & = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij}^2} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} \left(a_{ij} + \sum_{k=1}^N A_k \delta_k(i-x_k, j-y_k) \right)^2 \right)^3}} \times \\
 & \times \left\{ \sum_{k=1}^N A_k \left(\sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij} \delta_s(i-x_s, j-y_s) \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij} \delta_k(i-x_k, j-y_k) \right) + \right. \\
 & + \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij} \delta_s(i-x_s, j-y_s) \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} \left(\sum_{k=1}^N A_k \delta_k(i-x_k, j-y_k) \right)^2 - \\
 & - \sum_{k=1}^N A_k \left(\sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij}^2 \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} \delta_s(i-x_s, j-y_s) \delta_k(i-x_k, j-y_k) \right) - \\
 & \left. - \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} \left(a_{ij} \sum_{k=1}^N A_k \delta_k(i-x_k, j-y_k) \right) \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} \left(\delta_s(i-x_s, j-y_s) \sum_{k=1}^N A_k \delta_k(i-x_k, j-y_k) \right) \right\}.
 \end{aligned}$$

Таким образом, для нахождения оптимальных амплитуд получается система N квадратных уравнений с N неизвестными. Коэффициент при A_k^2 равен

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij} \delta_s(i-x_s, j-y_s) \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} \delta_k(i-x_k, j-y_k)^2 - \\
 & - \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} a_{ij} \delta_k(i-x_k, j-y_k) \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} (\delta_s(i-x_s, j-y_s) \delta_k(i-x_k, j-y_k)).
 \end{aligned} \tag{11}$$



При $s = k$, A_s равен нулю. Таким образом, производная $\frac{\partial C}{\partial A_s}$ зависит от A_s линейно, и при фиксированных значениях A_k , $k \neq s$, оптимальное значение A_s получается однозначно (11).

Указанная линейная зависимость позволяет управлять корреляцией C , минимально допустимое значение которой может быть заранее установлено в соответствии с частотно-метрическими свойствами поля тестирования. Установка в конкретных точках поля средств стрессового воздействия с амплитудой A_k обеспечивает построение вектора оптимальных амплитуд установленных средств, при котором значение корреляции C минимально. Достаточное условие минимизации корреляции текущего изображения и изображения, полученного до стрессового воздействия, определяется вектором A_k и его размерностью, соответствующей количеству N средств стрессового воздействия, зависящего от свойств поля района тестирования.

Алгоритм нахождения оптимальных параметров средств стрессового искажения таков:

1. Вычисление квадратичных функций, являющихся числителями полученных выражений для частных производных.

2. Цикл до сходимости. В каждом цикле:

2.1. Цикл по s от 1 до N . В каждом цикле:

2.1.1. Вычисление при фиксированных значениях A_k , $k \neq s$, однозначно получаемых значений A_s .

Каждая итерация при этом обеспечивает минимизацию корреляции путем выбора одной амплитуды, т. е. в результате каждой итерации значение корреляции уменьшается. Таким образом, монотонность изменения целевой функции обеспечивает сходимость описанного алгоритма.

Производится последовательный отбор точек (i, j) , в которых величина яркости поля в заданном диапазоне длин волн λ значительно больше среднего значения яркости района тестирования. В каждом цикле итерации значение A_k изменяется до получения минимума корреляции между текущим изображением и изображением, полученным до стрессового воздействия на район тестирования в окне с размерами $1 \leq i \leq Mx$, $1 \leq j \leq My$. Для выбранного типа изображения устанавливается свой диапазон изменения значений A_k для управления циклом.

Решение этой задачи получается путем применения итерационного процесса обобщенного поординатного спуска. Каждая итерация включает в себя:

- Минимизацию корреляции путем выбора оптимальных амплитуд при текущем положении средств стрессового воздействия. Сейчас эта задача решена.

- Минимизацию корреляции путем выбора оптимальных положений размещения средств стрессового воздействия при их текущих значениях амплитуд. Эта задача также решена. Решение этой задачи в данной статье не приводится.

Значения A_k для конкретных средств стрессового воздействия для заданных диапазонов длин волн электромагнитного излучения представлены в специальных источниках. Перед тестированием КЭНС, как правило, средства стрессового воздействия калибруются СС КЭНС.

При реализации данного алгоритма каждое средство стрессового искажения должно быть установлено в соответствии с вычисленными координатами. В зависимости от значения амплитуды в точке с заданными координатами выбирается необходимое средство для стрессового искажения среды функционирования КЭНС. В связи со значительными объемами результатов этих исследований в данной статье они не помещены. Однако вопросы управления средствами стрессового воздействия на КЭНС являются проблемными задачами, требующими своего решения [13, 14].

Средства стрессового воздействия на СС КЭНС должны обеспечивать изменение параметров физических полей Земли в разных диапазонах длин волн электромагнитного излучения. Как правило, это оптические, тепловые, радиотепловые, радиолокационные, геомагнитные и другие геопро-странственные поля Земли. Математическая модель стрессового воздействия на КЭНС должна учитываться при синтезе новых навигационных систем, что обеспечит создание современных высокоэффективных КЭНС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получена математическая модель поисковых алгоритмов в виде параметрического семейства алгоритмов вычисления обобщенных ступенчатых функций, которая включает в себя модель совмещения изображений в качестве частного случая и описывает схему сборки из алгоритмов выделения признаков на изображениях, описания сцен и классификации существенно более широкого спектра вариантов бортовых алгоритмов КЭНС.

Задача настройки бортового алгоритма КЭНС на решение своей задачи в заданном районе, КЭНС

сведена к задаче приближения заданной функции от изображений со значениями в пространстве уточняемых параметров движущегося объекта обобщенными ступенчатыми функциями. Решение этой задачи сводится к решению задач обучения и самообучения иерархической классификации изображений.

Прикладная ГИС для разработчиков КЭНС и технологий их настройки на решение своей задачи в заданных районах – ПГИС КЭНС – является средством ускорения развития систем управления движущимися объектами, оснащенными КЭНС. Анализ полученной математической модели показал, что существующие модули совмещения изображений, решающие задачу поиска значений оцениваемых параметров движения с требуемой точностью корреляционными методами, должны быть дополнены модулями предварительной приближенной оценки параметров движения методами иерархического распознавания образов. Такие модули при каждой итерации относят изображения к одному из конечного числа классов с помощью методов решения невырожденных задач распознавания образов. Модули совмещения изображений подключаются на последнем шаге. Задача дополнительных модулей заключается в уменьшении неопределенности до уровня, на котором модули совмещения изображений способны эффективно решить свою задачу с требуемой точностью, не будучи в состоянии сделать это при начальном уровне неопределенности. Из этого следует, что в состав программных компонент ПГИС КЭНС необходимо включить компоненты, реализующие известные алгоритмы распознавания, выделения признаков на изображениях и описания сцен.

Настройка КЭНС на решение своей задачи в заданном районе невозможна без наличия имитационных компьютерных моделей используемых ею съемочных систем, способных синтезировать изображения подобно СС для всех возможных районов и условий их применения. В состав ПГИС КЭНС необходимо включить реализующие эти модели программные компоненты, геопространственные данные и модели местности.

Решение задачи настройки сводится к решению невырожденных задач распознавания образов и предполагает построение иерархических разбиений на классы и настройку алгоритмов распознавания, согласованную с районированием территории применения КЭНС с использованием всего арсенала современных средств обучения и самообучения распознающих систем, включая обучение нейросетей. Следовательно, в состав программных компонент ПГИС КЭНС должны

быть включены библиотеки компонентов, относящихся ко всем перечисленным смежным областям исследований и разработок.

Комплекс взглядов на синтез условий применения КЭНС в условиях изменяющейся среды с учетом стрессовых воздействий образуют взаимосвязанную систему. Без должного учета этой системы которой невозможно достичь необходимого эффекта применения КЭНС.

Направлениями дальнейших исследований являются:

- Детализация полученной постановки задачи приближения функций в части критериев приближения, требований к имитационным моделям съемочных систем и их комплексов и дальнейшее математическое исследование этой задачи.

- Построение общей схемы сборки бортовых алгоритмов КЭНС и процедур их настройки на решение своей задачи в заданных районах на основе полученных выше выражений и схем обучения и самообучения распознаванию образов и классификации.

- Разработка методов построения иерархических разбиений множеств изображений на классы, согласованных с районированием территории применения КЭНС.

