ОБЩИЕ ЗАСЕДАНИЯ МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИИ

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

1. **В.А. Соловьев, А.А. Коваленко**

Высокоширотная пилотируемая орбитальная станция. Задачи управления полетом

2. **М.Ю. Охтилев, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов**

Методология и технологии проактивного управления функционированием и модернизацией сложных технических объектов

3. **В.В. Косьянчук, Н.И. Сельвесюк**, **М.В. Хлебников**

Пути повышения топливной эффективности магистральных воздушных судов гражданской авиации

4. **Ю.В. Гурьев**

Опыт использования компьютерных технологий в гидродинамическом проектировании морских объектов и прогнозировании гидрофизических аномалий

5. **В.И. Городецкий**

Предсказание группового поведения и намерений соперника

В. А. СОЛОВЬЕВ, А.А. КОВАЛЕНКО
(ПАО “РКК “Энергия”, Королев)

ВЫСОКОШИРОТНАЯ ПИЛОТИРУЕМАЯ ОРБИТАЛЬНАЯ СТАНЦИЯ: ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ

Рассмотрены новые целевые задачи проектируемой Российской высокоширотной пилотируемой орбитальной станции РОС, решение которых делает возможным размещение станции на орбите с большим углом наклонения. Особенности баллистических характеристик полярной орбиты, новые задачи обусловили необходимость осуществление новых полетных операций. Показаны преемственность основных технических решений, методов планирования и управления полетом, структура наземного комплекса управления полетом РОС, обеспечивающих решение как традиционных, так и новых задач.

Введение. Целью создания пилотируемой орбитальной станция является обеспечение решения круга задач в интересах науки и экономики. Технические характеристик бортовых систем станции (в первую очередь, бортового комплекса управления), параметры ее орбиты диктуют требования, организации процесса управления полетом. В настоящее в составе Международной космической станции успешно функционирует Российский сегмент МКС, состоящий из Служебного модуля «Звезда», Функционально-грузового модуля «Заря», Малого исследовательского модуля №2 «Поиск», Малого исследовательского модуля №1 «Рассвет», Многоцелевого лабораторного модуля «Наука» и Узлового модуля «Причал». Все эти разнообразные космические аппараты интегрированы в единый комплекс бортовых систем и функционируют под управлением бортового и наземного комплексов управления полетом. Наземный комплекс управления РС МКС активно взаимодействует с наземными сегментами международных партнеров по созданию и эксплуатации МКС. Это взаимодействие обеспечивает эффективное решение задач управления национальными сегментами партнеров, многочисленными пилотируемыми и грузовыми транспортными космическими кораблями, осуществляющими транспортно-техническое обслуживание МКС. Центры управления полетами непрерывно обмениваются информацией через имеющиеся интерфейсы и функционируют как единая международная система управления полетом МКС, решая задачи по управлению полетом «своими» сегментами, так и предоставляя услуги по резервному управлению полетом сегментами партнеров.

Создание российской высокоширотной орбитальной станции (РОС) обусловлено необходимостью решения ряда задач, ранее не решавшихся на пилотируемых орбитальных станциях, или решавшихся со значительными ограничениями. Эти задачи связан с переходом от изучения космического пространства на низких околоземных орбитах к его освоению и использованию. При этом необходимо сохранить возможность решения и всех задач, решающихся на РС МКС в настоящее время. К новым задачам относятся:

- наблюдение всей территории Российской Федерации, включая высокоширотные (околополярные) районы Земли;
- исследования с участием человека в районах Земли с наименьшей защищенностью от космических излучений, где наиболее явно проявляются все воздействия открытого космического пространства (околополярные районы), что необходимо для более широкого изучения условий, в которых будут протекать будущие пилотируемые межпланетные экспедиции, их влияния на экипажи и бортовые системы, проблемы с которыми могут встретиться люди и техника;
- управление полетом облака малых автоматических КА и свободно летающих модулей орбитальной станции;
- обслуживание, дозаправка, ремонт, запуск АКА с борта орбитальной станции.

Решение большинства перечисленных задач обеспечивается, если создавать РОС на низкой околоземной орбите (НОО) с высоким углом наклонения: 90° ... 97°. Именно на этих орбитах возможно наблюдение всей поверхности нашей планеты, там сосредоточена большая часть

автоматических КА. Радиационная обстановка похожа на обстановку в межпланетном пространстве.

Создание РОС начнется с запуска Научно-энергетического модуля (НЭМ), который будет выведен на орбиту. В дальнейшем в состав орбитальной станции последовательно будут вводиться универсальный узловой модуль, обеспечивающий интеграцию модулей в единую станцию, шлюзовой модуль для обеспечения выходов космонавтов в открытый Космос, базовый модуль, целевые модули, платформа обслуживания АКА.

Новая орбитальная станция, создаваемая на высокоширотной НОО, имеет ряд особенностей, которые надо учесть при создании системы управления полетом.

Процесс управления полетом традиционно состоит из следующих этапов: планирование полета и полетных операций, реализация полетных операций, контроль полета (оценка состояния КА и выполнения запланированных полетных операций). На каждом из этих этапов решаются задачи с использованием различных компонентов системы управления космическим полетом, которая является сложной – многоконтурной автоматизированной человеко-машинная системой управления реального времени. Под системой реального времени понимаются “системы, которые предсказуемо (в смысле времени реакции) реагируют на непредсказуемые (по времени появления) внешние события” [1]. Говоря о многоконтурной системе, подразумеваем следующие контуры управления:

1 контур – управление всеми бортовыми комплексами космического аппарата средствами бортового комплекса управления (БКУ);

2 контур – экипаж пилотируемого КА управляет бортовыми системами напрямую и посредством БКУ;

3 контур – наземный комплекс управления осуществляет управление полетом КА в целом посредством БКУ и экипажа КА.

Основные элементы будущей системы управления РОС будут создаваться на базе существующих, и хорошо себя зарекомендовавших решениях. К ним относятся принятая иерархия уровней планирования, временные интервалы уровней планирования, методы планирования.

Реализация полетных операций строится на базе систем автоматизированного разработки формализованных полетных процедур, методов детального планирования полетных операций на основе формализованных описаний полетных операций – формализованных полетных процедур и методов разработки массивов командно-программной информации на основе цифрового ДПП и формализованных полетных процедур.

Размещение станции на орбите с большим углом наклонения создает ряд особенностей станции как объекта управления:

- наличие зон радиовидимости наземных КИП на всех витках (нет зон глухих витков);
- короткие зоны радиовидимости наземных КИП (≈10…15 мин на витке);
- ограниченные возможности связи между НКУ и РОС через МКСР «Луч» в приполярных зонах (широты выше 85°).

Указанные ограничения могут быть полностью или частично сняты использованием методов отложенного командно-программного управления (программно-временное управление). Эти методы нашли широкое применение в процессе управления полетом РС МКС. Программное-временное управление заключается в формировании бортовых программ полета, которые закладываются в БКУ по КРЛ в зоне радиовидимости НКУ или МКСР. Все управляющие воздействия формируются БКУ как заданная функция времени в соответствии с детальным планом полета (выдача команд по временным условиям). Период исполнения такой БПП определяются емкостью памяти БВС и задачами целевого использования КА, т.е., длительностью интервала детального планирования и реализации.

Расширенный метод программно-временного метода управления: команды выдаются не только по временным, но и по логическим условиям. Управляющие команды формируются как функция не только времени t, но и измеряемых и прогнозируемых параметров текущего состояния КА, значений исходных данных, необходимых для выполнения целевых функций КА. Такой метод обеспечивает высокую автономность, оперативность и точность

управления[2]. Таким образом, существующие методы полностью обеспечивают управление полетом РОС на высокоширотной НОО.

Новые целевые и служебные задачи РОС окажут влияние и на программу полета, которая будет иметь следующие особенности:

- полный объем служебных операций, включая операции дооснащения, ремонтно-восстановительные работы на участках пилотируемого полета;
- сокращенный объем полетных операций на беспилотных участках программы полета;
- невозможность проведения оперативных ремонтно-восстановительных работ на беспилотных участках программы полета;
- необходимость регулярного периодического выполнения консервации и расконсервации станции;
- стыковки с беспилотной станцией (пилотируемых и грузовых транспортных кораблей);
- управлением полетом при выполнении совместных операция с транспортными кораблями трех типов (ТПК «Союз», ТГК «Прогресс», ТПК «Орел»);
- длительный период одновременного полета двух орбитальных станций - МКС и РОС.

Дополнительно возникают принципиально новые виды полетных операций:

- инспекция автоматических КА,
- техническое обслуживание автоматических КА,
- запуск автоматических КА,
- стыковки/расстыковки автоматических КА;
- управление полетом облака малых автоматических КА

Одновременное управление полетом двух орбитальных станций практически отработано в периоды одновременного полета станций «Салют-7» и «Мир», «Мир» и РС МКС. Возможные конфликты задействования ресурсов средств НКУ разрешаются на уровне детального планирования и оперативного планирования сеансов связи, разделения потоков информации между наземным контуром управления и МКСР.

Наземный комплекс управления высокоширотной орбитальной станции будет создаваться на базе НКУ РС МКС. Дополнительно требуется задействование НИП в северной части России для обеспечения обмена информацией между ЦУП и РОС в приполярной области. При этом основной инструмент управления полетом РОС – это существующая многоцелевая космическая система ретрансляции (МКСР) «Луч» на базе группировки спутников-ретрансляторов типа «Луч-5» на ГСО.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Микрин Е.А.** Бортовые комплексы управления космическими аппаратами и проектирование их программного обеспечения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003.
2. Программно-математическое обеспечение АСУ космическими аппаратами. Под редакцией Д.А. Ловцова. Москва. 1995 г.
3. Энциклопедия “Машиностроение”. М.: “Машиностроение”. Том IV-22 под редакцией **В.П. Легостаева.**

V.A.Solovie, A.A.Kovalenko *(normal type, font size 11),* (S.P. Korolev RSC Energia, Korolev). **High-latitude manned orbital stations. Mission control tasks.**

The new target tasks of the projected Russian high-latitude manned orbital station ROS are considered, the solution of which makes it possible to place the station in orbit with a large inclination angle. The peculiarities of the ballistic characteristics of the polar orbit, new tasks necessitated the implementation of new flight operations. The continuity of the main technical solutions, methods of planning and flight control, the structure of the ground-based flight control complex ROS, providing solutions to both traditional and new tasks, are shown.

М. Ю. ОХТИЛЕВ, Б. В. СОКОЛОВ, Р. М. ЮСУПОВ
(Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской Академии наук, Санкт-Петербург)

МЕТОДОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ И МОДЕРНИЗАЦИЕЙ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Главная особенность задач проактивного управления функционированием и модернизацией сложных технических объектов (СТО) состоит в том, что их решение предполагает комплексное исследование соответствующей задачи структурно-функционального синтеза нового облика модернизируемой СТО; задачи определение срока, к которому необходимо завершить модернизацию; задачи синтеза технологий и плана функционирования и модернизации СТО; задачи синтеза и эффективной реализации управляющих воздействий, обеспечивающих оптимальное выполнение сформированной технологии и плана. В докладе предложены методы и технологии решения перечисленных задач.