- Развитие построенной математической модели, описывающей обобщенные ступенчатые функции, с целью выяснения специфики параллельной структуры бортовых алгоритмов КЭНС в интересах проектирования специальных процессоров для бортовых вычислителей.

- Развитие решения задачи стрессового воздействия на КЭНС применительно к различным типам КЭНС, использующим физические поля Земли в разных спектрах длин волн электромагнитного излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоглазов И. Н., Джанжгава Г.И., Чигин Г.П. Основы навигации по геофизическим полям. – М: Наука, 1985. – 328 с. [Beloglazov, I.N., Dzhanjgava, G.I., Chigin, G.P. Osnovy navigatsii po geofizicheskim polyam. – М: Nauka, 1985. – 328 s. (In Russian)]
2. Августов Л.И. Ориентация по геофизическим полям обеспечивает автономность навигации боевого летательного аппарата // Коммерсант-наука. – 2015. – № 2. – С. 34–35. [Avgustov, L.I. Orientatsiya po geofizicheskim polyam obespechivaet avtonomnost' navigatsii boevogo letatel'nogo apparata // Kommersant-nauka. – 2015. – No. 2. – S. 34–35. (In Russian)]
3. Zhangcai, Y. A Multi-Scale GIS Database Model Based in Petri Net // Proceedings of ISPRS Workshop on Service and Application of Spatial Data Infrastructure, XXXVI(4/W6). – Hangzhou, China, 2005. – P. 271–275.



4. *Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A.* Deep Learning. – Cambridge: MIT Press, 2016. – <http://www.deeplearningbook.org/>.
5. *Ali, R.A., Hardie, R.C.* Recursive Non-local Means Filter for Video Denoising // EURASIP Journal on Image and Video Processing. – 2017. – Art. – No. 29 (2017).
6. *Almahdi, R.A., Hardie, R.C.* Recursive Non-local Means Filter for Video Denoising with Poisson-Gaussian Noise // 2016 IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON) and Ohio Innovation Summit (OIS). – Dayton, OH, USA, 2016. – P. 318–322.
7. *Дуда Р., Харт П.* Распознавание образов и анализ сцен. – М.: Мир, 1978. – 511 с. [*Duda, R.O., Hart, P.E.* Pattern Classification and Scene Analysis. – N.-Y.: John Wiley & Sons, 1973. – 482 p.]
8. *Алчинов А.И., Беклемисhev Н. Д., Кекелидзе В.В.* Методы цифровой фотограмметрии. – М.: Технология «Талка», 2007. – 260 с. [*Alchinov, A.I., Beklemishev, N.D., Kekelidze, V.V.* Metody tsifrovoi fotogrammetrii. – М.: Tekhnologiya «Talka», 2007. – 260 s. (In Russian)]
9. *Майоров А. А., Матерухин А.В., Кондауров И. Н.* Структура системы обработки потоковых данных в геосенсорных сетях // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2018. – Т. 62, № 6. – С. 712–719. [*Maurov, A.A., Materukhin, A.V., Kondaurov, I.N.* Struktura sistemy obrabotki potokovykh dannykh v geosensornykh setyakh // Izv. vuzov «Geodeziya i aehrofotos"emka». – 2018. – Vol. 62, no 6. – S. 712–719. (In Russian)]
10. *Гороховский И. Н., Балин Б.М.* К вопросу об автоматизированном проектировании и исследовании одного семейства корреляционно-экстремальных систем навигации // Автоматизация проектирования и исследований корреляционно-экстремальных систем / под ред. В. П. Тарасенко. – Томск: Изд. ТГУ, 1987. [*Gorokhovskii, I.N., Balin, B.M.* K voprosu ob avtomatizirovannom proektirovani i issledovanii odnogo semeistva korrelyatsionno-ehkstremaal'nykh sistem navigatsii // Avtomatizatsiya proektirovaniya i issledovanii korrelyatsionno-ehkstremaal'nykh system / pod red. V.P. Tarasenko. – Tomsk: Izd. TGU, 1987. (In Russian)]
11. *Справочник по теории автоматического управления / под редакцией А. А. Красовского. – М: Наука, 1987. – 712 с. [Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya / pod redaktsiei A.A. Krasovskogo. – М: Nauka, 1987. – 712 s. (In Russian)]*
12. *Syryamkin, V.I., Shidlovsky, V.S.* Correlation-Extremal Direction-Finding Systems. – Tomsk: Tomsk State University publishing house, 2010. – 317 p.
13. *Gaspar, J., Ferreira, R., Sebastião, P. and Souto, N.* Capture of UAVs Through GPS Spoofing // Proceedings of 2018 Global Wireless Summit (GWS). – Chiang Rai, Thailand, 2018. – P. 21–26. – DOI: 10.1109/GWS.2018.8686727.
14. *Zhang, D., Zhou, X., Chang, E., Wa, H., Chen, Y.* Investigation on Effects of HP Pulse on UAV's Datalink // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2020. – Vol. 62. – P. 829–839.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Б.В. Павловым.

*Поступила в редакцию 5.10.2021,
после доработки 11.11.2021.
Принята к публикации 23.12.2021.*

Алчинов Александр Иванович – д-р техн. наук, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ alchinov46@mail.ru,

Гороховский Игорь Николаевич – канд. техн. наук, НИЦ ТГНО 27 ЦНИИ, Москва, ✉ gin_box@mail.ru.

A CONCEPTUAL APPLIED GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM FOR MODELING SEARCH AUTONOMOUS CORRELATION-EXTREME NAVIGATION SYSTEMS

A.I. Alchinov¹ and I.N. Gorokhovskiy²

¹Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Research Center of Topographic and Navigational Support, Central Research Institute No. 27, Moscow, Russia

✉ alchinov46@mail.ru, ✉ gin_box@mail.ru

Abstract. This paper presents a conceptual applied geographic information system (AGIS) for modeling search correlation-extreme navigation systems (CENSs) to control moving objects. As demonstrated below, the development and mass implementation of autonomous navigation systems of this type as the only alternative to satellite navigation systems can currently be based on subject-oriented information technology. The AGIS can be used to assemble models of a wide range of CENSs and models of technologies for adjusting their operation in specified areas with necessary computational experiments. The required software components, storage structure, and interface features are determined by constructing a general mathematical model. While preserving all specifics of the search algorithms of CENSs, this model covers the well-known image combining algorithms and, moreover, includes a synthesis scheme for search algorithms of new-type CENSs using pattern recognition and scene analysis, clustering, neural network training, and cloud data processing. Stress testing is the most important type of computational experiments with CENS models. A mathematical model of stress effects is constructed for a particular case. It describes various operating conditions for CENSs, including fatal deviations from normal operation.

Keywords: applied geographic information system, correlation-extreme navigation system, shooting system, pattern recognition, scene analysis, learning machines, neural network, parallel computing, cloud computing, mathematical modeling, stress testing of the system.



УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОВЫМ ПОВЕДЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ: ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

В.П. Кутахов, Р.В. Мещеряков

Аннотация. Рассмотрены элементы группы беспилотных летательных аппаратов (БЛА) для формирования различных задач группы и в группе авиационных систем. Предлагается формирование различных фаз выполнения действий управления группой авиационных систем беспилотных летательных аппаратов, которые показаны на примере выбора различных целей для элементов группы (БЛА). Фазы являются элементами крупномасштабного поведения группы и в группе БЛА, которые могут включаться в цикл при использовании технологий искусственного интеллекта. Проведена формализация с точки зрения как монофункциональных БЛА для выбора множества конечных действий, так и многофункциональных БЛА для группового выполнения одной или нескольких функций воздействия. Представлена постановка задачи группового поведения для применения технологий искусственного интеллекта. Сформулированы основные элементы системы отношений и условий эффективности выполнения задач при управлении группой БЛА и действий в группе как крупномасштабной системой, отражающей постановку задачи для применения технологий искусственного интеллекта. Делается вывод о перспективности использования гомогенных и гетерогенных групп БЛА в интерпретации формального поведения робототехнических систем.

Ключевые слова: БЛА, робототехника, беспилотные авиационные системы, искусственный интеллект.

ВВЕДЕНИЕ

Перспективы развития беспилотной техники, в особенности беспилотных авиационных систем, связаны с групповым применением, с созданием больших групп разнородных беспилотных летательных аппаратов (БЛА), глубоко информационно связанных между собой и действующих совместно в интересах выполнения общей задачи. Авторы полагают, что в области создания таких беспилотных систем, представляющих собой крупномасштабные образования, значительное место должны занимать интенсивно развиваемые в настоящее время методы и технологии искусственного интеллекта (ИИ). В данной статье будут обсуждены подходы к управлению группами БЛА и направления использования технологий ИИ в задачах их коллективного применения. Как будет показано ниже, основной особенностью задачи управления груп-

пой в целом, в отличие от управления отдельным БЛА, является то, что она представляет собой последовательность задач принятия решений, и, в меньшей степени, динамических задач по реализации этих решений.