Введение. Центральной проблемой при управлении функционированием и модернизацией крупномасштабного СТО (в том числе и интегрированной АСУ подвижными объектами (ПдО), которая в докладе рассматривается в качестве примера) является проблема многокритериального выбора (синтеза) его структур, под которыми понимаются элементы, а также соответствующие множества взаимосвязей (отношений) между элементами. Как правило, при рассмотрении СТО выделяют несколько видов структур: топологическая, техническая, функциональная (технологическая), структура программно-математического и информационного обеспечения, обеспечивающего эффективное и устойчивое функционирование СТО, а также целый ряд других структур [1].

Проведенный анализ показал, что для решения рассматриваемой проблемы многокритериального синтеза необходимо заранее решить множество взаимосвязанных научно-технических задач, в состав которого должны войти: задача структурно-функционального синтеза нового облика модернизируемой СТО; задача определение срока, к которому необходимо завершить модернизацию; задача синтеза технологий проведения модернизации СТО; задача синтеза комплексного плана функционирования и модернизации СТО; задача синтеза и эффективной реализации управляющих воздействий, обеспечивающих оптимальное выполнение плана проведения функционирования и модернизации СТО в конкретных условиях обстановки.

Анализ результатов, полученных зарубежными и отечественными учеными, при решении перечисленных выше задач показал, что они содержат теоретические и практические разработки, нацеленные на изолированное решение задач синтеза технологий и планов функционирования и модернизации отдельных элементов и подсистем СТО, а также их фрагментарное согласование. Указанный уровень исследований и полученные результаты традиционно объясняются большой размерностью рассматриваемых задач, наличием структурной динамики СТО, а также сложностью учета факторов многокритериальности при оценивании эффективности СТО и неопределенности воздействия внешней среды. В этих условиях особую актуальность и значимость приобретает постановка и решение новой научно-технической проблемы разработки методологических и методических основ совместного решения задач многокритериального синтеза технологий и программ (планов) проактивного управления функционированием и модернизацией СТО для различных сценариев изменения внешней обстановки.

В докладе предлагается новая системно-кибернетическая методология, а также комплекс логико-динамических моделей, методов, алгоритмов и методик совместного решения задач проактивного управления функционированием и модернизацией СТО, базирующихся на фундаментальных и прикладных результатах, полученных к настоящему моменту времени в междисциплинарной отрасли системных знаний и, прежде всего, в таких ее направлениях как системология, неокибернетика и информатика, а также позволяющих в отличие от ранее предложенных частных подходов обеспечить доказательное обоснование полноты, замкнутости и непротиворечивости результатов, которые планируется получить в ходе выполнения исследований.

Основные результаты исследований. В докладе в качестве основой методологии для решения рассматриваемых задач была выбрана ***системно-кибернетическая методология***, базирующаяся на трех фундаментальных концепциях – ***концепции комплексного моделирования, проактивного управления и интеллектуализации управления.*** Для конструктивной реализации на практике новой концепции управления ЖЦ СТО, а именно концепции проактивного управления данными ЖЦ необходимо создание соответствующих методологических, методических и технологических основ, в ходе формирования которых авторы доклада разработали две новые прикладные теории: теорию проактивного управления ЖЦ СТО и соответствующими АСУ, а также теория многокритериального оценивания и выбора наиболее предпочтительных моделей и полимодельных комплексов (ПМК), описывающих процессы функционирования СТО и соответствующих АСУ на различных этапах их ЖЦ. При этом были получены следующие новые научные результаты:

- новый системно-кибернетический поход к описанию задач проактивного управления жизненным циклом СТО, основанный на многокритериальном выборе, анализе, оценивании и использовании нового класса логико-динамических моделей и полимодельных комплексов;
- методология проектирования, разработки, внедрения и эксплуатации информационно-аналитических систем (ИАС), позволяющую перейти от традиционно принимаемых эвристических управленческих решений к проактивному управлению СТО;
- методы и технологии повсеместного использования киберфизических систем и интеллектуальных интерфейсов, обеспечивающие проактивное управление СТО не только на информационном, технологическом, но и на организационном уровнях, реализованные в виде нового модельно-алгоритмического обеспечения ИАП для решения различных классов задач моделирования, мониторинга, прогнозирования и проактивного управления СТО (в том числе, на этапах его модернизации и функционирования).

Практическая составляющая выполненных исследований базировалась, во-первых, на широком использовании при проактивном управлении функционированием и модернизацией СТО киберфизических систем, обеспечивающих, соответствующие процессы управления с обратной связью постоянно актуализируемой и обрабатываемой информацией, и, во-вторых, на интеллектуальных интерфейсах с элементами визуального программирования, позволяющих различным категориям пользователей на профессиональном языке осуществлять адаптивное взаимодействие с платформой в ходе проактивного управления на всех этапах ЖЦ СТО. При этом интеллектуальные интерфейсы обеспечивают тиражируемость извлекаемых у экспертов знаний о состоянии СТО для последующего внедрения их в аналогичные смежные системы на основе использования новых логико-алгебраических и логико-лингвистических моделей, созданных для описания рассматриваемых изделий и базирующихся на постулатах теории искусственного интеллекта, инженерии знаний, теории управления. В целом разработанные модели, методы и алгоритмы проактивного управления ЖЦ СТО позволяют, в отличие от традиционно реализуемого на практике реактивного управления, заранее предотвращать предпосылки (а не последствия) возникновения нештатных (критических) ситуаций за счет целенаправленно сформированной структурно-функциональной избыточности. Разработанная методология и технологии управления ЖЦ СТО, принципиально отличаются от разрабатываемых за рубежом технологий CL2M (Closed Loop Lifecycle Management – управление ЖЦ с обратной связью) тем, что они базируются на концепции проактивного (упреждающего) управления.

Заключение. Разработанные методология и технологии проактивного управления функционированием и модернизацией СТО получили широкую практическую реализацию в различных предметных областях. Так, например, при эксплуатации систем проактивного управления наземными техническими объектами на космодромах и в центрах управления полетом достигнуто: повышение до 80 % общего количества аналитически обосновываемых и принимаемых управленческих решений за счет систематизации исходных данных и знаний при наличии в них некорректных сведений и применения многокритериального анализа и выбора большего числа альтернатив по сравнению с эвристическими подходами; сокращение на 50 % времени планирования и принятия управленческих решений на основе их полимодельного описания и за счет комплексной обработки и анализа в реальном масштабе времени информации о техническом

состоянии ракет-носителей, разгонных блоков, космических аппаратов. В другой предметной области, связанной с эксплуатацией единых систем управления защитой ядерных реакторов на атомных электростанциях России, за счет использования разработанного специального программно-математического обеспечения удалось обеспечить сокращение на 50 % времени на принятие решений при проактивном управлении безопасностью за счет многовариантного прогнозирования и диагностирования неисправностей системы управления ядерным реактором и контекстной выдачи советов оператору в аварийных ситуациях, а также сократить в 10–15 раз длительности цикла разработки и внедрения новых версий информационных систем управления за счет интеграции и согласованности информационных потоков и ресурсов, а также использования уникальных человеко-машинных интеллектуальных интерфейсов и средств визуального проектирования [2–3].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00767

ЛИТЕРАТУРА

1. **Цвиркун А.Д., Акинфиев В.К., Филиппов В.А.** Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем: Оптимизационно-имитационный подход. М.: Наука, 1985. 172 с.
2. **Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов М.: Наука, 2006. 410 с.
3. **Потрясаев С.А.** Синтез технологий и комплексных планов управления информационными процессами в промышленном интернете: дис. ... докт. техн. наук: 05.13.11, 05.13.01 / Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, 2021. 312 с.

M.Yu.Okhtilev, B.V.Sokolov, R.M.Yusupov (St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg). **Methodology and technologies of proactive control of the functioning and modernization of complex technical objects**

The main feature of the tasks of proactive management of the functioning and modernization of complex technical objects (CTO) is that their solution involves a comprehensive study of the corresponding task of structural and functional synthesis of the new appearance of the modernized CTO; the task of determining the deadline by which it is necessary to complete the modernization; the task of synthesis of technologies and the plan of functioning and modernization of CTO; the task of synthesis and effective implementation of control actions that ensure optimal implementation of the formed technology and plan. The report suggests methods and technologies for solving these problems.

В. В. КОСЬЯНЧУК, Н. И. СЕЛЬВЕСЮК
(Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, Москва)

М. В. ХЛЕБНИКОВ
(Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва)

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОПЛИВНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

Рассматривается задача оптимизации высотно-скоростного профиля магистрального воздушного судна гражданской авиации при фиксированном времени прибытия. Разработан легкореализуемый алгоритм взаимосвязанной оптимизации этапов набора высоты и крейсерского полета воздушного судна, способный обеспечить экономию расхода топлива до 1,5 % на этапе набора высоты и – при использовании прогнозных значений температуры реальной атмосферы на маршруте – до 3 % на этапе крейсерского полета.

Полученные результаты могут использоваться для модернизации существующих и разработки новых систем самолетовождения для всех типов магистральных воздушных судов.

Введение. Задача оптимизации маневрирования воздушных судов была и остается крайне актуальной, требуя новых подходов и решений с развитием авиации и возможностей вычислительных систем [1, 2]. Проблема снижения расхода топлива обусловлена не только экономическими критериями, но и необходимостью сокращения выбросов CO_2. С ростом вычислительной мощности бортовых систем для решения этой задачи могут применяться современные математические методы.

В докладе рассматривается задача оптимизации высотно-скоростного профиля полёта с учётом прогнозных значений температуры воздуха и скорости ветра на разных высотах, обеспечивающего снижение расхода топлива в рамках совершающегося полета. Особенность рассматриваемой задачи – это исходное требование фиксированного времени прибытия, определяемого расписанием. Таким образом, задача состоит в минимизации расхода топлива при полете на заданное расстояние за заданное время. При этом предполагается, что оптимизация профиля скорости и высоты периодически обновляется в процессе полета с учетом фактического местоположения воздушного судна и параметров полета, поэтому весьма важен вопрос разработки процедуры оптимизации с невысокой вычислительной сложностью для получения результата расчетов за несколько минут с учетом ограниченных вычислительных ресурсов на борту воздушного судна.

В рамках проведенного исследования сформулированы задачи оптимизации для этапов набора высоты и крейсерского полёта, разработан поисковый метод оптимизации с учётом ограничений, а также предложена эффективная процедура моделирования расхода топлива как целевой функции оптимизации.

Существующие подходы к проблеме. В [3] рассмотрен выбор оптимальной скорости при полете на постоянной высоте как решение задачи оптимального управления (вариационной задачи). Получено аналитическое решение, при этом использована упрощенная модель расхода топлива, а также не учитываются ветровые условия. Изменение скорости для такого режима непрерывное. Альтернативным подходом является разбиение траектории полета на интервалы и оптимизация скоростного профиля на этих интервалах (на постоянной высоте). В [4] сделана попытка найти точное решение задачи об оптимальной скорости на каждом из участков с учетом продольного ветрового воздействия. Для решения необходимо использовать явный вид функции расхода топлива, зависящей от скорости и массы, и ее особенность в виде выпуклости. Оптимальный профиль скоростей является решением системы уравнений и находится с помощью метода Ньютона. Существенной особенностью этого подхода является то, что задача с фиксированным временем полета заменяется задачей оптимизации по критерию «прямой цены полет» (direct operation cost), учитывающей как расход топлива, так и задержку по времени прибытия в конечную точку.

В [5] выполнена оптимизация профиля скорости и высоты по критерию «прямой цены полета» для случая, когда скорости и высоты являются дискретными, тем самым задача сводится к задаче смешанного целочисленно-нелинейного программирования, которая решалась стандартными методами среды Matlab. При этом число сегментов траектории выбиралось малым (до трех), что позволяло осуществлять прямой перебор вариантов.

Все три подхода являются многообещающими с точки зрения дальнейшей работы над оптимизацией полного профиля полета, но для их реализации требуется уточнение аналитической модели полета, которая должна учитывать как адекватную модель расхода топлива, так и динамику изменения скорости и высоты полета.

Вопрос модели полета, с одной стороны, позволяющей с достаточной точностью оценить расход топлива, а с другой стороны, достаточно простой, чтобы на ее основе можно было строить расчет целевой функции процедуры оптимизации, остается актуальным [6]. В [7] рассмотрена задача минимизации расхода топлива дальнемагистрального воздушного судна. Для моделирования полета использована упрощенная система дифференциальных уравнений, где тяга и угол атаки вычисляются по статическим уравнениям. Сделан вывод, что маневрирование по скорости не дает заметного снижения расхода топлива, а оптимизация высоты полета эффективна при дальности полета более 5000 км. При этом не рассматривается быстродействие используемых алгоритмов для применения в функции самолетовождения, реализуемой вычислительной системой на борту воздушного судна.

Таким образом, задача формирования высотно-скоростного профиля полета, обеспечивающего минимальный расход топлива, исследована недостаточно. Для оценки расхода топлива обычно используются статические уравнения или приближенные аппроксимации расхода в зависимости от массы воздушного судна, скорости и высоты полета. Такой подход не учитывает характер расхода топлива при переходных процессах, возникающих при изменении скорости или высоты полета.

Специфика предлагаемого подхода. В настоящем докладе предлагается и обсуждается комбинированный подход, когда переходные процессы при изменении скорости или высоты полета моделируются системой дифференциальных уравнений, описывающей динамику полета, а расход топлива на участках с постоянной скоростью и высотой полета вычисляется по статическим уравнениям.

Для задач невыпуклой оптимизации с ограничениями (таких, как рассматриваемая задача) можно применять разные подходы, например градиентный или покоординатный спуск с проекцией на множество ограничений, метод доверительной области, случайный поиск и т.п. Часто применяются приемы глобальной оптимизации, использующие множественные начальные точки и рандомизацию поиска, а также эвристики типа генетических алгоритмов, так как невыпуклые задачи часто многоэкстремальные. Часть методов используют оценки градиента функции, которые требуют многократного вычисления самой функции, тем самым общее время выполнения алгоритма замедляется в число раз, кратное числу варьируемых компонент. В безградиентных методах чаще всего используется случайный поиск, что приводит к непредсказуемым результатам. В рассматриваемой задаче такие подходы признаны нецелесообразными из-за недетерминированности результата и с учетом, что вычислительная сложность — это один из основных критериев выбора метода оптимизации для реализации в бортовой вычислительной системе при ограниченном времени выполнения. Поэтому предлагается использовать детерминированный безградиентный поисковый метод оптимизации [8] с учетом ограничений.

Оптимизация расхода топлива на этапе крейсерского полета. Для этапа крейсерского полета необходимо выбрать скорость и высоту полета в каждый момент времени, учитывая, что высота должна соответствовать разрешенным эшелонам полета, то есть это ограниченный набор дискретных значений. Предложено разбивать весь этап на некоторое количество участков равной длины, на каждом из которых скорость постоянна, и на некоторое небольшое количество участков по высоте, на каждом из которых высота постоянна, но длительность каждого из этих участков может выбираться. Таким образом формируется вектор варьируемых переменных – это время, отведенное на каждый участок по скорости, значение высоты и время, отведенное на

каждый участок по высоте. Задача оптимизации для крейсерского полета формулируется как минимизация целевой функции – суммарного расхода топлива на этапе – для варьируемых переменных с учетом ограничения, что суммарное время участков равно заданному.

Сложность задачи вычисления целевой функции состоит в том, что текущий секундный расход топлива зависит не только от скорости и высоты полета, но и от массы воздушного судна. При этом масса постоянно уменьшается в соответствии с расходом топлива, и это изменение для рассматриваемого среднемагистрального воздушного судна может быть существенным: при максимальной дальности полета масса потребляемого топлива может составлять более 30 % общей массы воздушного судна. Поэтому для получения значения расхода топлива на всем этапе необходимо промоделировать полет на этом этапе для значений варьируемых переменных. Мы моделируем решение системы дифференциальных уравнений с использованием аппроксимации удельного расхода топлива в зависимости от скорости, высоты и тяги [9].

Оптимизация расхода топлива на этапе набора высоты. В рамках общей задачи минимизации расхода топлива дозвукового турбореактивного среднемагистрального узкофюзеляжного пассажирского воздушного судна при условии прибытия в заданное время в точку захода на посадку, предложенный подход был распространен на задачу оптимизации этапа набора высоты. Этап набора высоты начинается от высоты, на которой заканчивается этап взлета (обычно это значение принимается равным 1500 футов). При этом считаются известными и другие начальные условия: скорость, угол наклона траектории, масса.

В конце этапа набора высоты требуется выйти на значения высоты и скорости, с которых будет начинаться этап крейсерского полета; предполагается, что эти значения заданы. При этом необходимо учитывать ограничения допустимой скорости, в том числе обусловленные ограничением шума на малой высоте, а также ускорения и скороподъемности, обусловленные не только техническими ограничениями воздушного судна, но и требованиями комфорта пассажиров. Существенной особенностью этапа набора высоты является учет доступной тяги двигателей, так как допустимые значения ускорения и угла наклона траектории могут требовать значения тяги, превышающие максимально доступное. Кроме того, доступная тяга уменьшается с ростом высоты полета. Это приводит к тому, что если пытаться поддерживать высокое значение угла наклона траектории, то скорость будет падать, а при поддержании допустимого ускорения или даже постоянной скорости угол наклона траектории должен уменьшаться по мере увеличения высоты.

Очевидно, что так как этап набора высоты непродолжителен, то выигрыш расхода топлива, полученный в результате оптимизации, в абсолютных значениях будет сравнительно невелик [10]. Так, в [11] при оптимизации набора высоты среднемагистрального воздушного судна получена экономия топлива до 0,9 % по сравнению со стандартным профилем. Тем не менее, при рассмотрении многокритериальной оптимизации, учитывающей также вредные выбросы, эффект может быть значимым [12]. Учитывая, что этап набора высоты после взлета часто происходит в густонаселенных районах, сокращение вредных выбросов является одним из основных факторов минимизации расхода топлива.

Заключение. Несмотря на сложную структуру целевой функции, предложенные алгоритмы оптимизации быстро сходятся, что позволяет использовать его в бортовых системах управления самолетовождением. При этом используются аппроксимирующие формулы удельного секундного расхода топлива и доступной тяги, которые должны быть определены для используемых двигателей, а также формулы и параметры системы управления тягой и тангажом.

Разработан алгоритм взаимосвязанной оптимизации этапов набора высоты и крейсерского полета. При наличии необходимых данных для моделирования применение предлагаемого подхода способно обеспечить экономию расхода топлива до 1,5 % на этапе набора высоты и – при использовании прогнозных значений температуры реальной атмосферы на маршруте – до 3 % на этапе крейсерского полета. Разработанная модель позволяет получать оптимальный высотно-скоростной профиль с использованием данных реальной атмосферы с учетом прогноза скорости ветра. Продолжается работа по оптимизации этапа снижения и взаимосвязанной оптимизации всех трех этапов.

Полученные научные результаты могут использоваться для модернизации существующих и разработки новых систем самолетовождения для всех типов магистральных воздушных судов. Возможно развитие полученных результатов для конкретных задач самолётовождения различных моделей воздушных судов. Основная предполагаемая область применения – это разрабатываемые в Российской Федерации пассажирские и транспортные воздушные суда гражданской авиации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Русол В.А.** Оптимизация маневрирования воздушных судов. М.: Транспорт, 1986.
2. **Скрипниченко С.Ю.** Оптимизация режимов полета по экономическим критериям. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1988.
3. **Franco A., Rivas D., Valenzuela A.** Minimum-Fuel Cruise at Constant Altitude with Fixed Arrival Time. *J. Guidance, Control, Dynam*. 2010. Vol. 33. No. 1. P. 280–285.
4. **Saucier A., Maazoun W., Soumis F.** Optimal Speed-Profile Determination for Aircraft Trajectories. *Aerosp. Sci. Technol.* 2017. Vol. 67. P. 327–342.
5. **Valenzuela A., Rivas D.** Optimization of Aircraft Cruise Procedures Using Discrete Trajectory Patterns. *J. Aircraft.* 2014. Vol. 51. Iss. 5. P. 1632–1640.
6. **Григоров П.Ю., Куланов Н.В.** Применение концепции обратных задач динамики в задачах вертикальной навигации. *Известия РАН. Теория и системы управления.* 2016. № 3. С. 130–140.
7. **Губарева Е.А., Мозжорина Т.Ю.** Оптимизация программы полета дозвукового пассажирского самолета на участке крейсерского полета. *Инженерный журнал: наука и инновации.* 2014. Вып. 12(36).
8. **Поляк Б.Т.** Введение в оптимизацию. 2-е изд., испр. и доп. М.: ЛЕНАНД, 2014.
9. **Александров В.А., Зыбин Е.Ю., Косьянчук В.В., Сельвесюк Н.И., Тремба А.А., Хлебников М.В.** Оптимизация высотно-скоростного профиля крейсерского полета воздушного судна при фиксированном времени прибытия. *Автоматика и телемеханика.* 2021. № 7. С. 69–85.
10. **Губарева Е.А., Мозжорина Т.Ю.** Оптимизация программы полета дозвукового пассажирского самолета на участке разгона – набора высоты. *Инженерный журнал: наука и инновации.* 2013. № 7(19).
11. **Ghaemi R., Lax D.M., Westervelt E.R., Darnell M., Visser N.** Optimal Variable-Speed Climb for a Fixed-Wing Aircraft. AIAA 2019-3617. AIAA Aviation 2019 Forum. 2019.
12. **Wan J., Zhang H., Liu F., Lv W., Zhao Y.** Optimization of Aircraft Climb Trajectory Considering Environmental Impact Under RTA Constraints. *Journal of Advanced Transportation*. 2020. No. 5. P. 1–17.

V. V. Kosyanchuk, N. I. Selvesyuk (State Research Institute of Aviation Systems, Moscow), M. V. Khlebnikov (V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow). **Ways to improve fuel efficiency of mainline aircrafts for civil aviation**

The problem of optimizing the altitude and speed profile of a mainline civil aviation aircraft at a fixed arrival time is considered. An easy-to-implement algorithm for the interrelated optimization of the phases of climb and cruise flight of an aircraft has been developed. It is able to provide the fuel consumption savings of up to 1.5% at the phase of climb and up to 3% at the phase of cruise flight using the predicted values of the temperature of the real atmosphere on the route. The results obtained can be used to modernize existing and develop new navigation systems for all types of mainline aircraft.