В настоящее время в беспилотной технике доминируют дистанционно пилотируемые средства, опирающиеся в своем применении на «естественный интеллект» оператора. Ненадежность или перегруженность линий связи, прогнозируемая массовость применения БЛА, вступающая в противоречие с допустимой численностью операторов, приводят к переходу к частичному или полному автономному управлению, к логичному выводу о необходимости интенсификации исследований в направлении автономизации действий БЛА и групп БЛА. [1]

Использование технологий искусственного интеллекта ориентировано в настоящее время прежде

всего на применение в системах управления БЛА и в полезной нагрузке БЛА. Сравнение двух одиночных БЛА, одного с элементами искусственного интеллекта, а второго без него, проводилось в работе [2]. Показано, что восприятие, принятие решений, поведение и обучение определяет эффективность обнаружения и оценивается на основе ошибок первого и второго рода. Более высокие оценки получили БЛА с использованием технологии искусственного интеллекта. Конечно же, распространены решения задач SLAM (*simultaneous localization and mapping*) для БЛА с применением технологий ИИ [3] и вряд ли стоит надеяться на прорывные результаты в ближайшее время.

В ряде работ рассматриваются частные задачи применения технологий ИИ в работе БЛА. Например, в работе [4] представлена бортовая система обнаружения, отслеживания и уклонения от целей для недорогих полетных контроллеров БЛА с использованием технологий искусственного интеллекта. Распространенным является применение методов обработки информации с систем технического зрения для использования в качестве навигационной системы [5], для использования в разведке с целью поиска и распознавания объектов интереса [6, 7], для использования в системе управления [8]. Активно развиваются фреймворки для встраивания технологий ИИ в БЛА [9]. Важным для любой системы управления является обеспечение ее кибербезопасности [10–14]. Оригинальными результатами в этой области являются методы контроля каналов управления и противодействия атакам на нее, в том числе при реализации идеи «умного города» (*Smart City*).

Авторы полагают, что наиболее перспективное и результативное применение ИИ следует рассматривать в области беспилотных систем различного назначения, а еще более перспективно – в создании крупномасштабных многофункциональных беспилотных систем [15]. Такие системы могут решать задачи сельского хозяйства [16, 17], лесо- и биохраны [18], обслуживания ЛЭП [19], контроля движения объектов, действий в условиях природных и техногенных катастроф [20, 21], таких как доставка, эвакуация, транспортные и другие задачи в связи с текущими запросами. Наверное, следует ожидать таких же решений в оборонной отрасли. [22, 23]. Использование современных технологий управления роем и технологий связи MANET (*Mobile Ad hoc NETWORK*) представляет интерес для сочетания эффективной организации в группе [13, 24], но не удовлетворяет условиям развития полноценной гетерогенной системы.

В ближайшей перспективе нужно рассматривать применение крупномасштабных информационно-исполнительных авиационных систем БЛА (введем аббревиатуру АС БЛА) [15], состоящих из информационно связанных разнородных БЛА. Представляется обоснованным, что эти системы должны состоять из совокупности однофункциональных БЛА различного информационного и исполнительного назначения.

В проблемах организации действий больших групп БЛА, управления группами БЛА, по мнению авторов, следует обратить внимание на новый ряд задач, связанных с групповым глубоким взаимодействием аппаратов, образующих разнородную группу при выполнении сложных, зачастую малоопределенных действий, на нахождение новых подходов и формирование новых путей решения задач управления группой.

В концепции автономного поведения БЛА и, особенно, АС БЛА ключевую роль занимают задачи интеллектуализации управления поведением отдельных аппаратов в группе для обеспечения согласованных действий для выполнения единого общего задания. Отдельное место в этих задачах управления занимают задачи принятия решений, связанных с реализацией способов, приемов действий, с распределением функций в рамках коллективных действий БЛА в рамках сложного целевого задания, поставленного АС БЛА. В простейших целевых заданиях можно обойтись традиционными методами создания соответствующих алгоритмов интеллектуального управления [23]. Но при усложнении этих заданий, при существенном увеличении численности группы проявляется целесообразность и необходимость применения технологий искусственного интеллекта (ИИ).

Необходимо формализовать задачи интеллектуализации деятельности АС БЛА, структурировать их, выделить отдельные подзадачи, определить адекватные методы их решения и адекватного использования технологий ИИ в них.

1. ФАЗЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ АС БЛА

Для конкретизации постановок задач ИИ развернем действия АС БЛА после формулирования целевого задания по фазам. Каждой фазе может быть поставлена в соответствие научная задача по управлению действиями групп и принятию решений в отношении того или другого способа действий. Определим отдельные научные задачи управления АС БЛА, необходимые для реализации на этих фазах.



Фаза 1 – определение состава группы, исходя из целевого задания. Здесь задача состоит в том, чтобы сформировать рациональный состав группы разнородных однофункциональных БЛА исходя из планируемого пространственного размаха действий, априорных данных о целях и условиях действий и имеющихся ресурсов. Это задача принятия решения в условиях ограничений. Задача усложняется наличием неопределенности априорных данных и размытостью прогноза априорных данных на период полета группы. А также, что весьма важно для крупномасштабного применения БЛА, – размытостью, нечеткостью формулирования задания: например, провести комплекс мероприятий в зоне стихийного бедствия с максимальной эффективностью.

Фаза 2 – управление формированием группы в зоне действия. Это выстраивание пространственной конфигурации группы исходя из функциональных возможностей элементов группы. Это задача, решаемая нынче человеком высокой квалификации даже для малых групп исполнителей. Эту задачу также следует отнести к классу задач принятия решений.

Фаза 3 – мониторинг зоны ответственности различными информационными средствами различных пространственно разнесенных БЛА, обнаружение целевых объектов по результатам объединения информации от разнородных информационных систем и оценка обстановки в зоне действий. Оценка обстановки определим как задачу принятия решений.

Фаза 4 – целераспределение, т. е. распределение между БЛА группы конкретных действий над конкретными объектами. Рассмотрим задачу принятия решения при целераспределении ниже.

Фаза 5 – фаза целеуказания по результатам распределения с учетом пространственного расположения БЛА и объектов, влияния среды, различий и особенностей информационных признаков объектов.

Фаза 6 – оценка результативности действий, а также технического состояния элементов группы.

Фаза 7 – фаза реконфигурации АС БЛА, на которой производится обращение к фазе 3, но уже в новых текущих условиях.

Эта разбивка по фазам условна и иллюстративна. Эти фазы по времени могут быть совмещены, что, конечно же, существенно усложняет перечисленные задачи. Например, процесс реконфигурации может происходить на любой фазе в зависимости от изменяющихся условий в процессе выполнения задания.

Авторы могут добавить к вышеприведенному перечню задач еще и задачи управления информационным взаимодействием в группе, задачи выбора иерархической структуры управления группой на каждом этапе и некоторые другие, анализ и перечисление которых не входит в рамки данной статьи. Тем более что зачастую невозможно их выделить в отдельную фазу.

Вообще, в рамках выше определенных научных задач по управлению группой БЛА и их информационному взаимодействию можно выделить значительное множество задач и технологий их решения, многие из них частично пересекаются. Еще раз подчеркнем, что при достаточной малочисленности групп можно решать эти задачи традиционными путями и методами, но при увеличении масштаба группы, по нашему мнению, необходимо обратиться к методам и технологиям ИИ. И самая сложная задача, мегазадача для ИИ – это формирование управления на основе решения перечисленных задач, теперь уже подзадач.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ АС БЛА

Вернемся к вопросу формулирования научных задач по управлению группой БЛА, т. е., как было введено ранее, – АС БЛА. Уже декларировалось выше, что каждой их определенных фаз может быть поставлена в соответствие научная задача, которую необходимо решить с получением рационального решения. Формализуем постановку задачи, соответствующую одной из фаз – фазе целераспределения. Она иллюстрируется рисунком.

Имеем: группу из N БЛА, сформированную на предыдущих фазах. Каждый i -й БЛА имеет свою функцию. Совокупность БЛА представим векторами координат r_i и свойств q_i размерностью N . В состав группы входят БЛА, оснащенные информационными системами, позволяющими обнаруживать и распознавать объекты – оптикоэлектронными средствами (ОЭС), радиолокационными средствами (РЛС), средствами радиотехнической разведки (РТР). В состав группы входят также БЛА со средствами воздействия, транспортные БЛА и др. Для управления группой, решения задач организации взаимодействия в ее составе может быть БЛА – лидер группы. Вся группа объединена в единое информационное пространство.

Имеем также группу объектов, обнаруженных и идентифицированных на предыдущих фазах – группу j -х объектов, подлежащих воздействию, численностью M : $j=1, \dots, M$, также со своими свойствами и координатами q_j и r_j . Элементы групп N и

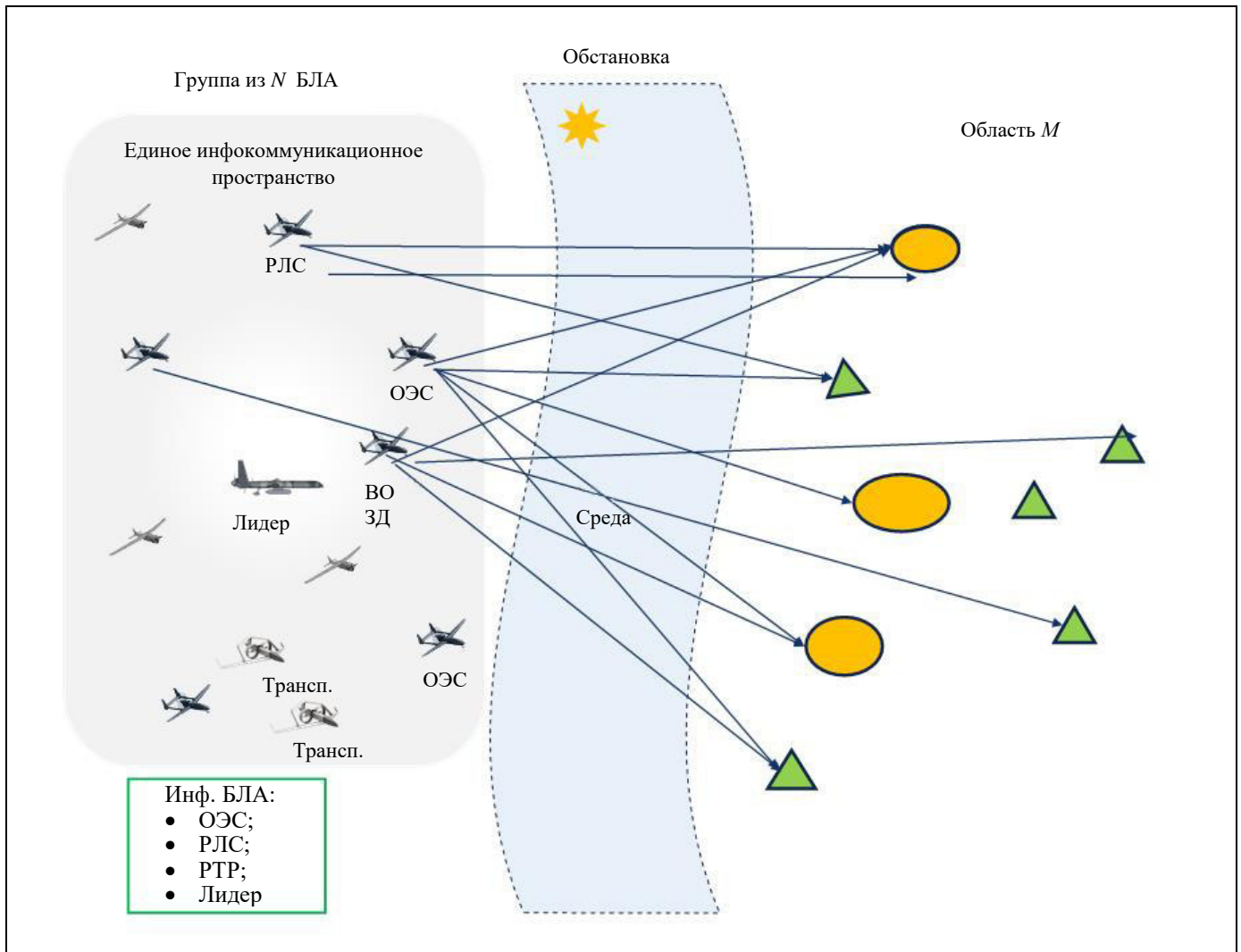


Схема системы взаимодействия группы БЛА с объектами в фазе целераспределения: инф. БЛА – информационные БЛА; лидер – БЛА, на борту которого принимается решение о выборе сценария применения группы

M распределены в пространстве и подвижны, и текущие координаты зависят от времени t . Все БЛА из группы N связаны с каждым объектом из группы M некоторыми соотношениями, обозначенными на рисунке стрелками. Чтобы не перегружать рисунок, обозначены лишь некоторые из них.

Представим для начала некоторую систему отношений – матрицу, описывающую систему геометрических расстояний между элементами i и j .

$$\rho(t) = \begin{pmatrix} \rho_{11}(t) & \cdots & \rho_{1M}(t) \\ \vdots & \rho_{ij}(t) & \vdots \\ \rho_{N1}(t) & \cdots & \rho_{NM}(t) \end{pmatrix}.$$

Эти расстояния в некоторой степени определяют потенциальные возможности элементов i по поиску и обнаружению элементов j , а также по достижимости для воздействия на них соответствующими средствами.

Группа N содержит информационные элементы – однофункциональные БЛА, оснащенные различными информационными средствами – радиолокацией, оптической локацией, средствами пассивного наблюдения, которые могут быть описаны упомянутыми свойствами q_i .

Группа M имеет в своем составе объекты с различными информационными признаками и различной достоверностью обнаружения и идентификации по отношению к информационным средствам со свойствами q_i . Исходя из этого, информационные возможности каждого БЛА по отношению к объектам могут быть представлены системой информационных отношений вида

$$S(t) = \begin{pmatrix} S_{11}(t) & \cdots & S_{1M}(t) \\ \vdots & S_{ij}(t) & \vdots \\ S_{N1}(t) & \cdots & S_{NM}(t) \end{pmatrix}.$$



Элементы S_{ij} , конечно, зависят от многих факторов, включая расстояния, свойства объектов, свойства среды, и др.

Элементы из группы M в различной степени могут быть подвержены действию различных средств исполнительных элементов из группы N . Это зависит и от средств воздействия, размещенных на БЛА, и от свойств объектов по отношению к средствам воздействия. Система отношений воздействия может быть записана в виде

$$B(t) = \begin{pmatrix} B_{11}(t) & \cdots & B_{1M}(t) \\ \vdots & B_{ij}(t) & \vdots \\ B_{N1}(t) & \cdots & B_{NM}(t) \end{pmatrix}.$$

Нужно, конечно, учесть, что эти матрицы (это только матричная запись, элементы их значительно сложнее) содержат нулевые элементы как для БЛА воздействия (для системы информационных отношений S), так и для БЛА средств информационного обеспечения – не оснащенных средством воздействия.

В пространстве между элементами i и j находится среда, определенным образом влияющая на элементы матрицы информационных отношений и отношений воздействия:

$$E(t) = \begin{pmatrix} E_{11}(t) & \cdots & E_{1M}(t) \\ \vdots & E_{ij}(t) & \vdots \\ E_{N1}(t) & \cdots & E_{NM}(t) \end{pmatrix}.$$

Все элементы этих описанных матриц в процессе действий зависят от времени t .

Далее для выполнения процедуры целераспределения необходимо определить критерий оптимизации решения поставленной задачи. На взгляд авторов, таким критерием может быть прогнозируемая эффективность воздействия совокупности элементов i на совокупность элементов j с учетом информационного обеспечения их действий, а соответствующая критериальная функция запишется в виде

$$\mathcal{E}_{\max} = Y(B(\rho, S, E, t)),$$

где \mathcal{E} – это некоторая функция (функционал), определяющая обобщенную результативность действий группы БЛА по совокупности объектов и зависящая от Q – распределения задач между БЛА. Исследования по формированию этой функции не входят в рамки данной статьи и будут рассмотрены отдельно. Очевидно, что в предельном случае необходимо перейти к задаче оптимизации и ее решению в реальном времени на борту БЛА.