Ю. В. ГУРЬЕВ
(ВМПИ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия, Санкт-Петербург)

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ И ПРОГНОЗИРОВАНИИ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ

Обобщен опыт использования компьютерного моделирования для решения актуальных задач гидродинамического проектирования и управления морскими объектами, а также прогнозирования создаваемых ими гидрофизических аномалий. Для этого применялись две модели течений – турбулентного движения, в том числе и неоднородной вязкой жидкости, и безвихревого движения невязкой жидкости. Методы первой модели ориентированы на решение как исследовательских, так и прикладных задач кораблестроения и ВМФ. Методы второй модели отличаются экономичными алгоритмами и предназначены для инженерного гидродинамического анализа, в частности на начальных этапах проектирования морских объектов, а также для использования в составе математического и программного обеспечения тренажеров и специальных бортовых комплексов при моделировании управляемого движения таких объектов.

Приведены примеры практического применения разработанных методов и компьютерных программ при проектировании морских объектов и органов их управления, пусковых установок морского оружия, для определения безопасных параметров его отделения и требований к системам управления подводных аппаратов в сложных гидрофизических условиях, для получения и анализа параметров гидрофизических искусственных аномалий – внутренних волн, вихревых структур, гидрофизических и гидродинамических полей, необходимых при решении специальных задач ВМФ.

Введение. В настоящее время компьютерные технологии механики жидкости и газа стали эффективным средством создания инновационных объектов практически во всех отраслях промышленности – в авиации, кораблестроении, машиностроении, энергетике и других. История этих технологий началась в 60-х годах прошлого века, а к настоящему времени их бурное развитие, во многом обусловленное стремительным ростом производительности компьютеров, позволило сформировать новую ветвь этой науки – вычислительную гидродинамику (ВГД или CFD – Computational Fluid Dynamics) [1].

В докладе приводятся результаты использования методов ВГД для решения ряда научно-исследовательских и прикладных задач кораблестроения и ВМФ, связанных с гидродинамическим проектированием и управлением морскими объектами (МО) и прогнозированием создаваемых ими гидрофизических аномалий в однородной и неоднородной средах. Результаты были получены коллективом авторов, работающих в ВМПИ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» и СПбГМТУ. При этом применялись как авторские разработки математического и программного обеспечения, так и коммерческий программный пакет FLUENT.

Основным содержанием этих исследований было и остается научно-техническое обоснование проектно-конструкторских решений при создании и эксплуатации морской техники различного назначения. Значительная часть этих работ связана с гидродинамическим проектированием, т.е. с той частью общего проектирования, которая требует научно-технического анализа данных, получаемых методами механики жидкости. Большинство результатов получены в ходе выполнения НИР и ОКР в рамках Гособоронзаказа, по заказам промышленности и Главного командования ВМФ. При выполнении ряда из них осуществлялось плодотворное сотрудничество с учеными и специалистами институтов Российской академии наук, другими научными и промышленными организациями и университетами.

Модели и численные методы расчета течений жидкости. Приведенные ниже результаты получены с использованием двух моделей течений. Первая – это модель турбулентного течения вязкой среды, базирующаяся на осредненных уравнениях Навье-Стокса в приближении Рейнольдса или метода крупных вихрей. Достоинство такого подхода – это наибольшая степень

адекватности и полноты учета основных физических факторов в их взаимодействии, достижимые на современном этапе развития вычислительной техники и методов ВГД. Основной недостаток – высокая вычислительная стоимость даже при использовании высокопроизводительных компьютеров с организацией параллельных вычислений. Эта модель реализована в программном пакете FLOWFES-WAKE (метод крупных вихрей), созданном, к сожалению, ныне покойным д.т.н. И.В. Ткаченко [1,2]. Основными уравнениями этой модели являются осредненные по пространству уравнения неразрывности и Навье-Стокса, которые могут быть записаны в тензорной форме

$$\frac{\partial\langle u_i\rangle_\Delta}{\partial x_i} = 0, \qquad \frac{\partial\langle u_i\rangle_\Delta}{\partial t} + \langle u_j\rangle\frac{\partial\langle u_i\rangle_\Delta}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial\langle p\rangle_\Delta}{\partial x_i} + \frac{\partial}{x_j}\nu\frac{\partial\langle u_i\rangle_\Delta}{\partial x_j} - \frac{\partial\tau_{ij}^{SGS}}{\partial x_j} + g_i + F_\sigma. \qquad (1)$$

где u_j – компонента вектора скорости, p – давление, ν – кинематическая вязкость жидкости, g_i – омпонента вектора ускорения свободного падения, F_σ – объёмная сила поверхностного натяжения, τ_{ij}^{SGS} – подсеточные напряжения.

При расчетах неоднородной среды и наличии свободной поверхности система (1) дополнялась соответствующими уравнениями и соотношениями. Часть результатов получена с помощью коммерческого пакета FLUENT (осредненные по времени уравнения Рейнольдса).

Вторая модель – это модель потенциальных (безвихревых) течений невязкой жидкости. Ее допущения накладывают определенные ограничения, но тем не менее модель позволяет успешно даже на персональных компьютерах решать многие актуальные для кораблестроения и ВМФ задачи. Для реализации этой модели использовался метод гидродинамических особенностей, в котором воздействие твердого тела на поток заменялось действием слоя источников или дискретных вихревых нитей [1,2]. В результате решение математической части задачи сводится к численному интегрированию граничного интегрального уравнения (ГИУ) относительно неизвестной плотности источников σ

$$\boldsymbol{2\pi\sigma(P)} + \int_S \boldsymbol{\sigma(Q)}\frac{\vec{r}\cdot\vec{n}}{r^3}\boldsymbol{dS} = \left(\vec{V}_0 + \vec{\omega}\times\vec{r}_0\right)\cdot\vec{n}(P), \qquad (2)$$

где $\vec{V}_0$ и $\vec{\omega}$ – поступательная и угловая скорости объекта, $\vec{r}_0$ – радиус-вектор расчетной точки P относительно полюса, Q – текущая точка поверхности корпуса S, $\vec{r} = \overrightarrow{QP}$, $\vec{n}$ – орт внешней нормали к S. Неизвестная интенсивность вихревых нитей определялась из условия непротекания.

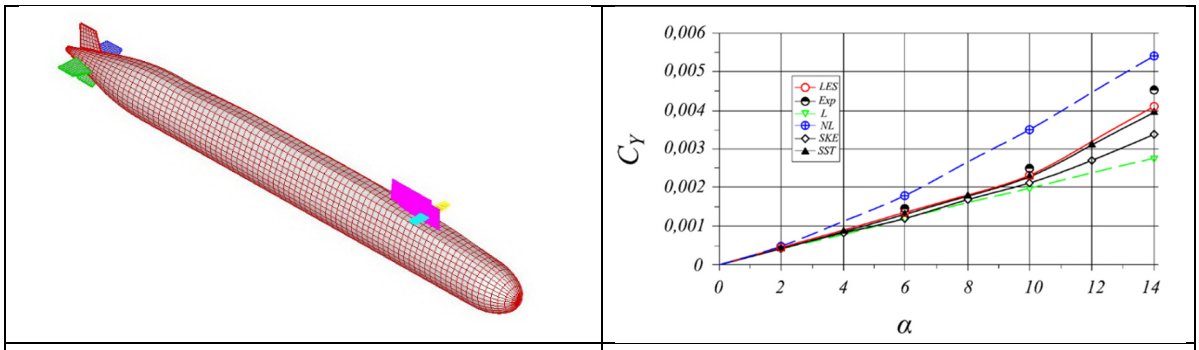
Результаты исследований.

Проектирование МО и органов их управления. На начальных этапах проектирования требуется рассмотреть и сопоставить большое число проектно-конструкторских решений, что требует использования экономичных с вычислительной точки зрения моделей и алгоритмов. Этому требованию отвечает потенциальная модель обтекания корпуса МО, основанная на решении ГИУ (2). Она обеспечивает расчет инерционных гидродинамических реакций на корпусе, как интегрированием давлений, так и с помощью обобщенных присоединенных масс с необходимой точностью [3]. Кроме того, знание присоединенных масс позволяет рассчитать управляемое движение МО.

Следующим шагом в развитии этих методов стало моделирование обтекания корпуса с органами управления и выступающими частями. Для их моделирования были использованы численные методы теории крыла. На рис. 1а показана расчетная сетка такого объекта. Существенным научным и прикладным результатом стал косвенный учет влияние вязкости жидкости на гидродинамические давления на корпусе, а значит и на действующие на него силы. Была предложена модель завихренности пограничного слоя и вихревого следа, состоящая из конечного числа дискретных продольных вихрей. Эта модель является замкнутой и в отличие от других моделей не требует проведения физических экспериментов для получения необходимых параметров. Предложенная модель является аналогом классической модели Н.Е. Жуковского для расчета подъемной силы крыла и имеет две версии: линейную для малых и нелинейную для умеренных углов атаки.

Позднее для прогнозирования гидродинамических характеристик МО были использованы и методы расчета турбулентных течений. На рис. 1а показана компьютерная визуализация течения вокруг схематизированного МО при значительных углах дрейфа (пакете FLOWFES-WAKE), а на рис. 1б приведены результаты расчетов коэффициента подъемной силы, действующей на МО, различными методами, а также опытные данные. В линейной области его изменения все

сравниваемые методы дают близкие результаты, однако с ростом угла атаки потенциальная модель существенно увеличивает расхождение с экспериментом, даже в нелинейной версии.

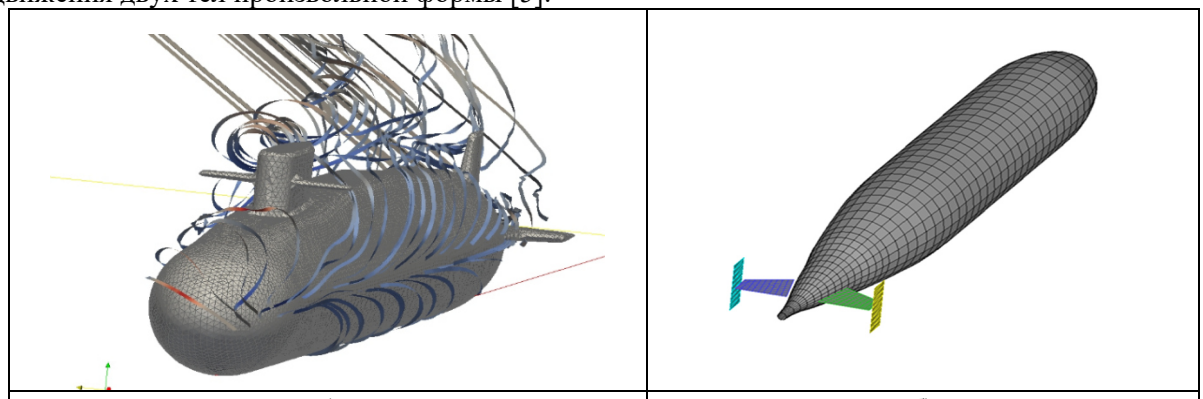


а)	б)

Рис. 1 – а) расчетная сетка МО с кормовым оперением и выступающими частями; б) коэффициент подъемной силы МО, полученный различными методами (*L* и *NL* – линейная и нелинейная потенциальные модели, *SKE* и *SST* – соответственно *k-e* модель и модель Ф. Ментера (уравнений Рейнольдса), *LES* – метод крупных вихрей, *Exp* – эксперимент)

Тем не менее, эта модель позволила успешно решить задачу оценки эффективности Н-образного кормового оперения подводного объекта (рис. 2б) по сравнению с другими его формами. В ходе вычислительного эксперимента был выполнен сопоставительный анализ гидродинамических характеристик ряда схем (крестообразной, Х-, Н-, П- и λ-образных), и было установлено, что Н-образное оперение повышает характеристики маневренности и стабилизации движения по сравнению с традиционной крестообразной формой при одинаковой площади их оперения [4]. Кроме того, новое оперение обеспечивает более равномерное поле скорости в диске гребного винта, что снижает первичное гидроакустическое поле.