Задача целераспределения состоит в отыскании матрицы Q , состоящей из элементов со значениями 0 или 1, определяющими назначение элементу i взаимодействовать с объектом j или нет:

$$Q(t)^* = \begin{pmatrix} \cdots & & \\ \vdots & Q_{ij} & \vdots \\ \cdots & & \end{pmatrix}.$$

Представляется, что при достаточно большой размерности матриц эти процедуры могут быть получены только с помощью методов и технологий ИИ. Анализ методов и технологий ИИ в применении к перечисленным задачам не является целью данной статьи. В статье рассматривается совокупность отдельных задач, главным образом задач принятия решений, составляющих в целом задачу управления интеллектуальной автономной группой объектов.

Выше была описана формальная процедура решения частной задачи целеуказания в задаче управления группой БЛА. Она в достаточной степени подходит для организации действий групп робототехнических устройств, а описанный подход и принцип ее решения весьма универсален и имеет широкое применение [15].

Аналогичным образом могут быть описаны и другие составляющие задачи управления группами БЛА, т. е. крупномасштабными АС БЛА, в том числе:

- организация структуры информационных взаимодействий между элементами группы, исходя из текущей и прогнозируемой конфигурации, формирование и реконфигурация локального информационного поля;
- реконфигурация группы в зависимости от изменения состояния целей, выявления новых объектов и динамики технического состояния элементов группы;
- объединение информации, получаемой от разнесенных в пространстве источников посредством сенсоров с различной структурой сигналов, и оценка на этой основе ситуации;
- формирование иерархии решения информационно-управляющих задач в группе;
- формирование структуры иерархии решения управляющих задач в группе.

Весьма значительная часть этих задач управления относится к задачам принятия решений или к дискретным задачам, требующим привлечения специфических принципов решения. Конечно, наряду с решением перечисленных задач, предстоит решать и задачи, связанные с созданием соб-

ственно специализированных БЛА, предназначенных для работы в группе, для группового, коллективного поведения при решении сложных многокомпонентных авиационных работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье рассмотрен круг задач и путей их решения для создания средств и систем управления разнородными многокомпонентными группами беспилотных летательных аппаратов, предназначенными для проведения сложной деятельности в интересах различных, зачастую слабо определенных целевых действий. Конечно, каждая из задач может быть структурирована на несколько научных задач меньшего масштаба. Рассмотренные задачи потребуют наряду с применением традиционных подходов и использование технологий ИИ. Весьма подробно формализована постановка одной из таких задач – задача взаимного целераспределения в группе. При этом необходимо подчеркнуть, что ранее задачи рассматривались только ограниченно и не содержали обобщенной постановки задачи применения технологий искусственного интеллекта в группе БЛА, см. работы [2, 8, 13, 14].

При кажущейся временной отдаленности проблемы исследования по комплексу перечисленных задач требуют развертывания уже сейчас.

ЛИТЕРАТУРА

1. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/44731> (дата обращения 01.12.2021).
2. Li, C. Artificial Intelligence Technology in UAV Equipment // 2021 IEEE/ACIS 20th International Fall Conference on Computer and Information Science (ICIS Fall). – Xi'an, China, 2021. – P. 299–302. – DOI: 10.1109/ICISFall51598.2021.9627359.
3. Xia, C. and Yudi, A. Multi — UAV path planning based on improved neural network // 2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). – Shenyang, China, 2018. – P. 354–359. – DOI: 10.1109/CCDC.2018.8407158.
4. Varatharasan, V., Rao, A. S. S., Toutounji, E., et al. Target Detection, Tracking and Avoidance System for Low-cost UAVs using AI-Based Approaches // 2019 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED UAS). – Cranfield, UK, 2019. – P. 142–147. – DOI: 10.1109/REDUAS47371.2019.8999683.
5. Hu, A.-P. Camera calibration for UAV ground feature localization // 2011 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). – Budapest, Hungary, 2011. – P. 176–179. – DOI: 10.1109/AIM.2011.6027132.
6. Zheng, L., Ai, P., and Wu, Y. Building Recognition of UAV Remote Sensing Images by Deep Learning // IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – Waikoloa, HI, USA, 2020. – P. 1185–1188. – DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323322.
7. Zhang, Y., McCalmon, J., Peake, A., et al. A Symbolic-AI Approach for UAV Exploration Tasks // 2021 7th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA). – Prague, Czech Republic, 2021. – P. 101–105. – DOI: 10.1109/ICARA51699.2021.9376403.
8. Chen, B. Research on AI Application in the Field of Quadcopter UAVs // 2020 IEEE 2nd International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT). – Weihai, China, 2020. – P. 569–571. – DOI: 10.1109/ICCASIT50869.2020.9368551.
9. Togootogtokh, E., Huang, S., Leong, W.L., et al. An Efficient Artificial Intelligence Framework for UAV Systems // 2019 Twelfth International Conference on Ubi-Media Computing (Ubi-Media). – Bali, Indonesia, 2019. – P. 47–53. – DOI: 10.1109/Ubi-Media.2019.00018.
10. Kim, H., Ben-Othman, J., Mokdad, L., et al. Research Challenges and Security Threats to AI-Driven 5G Virtual Emotion Applications Using Autonomous Vehicles, Drones, and Smart Devices // IEEE Network. – 2020. – Vol. 34, no. 6. – P. 288–294. – DOI: 10.1109/MNET.011.2000245.
11. Жарко Е.Ф., Промыслов В.Г., Исхакова А.Ю. и др. Кибербезопасность беспилотных транспортных средств. Архитектура. Методы проектирования. – М.: Радиотехника, 2021. – 160 с. [Zharko, E.F., Promyslov, V.G., Iskhakova, A.Yu., i dr. Kiber-bezopasnost' bespilotnykh transportnykh sredstv. Arhitek-tura. Metody proektirovaniya. – М.: Radiotekhnika, 2021. – 160 s. (In Russian)]
12. Wang, Y., Su, Z., N. Zhang, N., and Benslimane, A. Learning in the Air: Secure Federated Learning for UAV-Assisted Crowdsensing, in IEEE Transactions on Network Science and Engineering, vol. 8, no. 2, pp. 1055-1069, 1 April-June 2021, doi: 10.1109/TNSE.2020.3014385.,
13. Kusyk, J., Uyar, M.U., Ma, K., et al. AI and Game Theory based Autonomous UAV Swarm for Cybersecurity // 2019 IEEE Military Communications Conference (MILCOM). – Norfolk, VA, USA, 2019. – P. 1–6. – doi: 10.1109/MILCOM47813.2019.9020811.
14. Molina-Pradrón, N., Cabrera-Almeida, F., Araña, V., et al. Monitoring in Near-Real Time for Amateur UAVs Using the AIS // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 33380–33390. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2973503.
15. Кутахов В.П., Пляскота С.И. Информационное взаимодействие в крупномасштабных робототехнических авиационных системах // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD '2017. Материалы Десятой международной конференции: в 2-х томах. Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2017. – С. 93–96. [Kutahov, V.P., Plyaskota, S.I. Informacionnoe vzaimodej-stvie v krupnomasshtabnykh robototekhnieskikh aviacionnykh sistemah // Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh si-stem MLSD '2017. Materialy Desyatoy mezhdunarodnoj kon-ferencii: v 2-h tomah. Pod obshchej redakciej S.N. Vasil'e-va, A.D. Cvir-kuna. – М.: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN, 2017. – S. 93–96. (In Russian)]
16. Шевченко А.В., Мецераков Р.В., Мигачев А.Н. Обзор состояния мирового рынка робототехники для сельского хозяйства. Ч. 1. Беспилотная агротехника // Проблемы управления. – 2019. – № 5. – С. 3–18. [Shevchenko, A.V., Meshcheryakov, R.V., Migachev, R.V. Review of the world market of agriculture robotics. Part 1. Unmanned Vehicles for Agriculture // Control Sciences. – 2019. – No. 5. – P. 3–18. (In Russian)]
17. Шевченко А.В., Мецераков Р.В., Мигачев А.Н. Обзор состояния мирового рынка робототехники для сельского хозяй-