Проектирование пусковых установок подводного морского оружия и определение безопасных условий его отделения. Такая задача решалась на основе потенциальной модели и потребовала совместного решения двух ГИУ (2) – для носителя и отделяющегося изделия с учетом реальной геометрии тел, их взаимодействия и нестационарности процесса. Разработаны два новых метода численного определения параметров траектории выходящего изделия, необходимые для выбора проектных параметров пусковой установки и скоростей движения носителя и изделия, обеспечивающих его безаварийное отделение. Второй метод основан на развитии теории обобщенных присоединенных масс, которая была распространена на случай движения двух тел произвольной формы [5].



а)	б)

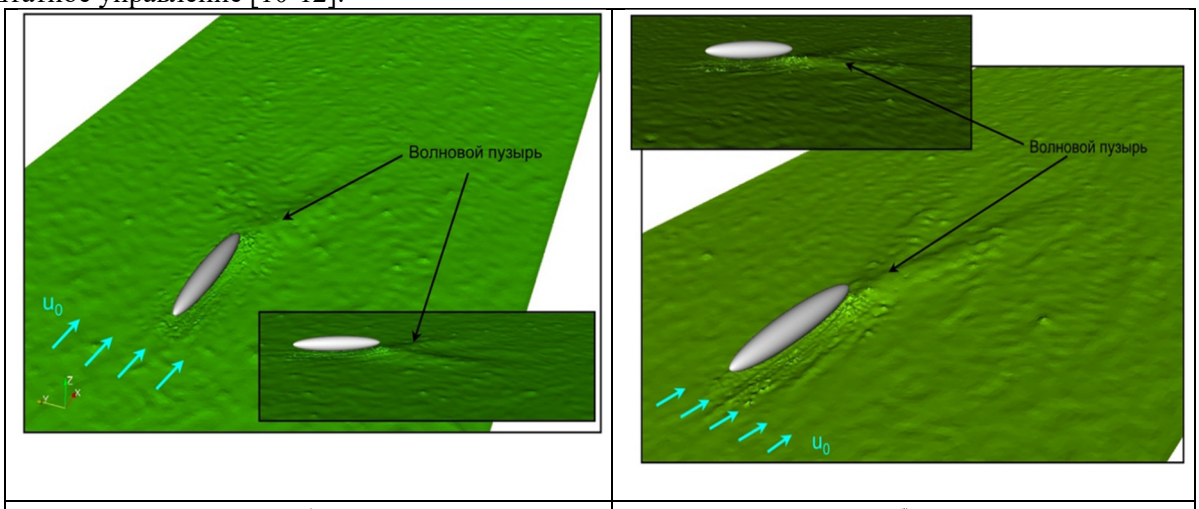
Рис. 2 – а) траектории жидких частиц при обтекании МО при угле дрейфа 15^0; б) Н-образное кормовое оперение подводного объекта

Совместное маневрирование судов на малых дистанциях. Для решения задачи динамики судов при совместном маневрировании были использованы наработки, полученные при решении предыдущей задачи. Кроме прогнозирования силового воздействия на суда были получены и новые формы уравнений их движения, учитывающие переменность присоединенных масс судов при их относительном перемещении [6].

Снижение вибрации и шума в фасонных элементах трубопроводов. Примером успешного применения численного моделирования для расчета внутренних течений вязкой жидкости является разработка практического метода проектирования новых форм проточных частей фасонных элементов (повороты, отводы, тройники) с плавным безотрывным течением. Метод основан на интегрировании уравнений (1) и позволяет существенно снизить уровень гидравлических сопротивлений, вибраций и коррозионно-эрозионного износа. Некоторым недостатком получаемых форм является их сложная геометрия [7].

Системы умерения качки. Снижение параметров качки морских объектов было и остается актуальной задачей кораблестроения. С этой целью ушедшим из жизни профессором Ю.В. Разумеенко были предложены специальные системы нейтрализации волновых возмущений, действующих на различные морские сооружения (плавучие буровые установки, понтоны, буи и др.). Для нейтрализации этих возмущений на объект устанавливаются так называемые пассивно-активные демпферы – полностью погруженные конструкции плоской или объемной формы. Для обеспечения их эффективной работы необходимо для заданной геометрии объекта и параметров морского волнения подобрать (рассчитать) форму, размеры и места установки демпферов, для чего требуется определить их присоединенные массы и коэффициенты демпфирования. Для решения этой задачи был разработан численный метод, в котором потенциальное течение моделировалось гидродинамическими особенностями – источниками и вихрями. Эффективность спроектированных с помощью этого метода демпферов была подтверждена результатами физических экспериментов [8, 9].

Обоснование требований к проектным характеристикам органов и систем погружения-всплытия подводных объектов в условиях неоднородности гидрофизических полей Океана. Неоднородность гидрофизических полей плотности, солености и температуры может оказывать негативное воздействие на управляемость подводных объектов вплоть до создания угроз их безопасности. В сотрудничестве с рядом промышленных и научных организаций был разработан компьютерный комплекс имитационного моделирования и получены новые данные о параметрах динамики подводных объектов в реальных гидрофизических условиях, хорошо согласующиеся с данными натурных экспериментов в Черном море. Это позволило обосновать требования к проектным характеристикам перспективных объектов, обеспечивающие их штатное управление [10-12].



а)	б)

Рис. 3 – Структура волн при движении эллипсоида удлинением 6:1 над пикноклином:
а) Fr = 0,075; б) *Fr* = 0,2

Прогнозирование параметров гидрофизических аномалий, создаваемых морскими подводными объектами, для решения специальных задач ВМФ. Для решения ряда задач ВМФ были разработаны модель и компьютерная программа на основе численного решения уравнений Навье-Стокса (1). Получены новые научные и прикладные данные о возникновении и эволюции различных гидрофизических аномалий – вызванных внутренних волн, вихревых систем, турбулентности и др. Особое внимание обращено на аномалии, поддающиеся регистрации современными техническими средствами. В качестве примера на рис. 3а и 3б представлены

компьютерные картины вызванных движением эллипсоида внутренних волн на границе раздела двух слоем жидкости различной плотности (пикноклин). На левом рисунке эллипсоид движется с числом Фруда 0,075, а на правом – при Fr = 0,2. Анализ этих и других данных проведенных расчетов показал, что при движении объекта при малых значениях числа Фруда наблюдается формирование волновой структуры, состоящей из волнового пузыря и системы расходящихся волн (аналог корабельных волн на поверхности воды). При больших значениях этого критерия волны образуются не только от самого объекта, но и его вихревого следа [2, 13].

Гидрофизический канал бортовой оперативно-советующей системы информационной поддержки принятия решений по обеспечению скрытности МО. В состав электронного макета и натурного образца этого комплекса входит математическое и программное обеспечение, разработанное с использованием информации, полученной в ходе исследований с использованием описанных выше моделей и программ. Это позволило уточнить математические модели гидрофизического канала комплекса и определить направления их дальнейшего совершенствования и расширения возможностей [14].

Заключение. Мировой и отечественный опыт показывает, что современная ВГД обеспечивает эффективное решения большинства актуальных задач кораблестроения. Ее возможности не только сравнялись, но по ряду направлений превзошли аналогичные возможности физического эксперимента. При этом ВГД обладает принципиальным преимуществом – перспективой практически неограниченного развития, основанного на росте производительности компьютеров, совершенствовании моделей и численных методов, в том числе визуализации течений, что обеспечит решение все более сложных задач, в частности, междисциплинарных. Хотя сказанное относится в большей мере к моделям вязких течений, но и модели невязкой жидкости, благодаря преимуществу по быстродействию и простоте использования проектантами и инженерами, определенное время будут занимать свою нишу в инженерном анализе и в технических системах, имеющих по объективным причинам компьютеры с относительно низкими показателями производительности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гурьев Ю.В., Ткаченко И.В.** Компьютерные технологии в корабельной гидродинамике. /Монография. СПб., Военно-морской инженерный институт, 2010.
2. **Гурьев Ю.В., Ткаченко И.В., Якушенко Е.И**. Гидродинамика морских объектов в натурных гидрофизических условиях. /Монография – СПб. Изд-во ВМПИ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», 2014. -274 с.
3. **Гурьев Ю.В., Красиков В.И.** Нелинейная математическая модель и численный метод прогнозирования ГДХ ПЛ на ранних этапах проектирования// Сборник трудов Межвузовской научной конференции «Совершенствование подготовки инженерных кадров ВМФ по предупреждению аварийности на Флоте», ВМИИ, СПб., 2007.
4. **Гурьев Ю.В., Калинин О.С.** Сравнительный анализ гидродинамических характеристик различных конструктивных схем кормового оперения современных ПЛ// Сборник трудов Межвузовской научно-технической конференции «Проблемы эксплуатации вооружения, военной техники и подготовки инженерных кадров ВМФ», СПб, 2004.
5. **Короткин А.И.** Присоединенные массы судовых конструкций. Справочник/ СПб.: Мор Вест., 2007.
6. **Гурьев Ю.В.** Дифференциальные уравнения движения двух судов при совместном маневрировании// Сборник докладов Второй Международной конференции по судостроению – ISC'98, СПб, 1998.
7. **Гурьев Ю.В., Ткаченко И.В., Щукин П.И**. Теоретико-экспериментальный метод проектирования фасонных элементов с улучшенными характеристиками для трубопроводов различного назначения// Материалы 4-ой международной конференции по морским технологиям, СПб., «МОРИНТЕХ», 2001.
8. **Разумеенко Ю.В. Пыльнев Ю.В.** Полупогруженное основание морских сооружений, патент РФ № 2011599 с приоритетом от 08.07.1991.
9. **Гурьев Ю.В., Пыльнев Ю.В., Разумеенко Ю.В., Шульц В.Ю.** Метод снижения волновых нагрузок на буровые и добывающие платформы. Седьмая Международная конференция «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб, 2004.
10. **Гурьев Ю.В., Ткаченко И.В**. Моделирование гидродинамических реакций, действующих на подводные объекты, методами вязкой и невязкой жидкости// Труды НТК «Проблемы мореходных качеств судов и корабельной гидромеханики», XLI Крыловские чтения, СПб, 2003.
11. **Васильев С.Н., Гурьев Ю.В., Разумеенко Ю.В., Якушенко Е.И.** Компьютерные технологии в гидродинамическом проектировании и управлении морскими объектами и их гидрофизическими полями. Труды XI Международной научной конференции «Аналитическая механика, устойчивость и управление» Казань (Россия) 14–18 июня 2017 г., стр. 25-37.

12. **Гурьев Ю. В., Слуцкая М.З.** Результаты компьютерного моделирования силового воздействия сложных морских условий на подводные объекты. Труды 2-й конференции «Управление морскими системами» (в составе «13-й мультиконференции по проблемам управления" (МКПУ-2020), Санкт-Петербург, 6–8 октября 2020 г.
13. **Гурьев Ю.В., Ткаченко И.В**. Структура течения за погруженным телом вблизи пикноклина // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2010. № 1. С. 22-31.
14. **Бурсук В.И., Васильев С.Н., Галяев А.А., Горкунов Э.С., Гурьев Ю.В., Якушенко Е.И.** Методические основы создания тактических оперативно-советующих систем поддержки принятия решений в задачах обеспечения безопасности сложных технических объектов. X Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», 16–20 мая 2016, Екатеринбург.