- ства. Ч. 2. Беспилотные летательные аппараты и роботизированные фермы // Проблемы управления. – 2019. – № 6. – С. 3–10. [Shevchenko, A.V., Meshcheryakov, R.V., Migachev, R.V. Review of the world market of agriculture robotics. Part 2. Unmanned aerial vehicles and robotic farms // Control Sciences. – 2019. – No. 6. – P. 3–10. (In Russian)]
18. Wang, X., Wang, X., Zhao, J., et al. Monitoring the thermal discharge of hongyanhe nuclear power plant with aerial remote sensing technology using a UAV platform // 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – Fort Worth, TX, USA, 2017. – P. 2958–2961. – DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8127619.
19. Zhang, S., Wu, X., Zhang, G., et al. Analysis of intelligent inspection program for UAV grid based on AI // 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). – Xi'an, China, 2020. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/ICHVE49031.2020.9279634.
20. Moranduzzo, T., Melgani F. Monitoring structural damages in big industrial plants with UAV images // 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. – Quebec City, QC, Canada, 2014. – DOI: 10.1109/IGARSS.2014.6947606.
21. Ким М.Л., Костеренко В.Н., Певзнер Л.Д. и др. Система автоматического управления траекторным движением шахтного беспилотного летательного аппарата // Горная промышленность. – 2019. – № 3 (145). – С. 60–64. [Kim, M.L., Kosterenko, V.N., Pevzner, L.D., et al. Automatic Trajectory Motion Control System for Mine Unmanned Aircrafts // Mining Industry Journal. – 2019. – Vol. 3 (145). – P. 60–64. (In Russian)]
22. Евтодьева М.Г., Целицкий С.В. Беспилотные летательные аппараты военного назначения: тенденции в сфере разработок и производства // Пути к миру и безопасности. – 2019. – № 2 (57). – С. 104–111. [Evtod'eva, M.G., Celickij, S.V. Bespilotnye letatel'nye apparaty voennogo naznacheniya: tendencii v sfere razrabotok i proizvodstva // Puti k miru i bezopasnosti. – 2019. – № 2 (57). – S. 104–111. (In Russian)]
23. Кутахов В.П., Мещеряков Р.В. Принципы формирования модели оптимизации системы роботизированных авиационных средств // Сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2019. – С. 1211–1214. [Kutahov, V.P., Meshcheryakov, R.V. Principy formirovaniya modeli optimizacii sistemy robotizirovannyh aviacionnyh sredstv // Sbornik trudov XIII Vserossijskogo soveshcha-niya po problemam upravleniya VSPU-2019. – M.: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN, 2019. – S. 1211–1214.
24. Kussyk, J., Uyar, M.U., Ma, K., et al. AI Based Flight Control for Autonomous UAV Swarms // 2018 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI). – Las Vegas, NV, USA, 2018. – P. 1155–1160. – DOI: 10.1109/CSCI46756.2018.00223.

Статья представлена к публикации членом редколлегии П.Ю. Чеботаревым.

*Поступила в редакцию 20.01.2021,
после доработки 07.01.2022.
Принята к публикации 17.01.2022.*

Кутахов Владимир Павлович – д-р техн. наук, Национальный исследовательский центр «Институт имени Н.Е. Жуковского», г. Москва, ✉ kutahovvp@nrczh.ru,

Мещеряков Роман Валерьевич – д-р техн. наук, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ mrv@ieee.org.

GROUP CONTROL OF UNMANNED AERIAL VEHICLES: A GENERALIZED PROBLEM STATEMENT OF APPLYING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES

V.P. Kutakhov¹ and R.V. Mescheryakov²

¹National Research Center "Zhukovsky Institute," Moscow, Russia

²Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉ kutahovvp@nrczh.ru, ✉ mrv@ieee.org

Abstract. This paper considers elements of a group of unmanned aerial vehicles (UAVs) to form various tasks of the group and within a group of aerial systems. Different phases to execute control actions for a group of aerial systems of UAVs are proposed. These phases are shown by an example of selecting different targets for group elements (UAVs). The phases are elements of the large-scale behavior of the group and in the group of UAVs and can be included in the cycle when using artificial intelligence technologies. The approach is formalized for single-function UAVs (choosing a set of end actions) and multifunction UAVs (performing one or more impact functions within the group). A group control problem for applying artificial intelligence technologies is stated. The main elements of the system of relations and conditions for effectively performing tasks by a group of UAVs and executing actions within the group as a large-scale system are formulated. This system reflects the problem statement for applying artificial intelligence technologies. As noted, using homogeneous and heterogeneous groups of UAVs is a promising approach to interpret the formal behavior of robotic systems.

Keywords: UAV, robotics, unmanned aerial systems, artificial intelligence.



XXIX МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ»

В декабре 2021 г. в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН состоялась XXIX Международная научная конференция «Проблемы управления безопасностью сложных систем». Организаторы конференции – Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Научный совет РАН по теории управляемых процессов и автоматизации, Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий.

В работе конференции приняли участие 123 автора, представляющих 49 организаций из России и ряда зарубежных стран. Программа конференции включала в себя 84 доклада в рамках восьми секций.

1. Общетеоретические и методологические вопросы обеспечения безопасности.
2. Проблемы обеспечения экономической и социально-политической безопасности.
3. Проблемы обеспечения информационной безопасности.
4. Кибербезопасность. Особенности обеспечения безопасности в социальных сетях.
5. Экологическая и техногенная безопасность.
6. Методы моделирования и принятия решений при управлении безопасностью сложных систем.
7. Автоматизированные системы и средства обеспечения безопасности сложных систем.
8. Правовые вопросы обеспечения безопасности сложных систем.

Прошедший 2021 год (а конференция традиционно проходит во второй половине декабря) выдался крайне напряженным и богатым вызывающими тревогу событиями. Среди последних отметим прежде всего возрастание сложности противодействия охватившей весь мир пандемии корона-

вируса, обусловленное появлением новых мутаций COVID–19. При этом, несмотря на необходимость консолидации усилий мирового сообщества в борьбе за выживание человечества в условиях пандемии, по-прежнему обострялась международная обстановка и углублялся кризис в отношениях России и западных стран, принявший форму напряженного военно-политического и экономического противостояния, а также открытой информационной войны.

Развитие пандемии коронавируса COVID–19 и вызванный им глобальный финансовый кризис затронули систему внешнеэкономических связей и мировой торговли, а также внутренние товарно-финансовые рынки даже относительно благополучных стран. Данные негативные процессы привели к масштабному банкротству предприятий малого бизнеса, сокращению рабочих мест, проблемам с занятостью населения, а также необходимости перевода сотрудников многих организаций на удаленный режим работы, что, в свою очередь, вызвало существенный рост киберпреступлений с использованием удаленных атак, фишинга, технологий социальной инженерии и т. д. Одновременно с этим возник целый ряд новых видов киберпреступлений, в том числе различным образом эксплуатирующих темы COVID–19.

Запомнится 2021 год и природно-климатическими аномалиями, по поводу причин возникновения которых в научном сообществе до сих пор нет единого мнения (аномальная жара в России, США, Канаде ряде стран Европы; широкомасштабные лесные пожары в Якутии, Турции, Греции, США; наводнения в Крыму, Краснодарском крае и на Дальнем Востоке, а также в Китае, Индии, Австрии, Чехии, Германии и др. странах; тайфуны и ливни на Дальнем Востоке; беспрецедентное по разрушительной силе торнадо в США; морозы в Африке и Южной Америке и т. д.). Не обошлось и без техногенных аварий и катастроф на объектах промышленности и транспорта.

Сложившаяся ситуация и явно прослеживаемые негативные тенденции ее возможного (а по некоторым направлениям – весьма вероятного) развития требуют разработки комплексных мер и механизмов системного характера по повышению эффективности противодействия различным внешним и внутренним угрозам безопасности личности, общества и государства. Это приводит к возрастанию актуальности и значения комплексных междисциплинарных фундаментальных и прикладных научных исследований, направленных на разработку методов, средств и механизмов повышения эффективности управления безопасностью (в самом широком понимании данного термина), что не могло не отразиться на тематике представленных на конференции докладов.

По уже сложившейся и многолетней традиции конференцию открыл развернутый доклад *Г.Г. Малинецкого, В.В. Кульбы, Т.С. Ахромеевой, С.А. Торопыгиной, С.А. Посашкова* «Как не оказаться в XVI веке», посвященный анализу влияния происходящих глобальных изменений и обостряющихся противоречий в мировом развитии, а также сопутствующих рисков и угроз. В докладе рассматривается ряд ключевых стратегических задач развития российского общества и государства на длительную перспективу. Большое внимание уделено проблемам развития культуры, науки, высоких технологий, усугубляемых пандемией демографических проблем, а также поиску путей решения иных приоритетных задач поступательного экономического развития страны. На основе результатов проведенного анализа рисков и носящих глобальный характер угроз, возникающих перед российским государством и обществом, авторы сосредотачивают внимание на поиске путей выхода из сложившейся сложной ситуации и достижения базовых национальных целей развития Российской Федерации как на ближайшую, так и на отдаленную перспективу.

Уже второй год внимание авторов представленных на конференции работ привлекают проблемы повышения эффективности управления противодействием пандемии коронавируса. Доклад *А.В. Соколова, Г.В. Ройзензона, Н.П. Комендантовой* «Технология создания систем мониторинга и прогноза состояния опасных явлений и объектов (на примере эпидемии COVID-19)» посвящен разработке методологии оценки эффективности ограничительных мер как инструмента борьбы с распространением коронавируса. В докладе выделяются три базовых группы критериев эффективности рассматриваемых мер, позволяющих оцени-

вать: имеющиеся ресурсы различного типа (количественный фонд, обеспеченность медперсоналом, оборудованием, медикаментами и т.д.); интенсивность расходования и пополнения необходимых для борьбы с пандемией ресурсов; степень достижения поставленных целей. Для оценки эффективности ограничительных мер авторы предлагают применять методы многокритериальной порядковой классификации и вербального анализа принимаемых решений. Значительное место в докладе занимает обобщение накопленного авторским коллективом опыта решения задач мониторинга и прогнозирования новых случаев заражения коронавирусом в Москве в 2020–2021 гг.

Проблемам противодействия пандемии посвящены также работы *М.Е. Степанцова* «Об одной особенности моделирования первого этапа распространения инфекции COVID-19»; *Н.Г. Кереселидзе* «Новые модели распространения вируса SARS-CoV-2 и проблемы управления безопасностью»; *Т.Х. Усмановой, Н.Н. Володиной* «Влияние ограничений из-за коронавируса COVID-19 на безопасность экономических систем».

Отличительной особенностью конференции является большое число разнообразных по тематике работ, посвященных изложению результатов исследования широкого круга методологических и прикладных проблем повышения эффективности процессов управления обеспечением безопасности в условиях цифровизации, бурного развития информационных и коммуникационных технологий, а также сопутствующих данным процессам угроз и рисков.

Проблемам повышения эффективности организационного управления в условиях риска посвящен доклад, подготовленный авторским коллективом во главе с чл.-корр. РАН *В.Л. Шульцем* «Анализ фактора неопределенности в процессе подготовки управленческих решений». Неопределенность при подготовке решений, как утверждается в докладе, фактически проистекает из двух основных источников: субъективного (эпистемологического), представляющего собой результат недостатка необходимых для принятия решений знаний, и объективного (алеаторного, онтологического), являющегося следствием стохастической природы объекта управления или внешней среды. Отдельный класс составляет лингвистическая (субъектная) неопределенность, обусловленная рядом объективных свойств естественного языка. В настоящее время, как отмечается в докладе, вследствие многогранности факторов неопределенности, методология ее оценки развивается в основном в направ-



лении разработки методов решения прикладных задач, ограниченных рамками исследуемых сегментов предметных областей. В то же время попытки разработки универсальных методов оценки влияния неопределенности на эффективность управленческих решений сталкиваются со значительными трудностями, преодоление которых во многом возможно с применением методологии сценарного анализа.

В докладе *А.А. Тимошенко* «Криптовалюты как угроза национальной безопасности России: юридические механизмы противодействия» рассматривается комплекс проблем, обусловленных законодательной неурегулированностью многих аспектов оборота криптовалют в Российской Федерации. Констатируя уже свершившийся факт мирового признания криптовалют как инструмента формирования альтернативных финансовых отношений, автор работы особое внимание уделяет анализу угроз национальной безопасности России, особенно в ситуации, когда виртуальные валюты используются в противозаконных целях. Результаты проведенного анализа угроз неконтролируемого оборота криптовалют с точки зрения целей, задач и функций правоохранительных органов позволили сформулировать ряд конкретных предложений по совершенствованию российской системы законодательного регулирования, включающих внесение соответствующих изменений в действующее законодательство, а также наделение Правительства РФ и профильных ведомств расширенными полномочиями по регулированию и контролю обращения цифровых финансовых активов. Полностью соглашаясь с выводами автора работы, можно лишь подчеркнуть, что актуальность рассмотренных в докладе проблем возрастает еще и в связи с тем, что массовое использование криптовалюты в национальном платежном обороте в условиях большого числа неконтролируемых государством эмитентов в конечном итоге может привести к критическому разрегулированию финансовой системы страны и, что особенно важно, к невозможности эффективного планирования и реализации государством единой денежно-кредитной политики со всеми вытекающими отсюда негативными социально-экономическими последствиями.

Традиционно большой интерес участники конференции проявляют проблемам управления информационной и кибербезопасностью. В докладе *Р.В. Мецеракова* «Подход к защищенному интеллектуальному управлению роботами и их коалициями с использованием интерфейса человек-робот(ы) и робот-робот(ы)» рассматриваются про-

блемы формирования защищенных механизмов межмашинного обмена данными, актуальность которой в настоящее время возрастает в связи с развитием интернета вещей и с тем, что стандарты безопасности систем управления робототехническими комплексами с использованием человеко-машинных интерфейсов практически отсутствуют. Проведенные автором исследования показали, что разрабатываемые модели и механизмы безопасности систем рассматриваемого типа должны основываться на использовании различных интерфейсов для резервирования каналов связи при подаче команд и получения обратной связи от объектов управления, а также учитывать такие факторы, как помехоустойчивость измерительных каналов, отказоустойчивость системы в целом, воспроизводимость эталонного сигнала, а также наличие единого формата передачи измерительной информации.

Упомянутой выше и крайне широкой тематике посвящены работы *А.М. Смирнова*, *А.Ю. Исхакова* «Алгоритм двухфакторной аутентификации как инструмент снижения FRR для проактивного фильтра выявления атак»; *В.К. Абросимова*, *А.Н. Райкова* «Ситуационная осведомленность для безопасной и эффективной работы агроботов»; *Е.Ф. Жарко* «Некоторые вопросы процесса верификации и валидации управления кибербезопасностью»; *Д.И. Правикова* «Концепция информационной безопасности «роя» киберфизических систем»; *К.А. Бугайского* «Определение успешности действий нарушителя в однородной среде»; *Р.Э. Асратяна* «Использование технологии SSL/TLS для создания защищенных сетевых каналов в распределенных системах»; *А.А. Саломатина* «Методы противодействия отслеживанию браузерных отпечатков пользователей»; *В.Л. Орлова*, *Е.А. Курако* «Сервис-браузер и атаки типа Man in the middle»; *С.К. Сомова* «Проблема оптимизации схемы восстановления разрушенного оперативного резерва данных в распределенных системах»; *А.Д. Козлова*, *Н.Л. Ноги* «Достоверность информации как элемент обеспечения информационной безопасности и оценка ее уровня»; *В.О. Сиротюка* «Цели, задачи и принципы обеспечения безопасности цифровых систем управления интеллектуальной собственностью»; *А.А. Мелихова* «Обеспечение непрерывной разработки программных продуктов, сертифицируемых по требованиям безопасности».

Ряд интересных докладов посвящен актуальным проблемам обеспечения безопасности в социальных сетях. Это работы *Л.В. Жуковской* «Особенности применяемого математического инструментария для построения систем обеспечения без-

опасности в социальных сетях»; *З.К. Авдеевой, С.В. Ковриги* «Систематизация психологических факторов влияния на изменение убеждений и atti-тудов в результате коммуникативных воздействий в виде модели причинно-следственных влияний»; *М.В. Мамченко, А.С. Рея* «Оценка рисков распро-странения деструктивного контента в социальных сетях»; *Г.К. Борескова* «Этические аспекты приме-нения инструментов искусственного интеллекта для обеспечения пространства доверия в электрон-ных СМИ»; *Е.П. Охупкиной* «Разработка динами-ческой системы функционирования сообществ со-циальной сети»; *В.В. Муромцева, А.В. Муромцевой* «Цифровизация – угрозы и риски».

На конференции было представлено большое количество интересных работ, посвященных ком-плексу проблем управления обеспечением эконо-мической, экологической, энергетической и техно-генной безопасности в условиях развития высоких технологий, в последние годы увязываемых с так называемой «зеленой» или «климатической» меж-дународной повесткой, декларируемые и реальные цели которой, отметим, представляют собой от-дельный предмет детального анализа и в настоя-щее время широко обсуждаются научным и экс-пертным сообществами.