Guryev Y. V. (Naval Polytechnic Institute (Branch) MESC NF “Naval Academy”, Saint Petersburg). **Experience of using computer technologies in hydrodynamic design of marine objects and prediction of hydrophysical anomalies.**

The experience of using computer modeling to solve actual problems of hydrodynamic design and control of marine objects, as well as prediction hydrophysical anomalies created by them, is summarized. For this, two models of flows were used - turbulent motion, including inhomogeneous viscous fluid, and irrotational motion of inviscid fluid. The methods of the first model are focused on solving both research and applied problems of shipbuilding and the Navy. The methods of the second model are distinguished by economical algorithms and are intended for engineering hydrodynamic analysis, in particular, at the initial stages of designing marine objects, as well as for use as part of the mathematical and software of simulators and special on-board complexes when simulating the controlled movement of such objects. Examples of the practical application of the developed methods and computer programs in the design of marine objects and their controls, launchers of naval weapons, to determine the safe parameters of its separation and requirements for control systems of underwater vehicles in difficult hydrophysical conditions, to obtain and analyze the parameters of hydrophysical artificial anomalies are given - internal waves, vortex structures, hydrophysical and hydrodynamic fields necessary for solving special problems of the Navy.

В.И. ГОРОДЕЦКИЙ
(АО «ЭВРИКА», Санкт-Петербург)

ПРЕДСКАЗАНИЕ ГРУППОВОГО ПОВЕДЕНИЯ И НАМЕРЕНИЙ СОПЕРНИКА

Рассматривается одна из ключевых задач проблемы антагонистического поведения двух сложных систем в общей среде – предсказание намерений соперника для оценки угрозы, которую они могут нести для достижения своих целей, и опережающего планирования своих действий. Формулируется типовая постановка этой задачи совместно с задачей предсказание группового поведения соперника. При решении этих задач используется поведенческая концепция искусственного интеллекта и сценарная модель группового поведения соперника. Проводится анализ источников данных, нужных для обучения алгоритма инжиниринга признаков и предсказания намерений, и показывается ключевая роль цифрового двойника группового поведения соперника в этих задачах.

1. Введение.

Современный цифровой мир, который породил много новых возможностей, породил также не меньше новых источников и типов угроз разного уровня глобальности и различной степени опасности по своим последствиям. Этот мир существует в условиях жесткого соперничества и конкуренции, и это касается практически всех уровней и аспектов жизни и деятельности общества. Сейчас при решении практически любой общественно значимой задачи, будь то управление в экономике или в политике, в военном деле или на производстве, в сельском хозяйстве или в бизнесе, в социальной сфере или еще где-то, практически везде необходимо учитывать сознательное противодействие того или иного происхождения. Это может быть враждебная страна или соперничающая компания, злоумышленник, для которого противодействие является видом бизнеса, или соперник по выборам и т.п. При этом как сама активность, так и источник противодействия могут существовать как в физическом, так и в виртуальном пространстве или в обоих сразу. По этим причинам проблемы обеспечения безопасности в настоящее время становятся ключевыми для современного цифрового общества, что выдвигает на первый план вопросы исследования теоретических и прикладных основ безопасности, которые носят общий, предметно независимых характер, и требует изучения этой проблемы на уровне абстракции, отвлеченном от конкретных приложений и их специфики.

Проблема управления в среде с противодействием выходит на первый план не только как следствие негативных аспектов развития цифрового общества, которые привели к появлению большого числа качественно новых угроз. Эта проблема стала гораздо более острой и в связи с созданием крупномасштабных критических приложений на глобальном уровне и на уровне отдельных государств и эти приложения стали одновременно и оружием, и уязвимыми точками в межгосударственных отношениях. Примерами таких приложений являются конкурентная борьба компаний и государств на глобальных рынках, где эта борьба очень часто выходит за пределы рыночных отношений; и в настоящее время открыто называется торговыми войнами. Большое число примеров дают операции в киберпространстве, когда одна из сторон имеет целью нарушить безопасность критически важной компьютерной системы или инфраструктуры соперника, безопасность его данных, а другая сторона имеет целью своевременно распознать намерения атакующей стороны и стремится предотвратить в реальном времени возможные негативные последствия и потенциальный ущерб. Примерно десять лет тому назад стала реальностью такая ныне распространенная форма межгосударственной конкуренции, как гибридная война, которая «стали результатом технологической «революции» в сфере информационных войн, произошедшей в 2014–2015 гг., фактически подтолкнувшей процесс «сборки» различных невоенных форм силового подавления противника», которая постепенно превратилась в «невоенную форму ведения войны» [1]. Одной из форм гибридной войны или ее компонентой является «цветная революция», относительно новая форма противостояния государств, которая реализуется параллельно с одинаковой интенсивностью в физическом и виртуальном пространствах. Этот список приложений можно продолжить, и он постоянно пополняется новыми примерами. Все это служит основанием для того, чтобы признать описываемую проблему безопасности актуальной.

Предыстория исследований и разработок по проблеме. Проблема управления сложной системой в условиях сознательного противодействия не является новой для науки. Действительно, эта проблема имеет уже достаточно долгую историю – около 80 лет тому назад она породила теорию игр, исследование операций, корпорацию RAND, а в 1968 г. была опубликована ныне классическая книга Т.Саати [2], в которой уже тогда была математически предсказана современная ситуация в треугольнике США–Китай–Россия (тогда – СССР). Новый всплеск интереса к этой проблеме появился в 1990х, когда DARPA активно финансировала программу исследований в области группового управления в приложениях военного характера, которые проводились ведущими университетами США, Европы и Азии, в частности, университетами Японии. Тогда на смену математическому подходу, характерному для предыдущего этапа, пришли компьютерные модели распределенного искусственного интеллекта (ИИ). Однако нельзя утверждать, что эти проекты и их результаты сильно продвинули проблему безопасности с теоретической точки зрения, или дали в руки разработчиков средств защиты какую-то рабочую технологию. Во-первых, эти проекты рассматривали проблему только с позиций атакующей стороны и совсем не касались проблем защиты, а во-вторых, эти проекты фактически оказались провальными даже для такой ограниченной постановки задачи, несмотря на большие финансовые вложения [3]. Тем не менее, они внесли определенный вклад в понимание проблемы распределенного управления сложными объектами в условиях противодействия. Их положительное значение, по-видимому, состоит в том, что они показали сложность проблемы даже при ее ограниченной постановке.

В настоящее время наиболее известные разработки такого плана ведутся в рамках Программы агентства DARPA (США) под названием “Active Interpretation of Disparate Alternatives” (AIDA, 2018 – 2022). Эта Программа рассматривает широкий круг задач *предсказания* намерений и группового поведения соперника на основе информации из новостных каналов, из социальных сетей, СМИ и т.п. [4]. В качестве цели этой Программы формулируется создание *семантического* инструмента, способного работать с множеством гипотез и выдавать в явной форме интерпретацию событий, ситуаций и трендов, происходящих в некоторой предметной области интереса, используя поток текстовых неструктурированных данных, извлекаемых из многих источников, для которых характерны шум, противоречия и присутствие ложной информации. В качестве потенциальных приложений при этом явно декларируются такие, как обнаружение деятельности и намерений террористической направленности, предсказания в области событий политического характера и в области межгосударственных отношений, а также различные задачи, связанные с международными военными конфликтами, насилием на международных мероприятиях, с протестными движениями и демонстрациями и т.п. В этой Программе полагается, что практически все собранные данные представлены многоязычными текстами на естественных языках (ЕЯ). Например, в 2018 г. основное внимание в проектах этой Программы уделялось таким задачам, в которых тексты представлены на русском, украинском и английском языках, позже шла речь также и об испанском языке.

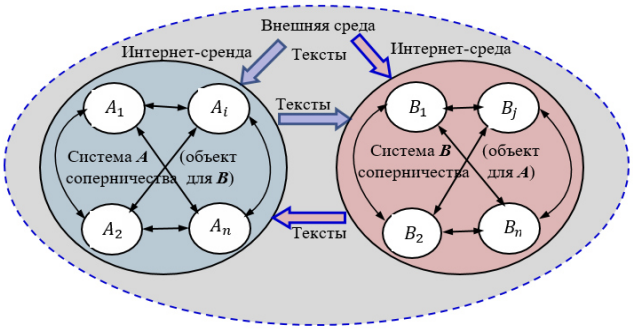
Постановка задачи распознавания намерений соперника и общие принципы моделирования ситуации с позиций каждой из соперничающих сторон впервые были рассмотрены в [5]. Несколько ранее задача в более упрощенной постановке была рассмотрена на примере приложения из области компьютерной безопасности [6]. Более современная постановка задачи управления групповым поведением в среде с противодействием приведена в [7, 8].

Общая схема информационного взаимодействия соперничающих систем в общей среде и задачи, которые они должны в процессе соперничества решать, представлены схематично на рис. 1. На этом рисунке сформулированы две типовые задачи противоборствующих сторон, а именно

Задача 1. Управление групповым поведением своих объектов для реализацией собственных намерений, и

Задача 2. Прогнозирование намерений и группового поведения соперника с целью оценки угрозы, которую они могут для неё представлять, в том числе и в части препятствий к реализации собственных намерений, и принимать контрмеры.

Основные аспекты первой из двух названных задач опубликованы в работах [9 - 12]. Вторая задача была весьма кратко рассмотрена в [8]. В данной работе предметом исследований является вторая задача, а именно задача предсказания намерений соперника. Основная особенность подхода к ее решению, который рассматривается в данной работе, состоит в том, что он опирается



Каждая из двух соперничающих сторон должна параллельно решать две задачи:
(1) управлять реализацией своих намерений через групповое поведение объектов группы, и
(2) прогнозировать намерения и групповое поведение соперника с целью оценки угрозы, которую они могут для неё представлять, и принимать контрмеры.

Рис. 1. Схема информационного взаимодействия соперничающих систем в общей ссреде и решаемые ззадачи

на концепцию цифрового двойника *поведения* соперника, который активно используется как на этапе машинного обучения, так и в процессе динамической обработки доступной онлайн-информации для оценки и предсказания возможных альтернатив намерений и группового поведения соперника. Вторая особенность предлагаемого решении состоит в том, что нем *используется сценарная* модель группового поведения, которая позволяет решать поставленную задачу в динамической постановке, что существенно расширяет пространство признаков, доступных защищающейся стороне и тем самым ведет к повышению точности распознавания намерений и предсказания конкретных целей соперника.

Компоненты модели поведения соперника. Постановка задачи. Обозначим противоборствующие стороны символами $\boldsymbol{A}$ и $\boldsymbol{B}$ (рис. 1) и будем их называть системами. Эти системы имеют антагонистические интересы, и каждая из них стремится реализовать свои намерения, которые могут представлять ту или иную угрозу для противоположной стороны. Далее для определённости будем полагать, что Задачу 2, постановка которой рассматривается в данном разделе, решает система $\boldsymbol{B}$, для которой система $\boldsymbol{A}$ является соперником с враждебными намерениями той или иной интенсивности. Рассмотрим компоненты и содержательную постановку этой задачи.