В докладе *Г.В. Гореловой, Э.В. Мельника, М.В. Орда-Жигулиной, Д.В. Орда-Жигулиной* «Без-опасность состояния водной экосистемы Азово-Черноморского региона, когнитивное исследова-ние» представлены результаты когнитивного ана-лиза и имитационного моделирования процессов в водной экосистеме региона с целью формирования прогнозов экологических угроз и обеспечения без-опасности населения и береговой инфраструктуры. Приведена функциональная структура разработан-ной авторами системы мониторинга развития опасных явлений в природных системах, предна-значенной для осуществления непрерывных наблюдений за исследуемыми процессами.

Перспективность предложенного авторами подхода к решению рассматриваемых проблем определяется возможностями в рамках единой си-стемы мониторинга интегрировать большое коли-чество получаемых из различных источников раз-нородных и разновременных данных, выявлять (в том числе неочевидные) причинно-следственные связи между изучаемыми традиционными метода-ми параметрами гидроэкосистемы и таким образом определять закономерности экосистемных процес-сов, а также осуществлять интеллектуальную под-держку процессов принятия решений по противо-

действию экологическим угрозам на основе ре-зультатов когнитивного моделирования.

Среди представленных в рамках рассматривае-мой широкой тематики работ отметим доклады *Н.Н. Володиной, Н.И. Комкова, В.В. Сутягина* «Проблемы управления развитием крупномас-штабных социально-экономических систем»; *Р.М. Нижегородцева* «Формализация институтов, неблагоприятный отбор и управление коррупцион-ным поведением агентов»; *Е.П. Грабчака, Е.Л. Логинова* «Подготовка системы государствен-ного управления России к сверхкритическим ситу-ациям природного и техногенного характера»; *Е.А. Абдуловой* «Об одном подходе к управлению рисками критической инфраструктуры»; *Н.Н. Лантер* «Структурная устойчивость Арктики как экономической территориальной экосистемы»; *Т.А. Пискуревой, А.Н. Махова* «Цифровая транс-формация и импортозамещение во взаимосвязи обеспечения безопасности ядерного объекта»; *В.И. Меденникова* «Системный подход к примене-нию искусственного интеллекта для разрешения проблем экологической безопасности при цифро-вой трансформации сельского хозяйства»; *М.А. Полюховича* «Основы информационного обеспечения процесса передачи электроэнергии в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов»; *Р.Е. Торгашева* «Ком-плексный геоэкологический мониторинг лесных геоэкосистем Московского столичного региона».

Традиционно большой интерес участники кон-ференции проявляют к проблемам техногенной и промышленной безопасности. Доклад *В.Г. Промыслова, К.В. Семенкова* «Управление риском кибербезопасности на этапе проектирова-ния для промышленных систем» посвящен изло-жению результатов разработки технологии оценки риска кибербезопасности в процессе проектирова-ния критически важных промышленных объектов (КВО). Предлагаемая технология состоит из двух базовых этапов. Первый этап включает в себя об-щую для проектируемой системы оценку риска в условиях неопределенности в понимании деталей реализации системы и частично – требований, предъявляемых к ней. В рамках данного этапа фак-тически закладываются основные технические ре-шения по обеспечению кибербезопасности. Кроме того, формируемая обобщенная оценка рисков обеспечивает возможность установления приори-тетов дальнейшей детальной их проработки в про-цессе проектирования архитектуры безопасности КВО, например, в части деления на зоны безопас-



ности или классификации активов. Второй (опциональный) этап включает детальную оценку риска с учетом особенностей архитектуры разрабатываемой системы и специфики модели угроз.

Преимуществами предложенной технологии является возможность предотвращения критических ошибок в процессе проектирования системы, связанных с недооценкой или, наоборот, переоценкой требований по обеспечению кибербезопасности, а также сокращения объема (и, соответственно, стоимости и времени) выполнения проектных работ путем исключения процедур детальной оценки риска для отдельных подсистем в случае, если интегральная его оценка для системы в целом не превышает допустимый уровень.

Ряд интересных докладов посвящен проблемам предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера, а также обеспечения безопасности и надежности функционирования технологических комплексов и транспортных систем: *В.О. Чинакал* «Повышение безопасности управления сложными объектами в условиях скрытых изменений параметров технологических процессов»; *Л.А. Баранов, Е.П. Балакина, В.Г. Сидоренко* «Безопасное диспетчерское управление в условиях использования интеллектуальных беспилотных систем управления движением городского внеуличного транспорта»; *В.К. Мусаев* «Математическое моделирование сейсмических волн напряжений в полуплоскости вертикальной полостью из резины: соотношение ширины к высоте один к десяти»; *М.Ю. Прус* «Стохастическое моделирование каскадных сценариев развития аварий и катастроф»; *А.В. Евдокимова* «Анализ пожарной безопасности теплоцентрали на основе изучения пожароопасных ситуаций»; *Е.В. Кловач, В.А. Ткаченко* «Об обосновании использования аудита промышленной безопасности»; *О.Б. Скворцов* «Стандартизация и нормирование вибрационной усталости механизмов и машин».

Отметим также целый ряд представленных на конференции заметных работ, которые, несмотря на большое разнообразие тематики, объединяет актуальность рассматриваемых проблем и востребованность результатов их решения: *В.В. Быстров, А.В. Маслобоев, И.О. Датьев* «Инструменты цифровизации управления кадровой безопасностью регионального производственного кластера»; *А.А. Широкий* «Модели и методы естественных вычислений в управлении рисками сложных систем»; *Е.В. Аникина* «Управление рисками сложной компьютерной сети на основе общей арбит-

ражной схемы»; *Л.Е. Мистров, Е.В. Головченко* «Основы моделирования мероприятий информационной безопасности для обеспечения конфликтной устойчивости функционирования социально-экономических организаций»; *А.Н. Фомичев* «Методика расчета экономического ущерба от распространения наркомании»; *В.В. Кафидов* «Миграционная политика и безопасность города»; *В.В. Леценко* «Обеспечение национальной безопасности в сфере интеллектуальной собственности в России»; *И.А. Сидоренко, О.Н. Дудариков, Н.Е. Ходырева* «Средства информационной поддержки принятия решений по оценке возможностей видовых технических разведок»; *А.М. Анохин* «Анализ прикладных путей повышения метрологической надежности измерительных преобразователей»; *В.И. Сташенко, О.Б. Скворцов, О.А. Троицкий* «Особенности оценки вибрационных воздействий в электромеханических системах с импульсным управлением»; *Д.Р. Гончар* «Балансировка вычислительной нагрузки при параллельной реализации решения минимаксной задачи составления расписания методом ветвей и границ».

Подробно ознакомиться с представленными работами можно в опубликованных материалах¹ либо на официальном сайте конференции: URL: <https://iccss2021.ipu.ru/prcdngs>.

В заключительном слове председательствующий на конференции д-р техн. наук, профессор *В.В. Кульба* сообщил о планах проведения юбилейной XXX конференции по рассматриваемой тематике, которая, по сложившейся традиции, состоится в декабре 2022 г. в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. Телефон оргкомитета (495) 198-17-20, доб. 1407, e-mail: iccss@ipu.ru. Технический секретарь конференции – *Алла Фариссовна Ибрагимова*.

Ученый секретарь Оргкомитета конференции
А.Б. Шелков

Шелков Алексей Борисович – канд. техн. наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ abshelkov@gmail.com.

¹ Проблемы управления безопасностью сложных систем: материалы XXIX Международной конференции, 15 дек. 2021 г., Москва / под общ. ред. А.О. Калашникова, В.В. Кульбы. – М.: ИПУ РАН. – 2021. – 544 с.

29TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPLEX SYSTEMS SECURITY CONTROL

A.B. Shelkov

Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉ abshelkov@gmail.com

Abstract. The conference took place in December 2021. Scientific results presented by the conference participants are briefly outlined below. The conference sections were theoretical and methodological problems of security support, problems of economic and sociopolitical security support, problems of information security support, cybersecurity and features of security in social networks, ecological and technogenic security, modeling and decision-making for complex systems security control, automatic systems and means of complex systems security support, legal aspects of complex systems security support. At the conference, 123 authors from 49 organizations (Russia and some foreign countries) presented 84 papers. For the second year, conference participants dealt with improving the efficiency of counteraction to the COVID-19 pandemic in their papers. A distinctive feature of the conference is numerous papers on various topics, presenting research results on a wide range of methodological and applied problems of improving the effectiveness of security control processes in the context of digitalization, the rapid development of information and communication technologies, and the threats and risks associated with these processes.

Keywords: conference, complex systems, security control.