Обозначим множество объектов, составляющих систему $\boldsymbol{A}$, тем же символом $\boldsymbol{A} = \{A_1, \dots, A_n\}$. Полагаем, что объекты этой системы распределены в пространстве, физическом или/и виртуальном, могут быть автономными и/или мобильными. Полагаем также, что объекты системы $\boldsymbol{A}$ способны выполнять определённые действия и, при необходимости, автономно координировать своё пространственно-временное поведение в интересах реализации намерений системы $\boldsymbol{A}$ [9, 10]. Объекты множества $\{A_1, \dots, ,A_n\}$ формируют нижний уровень по отношению к системе $\boldsymbol{A}$, а система $\boldsymbol{A}$ в этой иерархии выполняет целеполагание для объектов $A_1, \dots, ,A_n$ и управляет, при необходимости, их групповым поведением при реализации своего высокоуровневого намерения. Объекты $A_1, \dots, ,A_n$ могут находиться в различных отношениях, они могут иметь набор свойств, представленных атрибутами, способностей по выполнению некоторых действий из заданного множества и пространственные координаты, например, широту и долготу своего позиционирования или адрес в компьютерной сети, например, URL. Значения этих атрибутов могут изменяться во времени. Каждый из объектов $A_1, \dots, ,A_n$, в свою очередь, может состоять из автономных объектов, как это представлено на рис. 2.

Введём обозначения, используемые для описания формальной постановки задачи системы $\boldsymbol{B}$ по предсказанию намерений системы $\boldsymbol{A}$ (они частично иллюстрируются на рис. 3):

$\boldsymbol{I} = \{I_1, \dots, I_m\}$ – множество возможных намерений системы $\boldsymbol{A}$;

$\widehat{\boldsymbol{X}} = \{\boldsymbol{X}(I_1)\ , \dots, \boldsymbol{X}(I_m)\}$ – множество классов состояний $\boldsymbol{X}(I_s)$ системы $\boldsymbol{A}$, где $\boldsymbol{X}(I_s) \in \widehat{\boldsymbol{X}}$ – множество (класс) ее *целевых состояний* для намерения $I_s \in \boldsymbol{I}$; другими словами, достижение некоторого состояния $X \in \boldsymbol{X}(I_s)$ отождествляется системой $\boldsymbol{A}$ с реализацией её намерения $I_s \in \boldsymbol{I}$.

$\boldsymbol{G} = < \widehat{\boldsymbol{X}}, \boldsymbol{V} >$ – направленный граф переходов классов состояний системы $\boldsymbol{A}$, где $\widehat{\boldsymbol{X}}$ – множество классов её состояний, введенных выше, $\boldsymbol{V} = \{V_{p,q}\}$ –

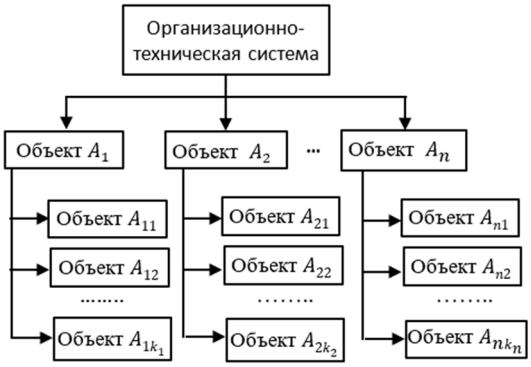


Рис. 2. Трёхуровневая иерархическая структура системы $\boldsymbol{A}$– одной и сторон соперничества

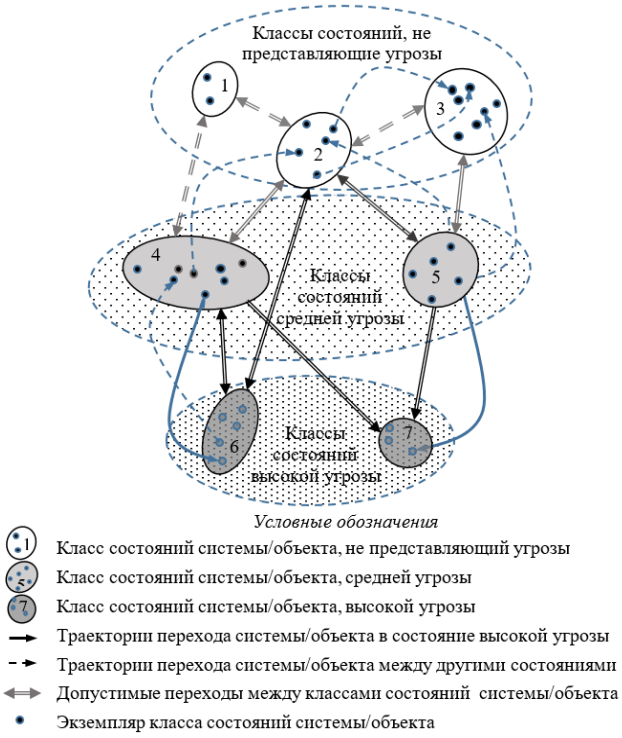


Рис. 3 . Пояснение к основным понятиям, описывающим состояния систиы/объекта и граф переходов между ними

множество дуг графа, где $V_{p,q} \in \boldsymbol{V}$ – это дуга, ведущая из состояния класса $\boldsymbol{X}(I_p)$ в состояние класса $\boldsymbol{X}(I_q)$. Обратим внимание на то, что, не между всеми парами состояний допускаются переходы (см. рис. 3).

Дадим характеристику особенностей процессов переходов состояний системы ***A***. Полагаем, что переходы состояний $V_{p,q}$ выполняются объектами из множества $\{A_1, ..., ,A_n\}$ и объектами, из которых они могут состоять на более детальном уровне иерархии в соответствии с рис. 2. Эти переходы выполняются с помощью того или иного сценария $S_{p,q}$ группового поведения этих объектов, $S_{p,q} \in \boldsymbol{S}(I_p, I_q)$, где $\boldsymbol{S}(I_p, I_q\ )$ – *класс сценариев* перехода системы ***A*** из состояния $X(t_0)$ класса $\boldsymbol{X}(I_p)$ в состояние $X(t_f) \in \boldsymbol{X}(I_q)$ целевого класса $\boldsymbol{X}(I_q)$.

Каждый переход имеет определенную продолжительность $\Delta T_{p,q}$, которая является случайной величиной для каждого перехода. Заметим, что сценарии $S_{p,q} \in \boldsymbol{S}(I_p, I_q\ )$ могут иметь иерархическую структуру типа представленной на рис. 4.

Рассмотрим более детально один из переходов, представленных на рис. 3. Это поможет лучше пояснить постановку задачи распознавания намерений соперника и предсказания группового поведения его объектов, а также технологии ее решения. Как уже отмечалось ранее, каждый узел графа переходов ***G***, как начальный, так и конечный (целевой), отвечает одному из выделенных *классов состояний* (рис. 3). На рис. 5 представлена пара узлов графа переходов ***G*** (рис. 3) с номерами 2 и 4, соответствующие классы состояний $\boldsymbol{X}(I_2)$ и $\boldsymbol{X}(I_4)$ системы ***A***, класс переходов $\boldsymbol{S}(I_2, I_4)$, а также их детализация в терминах конкретных реализаций начального и конечного состояний (случайных реализаций) $\tilde{X}(I_2)$, $\tilde{X}(I_4)$ и конкретной траектории (случайной реализации) $\tilde{Y}(t, I_2, I_4)$ перехода $S_{2,4}$.

Намерение соперника определяется целевым классом состояний объекта ***A,*** и если имеется алгоритм предсказания класса этого состояния, то это этот алгоритм позволит распознавать намерение соперника. С другой стороны, любая траектория перехода состояния между парой узлов графа переходов ***A*** выполняется в соответствии со сценарием группового поведения, принадлежащим определенному классу сценариев. Поэтому если построить алгоритм распознавания класса сценариев, к которому принадлежит конкретная траектория группового поведения, то результатом его применения будет класс целевого состояния, что также решает задачу распознавания намерений соперника и далее – задачу оценки угрозы этого намерения для противоположной стороны процесса.

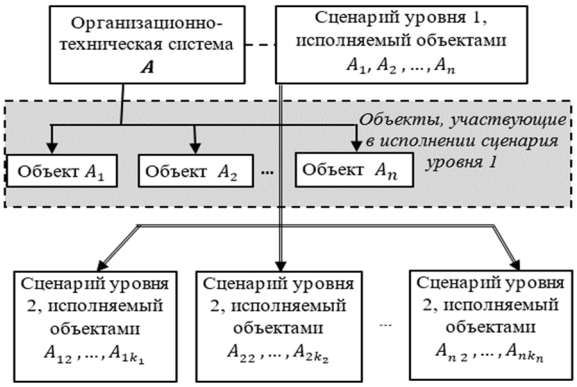


Рис. 4. Трёхуровневая иерархическая структура системы ***A*** и отвечающая ей двухуровневая структура исполняемого ею сценария

Отсюда следует вывод о том, что задачу распознавания намерений соперника можно решать в одной из двух постановок:

Постановка задачи 1.

Дано: (а) Начальное состояние $X(t_0)$ соперника в момент времени t_0.
(б) Наблюдения его траектории $X(t)$ на интервале времени $[t_0, t]$.
Найти: Намерение соперника (через предсказание его целевого состояния).

Постановка задачи 2.
Дано: (а) Начальное состояние $X(t_0)$ соперника в момент времени t_0.
(б) Наблюдения его траектории $X(t)$ на интервале времени $[t_0, t]$.
(в) Множество классов сценариев $\boldsymbol{S}(I_p, I_q)$ для всех переходов $\boldsymbol{V} = \{V_{p,q}\}$ графа переходов $\boldsymbol{G}$.
Найти: Класс исполняемого сценария из допустимого множества, что автоматически решает также и задачу 1 – предсказание класса целевого состояния.

Обе сформулированные постановки решают общую задачу классификации, однако используют разную исходную информацию и, что еще более важно, – разные алгоритмы классификации, а потому объединение их решений может обеспечить улучшение качества итогового решения. Кроме того, вторая постановка задачи не всегда возможна. Имеются и другие достоинства использования обеих постановок одной и той же задачи.

4. Методологические особенности задачи распознавания намерений. В приведенной постановке задачи объектом исследования является групповое поведение соперника. Основная особенность задач, исследующих групповое поведение и их отличие от большинства других задач ИИ состоит в том, что в них необходимо управлять не состояниями объектов, а множествами паттернов их *совместного* поведения. На решение таких задач нацелены поведенческие модели ИИ (*англ.* behavior-based systems) [13,14]. В них в центре внимания находятся динамика объектов и временные зависимости на множестве паттернов их поведения. Структурированное множество действий объектов системы (паттернов их поведения) в пространстве и во времени принято называть сценарием ее группового поведения (см. терминологию в Приложении). Ряд особенностей поведенческой модели делает ее удобной для решение задач, в которых объектом исследования является тот или иной аспект группового поведения. Например, поведенческая модель ИИ не использует модель внешней среды. В ней учёт состояния внешнего мира производится на основе обратной связи по отклонению текущих результатов исполнения сценария от их ожидаемых значений. Это заметно упрощает построение систем группового управления. Далее, в этой модели каждый объект группы выполняет *замкнутый цикл вычислений* от получения сообщений из внешнего мира и сенсорной информации и до подачи сигналов на исполнительные органы [14]. Это другое полезное свойство поведенческой модели, т.к. в групповом поведении участвуют объекты, которые должны синхронизировать свое поведение в некотором временном цикле.

Рис. 5. Пояснение к основным понятиям постановки задачи и компонент, описывающих переход системы $\boldsymbol{A}$ из состояния класса $\boldsymbol{X}(I_k)$ в состояния класса $\boldsymbol{X}(I_r)$ с использованием сценария $S_{k,r}$ класса $\boldsymbol{S}(I_k, I_r)$ по траектории $\tilde{Y}_L(t,\ I_k, I_r)$ при *k=2* и *r=4*

Существует еще один убедительный аргумент для использования поведенческой модели ИИ в рассматриваемой задаче. Поведенческая модель положена в основу модели враждебного взаимодействия двух систем в общей среде, предложенной Дж. Бойдом (J. Boyd) [15]. В соответствии с этой моделью две соперничающие системы $\boldsymbol{A}$ и $\boldsymbol{B}$ (рис. 6) в процессе выполнения своих функций повторяют стандартный цикл действий из четырёх фаз: *восприятие*, *оценка и прогноз ситуации, принятие решения*, *реализация решения*. Эта модель была предложена Дж. Бойдом для моделирования и управления военными операциями, но позднее стало понятно, что она ра-

ботоспособна и в гораздо более широком классе приложений с разной степенью жесткости (интенсивности) противоборства и противостояния, например, в задачах моделирования конкуренции на рынке, где она до настоящего времени активно используется. Представляется, что эта модель будет востребована и в большинстве задач противоборства и обеспечения безопасности.

В модели Бойда каждая из соперничающих сторон на метауровне должна структурировать своё поведение и решаемые задачи во времени в соответствии с этим циклом, и при этом каждая сторона должна также отслеживать смену фаз цикла Бойда конкурента в реальном времени. Исследования модели Бойда и огромный практический опыт ее использования показали, что в ней обычно «побеждает» та сторона, которая действует рационально и имеет более короткий цикл Бойда, чем соперник, т.е. та, которая *опережает* соперника в принятии и *исполнении решений*.

В задаче оценки и предсказания намерений системы ***A*** цикл Бойда определяет для противоположной стороны, системы ***B*** темп и временные рамки процессов обновления информации о конкуренте, потребный темп принятия решений. В зависимости от приложения длительность цикла Бойда может сильно различаться. Например, в задачах обнаружения и предотвращения вторжений в компьютерную сеть эта длительность может измеряться микросекундами, а в задаче противодействия цветной революции –может варьироваться от нескольких дней до месяцев и даже больше. Поэтому в рассматриваемом классе задач на абстрактном уровне удобно использовать целочисленную модель времени, полагая интервал дискретного времени равным реальной длительности цикла Бойда в качестве масштаба для целочисленной шкалы времени. Обратим внимание на то, что в иерархическом сценарии аналогичная иерархия будет иметь место и для множества циклов Бойда разных уровней, и эта иерархия будет накладывает ограничения на численные соотношения продолжительностей иерархически структурированных циклов Бойда.

Источники данных и знаний в задаче распознавания намерений соперника. Успех решения залечи распознавания намерений во многом зависит от состава информации, доступной системе ***B*** о состоянии и поведении системы ***A.*** Доступная информация сильно зависит от особенностей предметной области, к которой относится приложение (цветная революция, эпидемия COVID-19, конкурентная борьба, распределенная атака на ресурсы компьютерной сети и т.д.) и от ряда других факторов. Далее проводится краткий анализ потенциально доступных источников информации, которые нужно принимать во внимание в решаемом классе задач распознавания намерений соперника. Доступность и ценность источников информации, рассматриваемых далее, следует анализировать в рамках конкретного приложения.

Источники данных. Система ***B*** в процессе «наблюдения» за объектами соперника ***A*** может получать данные о них и об их поведении в разной форме и из разных источников, В данной работе внимание акцентируется на данных, собираемых из социальных медиа, средств массовой информации и специальных источников, которые могут быть доступны системе ***B***. Во многих современных приложениях антагонистического соперничества эти источники данных являются основными. К таким приложениям относятся предсказание развития цветной революции, задачи технической разведки и обнаружения технологических трендов и прорывных технологий у конкурентов, задачи соперничества на выборах, вскрытия террористической активности и др.

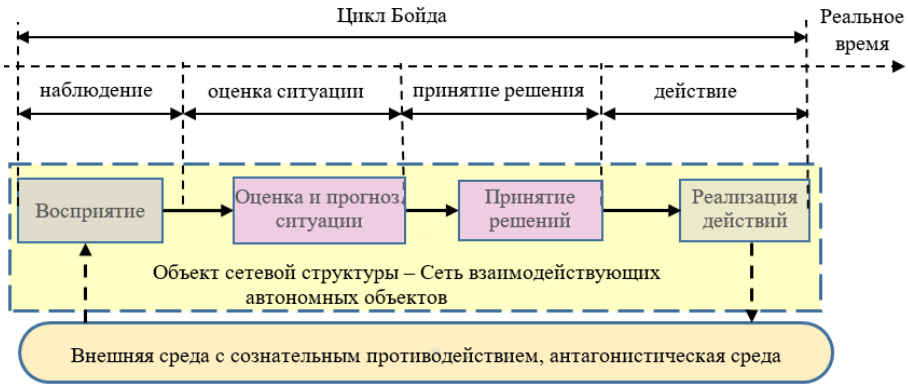


Рис. 6. Цикл Бойда в задачах соперничества сложных систем, функционирующих общей среде

Как отмечалось в разд. 2, наиболее известные разработки, которые в задаче соперничества используют социальные медиа в качестве основного источника данных, ведутся в рамках Программы AIDA (2018 – 2022), выполняемой в интересах военного ведомства агентством DARPA. В этой программе явно формулируются требования к свойствам данных, собираемых из внешней среды, и к технологиям их обработки:

– данные могут быть разного уровня достоверности;
– данные не размечены именами классов явлений, распознаваемых или предсказываемых;
– обработка данных должна производиться практически в реальном времени;
– результаты обработки отдельных текстов из разных источников должны интегрироваться в некоторую целостную картину с ее представлением на разных уровнях обобщения;
– результаты обработки данных должны представляться в терминах ЕЯ и хорошо интерпретироваться содержательно;
– обработка данных, собираемых в последовательные периоды времени, должна использоваться для обнаружения трендов и предсказания поведения объекта интереса;
– все эти результаты должны получаться при минимальном участии человека.

Сбор онлайн-данных по нужной тематике, однако, не является технически простой задачей. Для их поиска необходимо иметь вычислительно эффективные семантические краулеры и семантические фильтры, которые позволят отфильтровывать основную массу нерелевантных данных. Особенность собираемых данных состоит также в том, что заранее невозможно предсказать, какие именно данные об объекте интереса ***A*** удастся обнаружить в очередном цикле Бойда и насколько они будут достоверными. Неизвестно также, насколько полными и/или достаточными будут эти данные в контексте решаемых задач. Поэтому так важно иметь в системе сбора средства оценивания и улучшения качества собранных данных по разным критериям.

Собираемые данные нужны для двух целей. С одной стороны, данные о поведении и состоянии соперника ***A*** нужны системе ***B*** для решения задачи распознавании его намерений и предсказания его группового поведения его объектов в каждом цикле Бойда, и это основное их назначение. С другой стороны, эти данные, если они накоплены в достаточном объеме и обладают необходимой полнотой и достоверностью, могут стать при использовании машинного обучения неоценимым источником знаний, необходимых системе ***B*** для оперативного решения задач распознавания и предсказания.

К сожалению, собираемые данные далеко не всегда могут быть использованы как обучающие данные. Во-первых, он обычно имеют ограниченный объем. Во-вторых, они не всегда или не все могут быть размеченными, и тогда задачу разметки придется решать отдельно. Хотя в настоящее время имеются инструменты для автоматизации этой работы, но результаты такой разметки, как правило, требуют экспертной верификации ввиду недостаточного уровня доверия к ним. Другие аспекты качества данных также могут создавать проблемы. Это относится, например, к наличию пропущенных значений, выбросов, помех, отсутствие представительности и др. По этим причинам нужно искать и другие источники данных. Среди них важную роль играют математические модели группового поведения объектов соперника.

Математические модели группового поведения объектов соперника. Математические модели группового поведения, как и любые другие модели, строят на основе экспертных знаний. Обычно применительно к рассматриваемому классу задач в области безопасности эти знания требуют усилий математиков, социологов, менеджеров, программистов и специалистов в области математического моделирования, по меньшей мере. В настоящее время признано, что математические модели как средство генерации обучающих данных для решения задач машинного обучения могут играть ключевую роль. В ИИ математические модели получили специальное название – *цифровые двойники*. В нашем случае объектом моделирования является групповое поведение объектов соперника ***A***.

Цифровой двойник группового поведения объектов соперника одним из важных, если не самым важным источником данных, причем для решения обеих задач, а именно для оперативного принятия решений о намерениях соперника в текущем цикле Бойда и для генерации обучающей выборки задачи машинного обучения системы распознавания намерений соперника. Случаи ис-

пользования цифрового двойника группового поведения объектов системы ***A***, его концептуальная структура, формальная модель группового поведения в контексте задач распознавания намерений и предсказания его группового поведения описываются в следующем разделе.

Экспертные знания. В настоящее время с задачами рассматриваемого класса обычно работают эксперты. Они имеют обширные знания в предметной области приложения и обладают богатым опытом практического решения конкретных зада, в частности, знают особенности поведения соперника, типовые сценарии поведения его объектов при различных намерениях и состояниях внешней среды. Их знания включают индикаторы (комбинации признаков, паттерны поведения соперника, тенденции в их динамике) и экспертные правила принятия решений на основе этих индикаторов. Эти знания должны использовать в той или иной форме при построении алгоритмов и систем распознавания намерений в нескольких целях. Первая цель – это построение *онтологии* приложения, важнейшей компоненты базы знаний в системах ИИ. Онтология представляет знания системы ***B*** (1) об организационной структуре системы ***A***, о составе, структурах и атрибутах её компонент $A_1, ..., ,A_n$; (2) о типовых классах состояний этих объектов и их атрибутах; (3) о множестве вариантов намерений системы ***A*** и об уровне угрозы, которую каждое намерение может представлять для системы ***B***; (4) о множестве целевых классов состояний системы ***A*** в зависимости от реализуемых намерений и, возможно, (5) о классах сценариев группового поведения объектов $A_1, ..., ,A_n$, которые используются системой ***A*** для достижения целевых состояний, определяемых её намерениями. Онтология является важной компонентой знаний, которые могут включать знания экспертов и знания из семантического веба.

Вторая цель использования экспертных знаний – это формирование правил принятия решений в коопераций с правилами, которые могут быть получены методами машинного обучения. И в этом контексте важными являются два аспекта. Первый – это стратегия работы экспертов с множеством альтернатив возможных решений. Обычно эксперты на основе поступающей информации выдвигают несколько альтернатив для намерений соперника и его целевых состояний и пытаются найти для них аргументы за и против, отвергая альтернативы, несовместимые с получаемой информацией. В целом, этот подход экспертов, работает. Именно он намечен в Программе AIDA уже в самом ее названии «Активная интерпретация разнообразных альтернатив». Такой подход вполне модно перевести на язык алгоритмов и программ, и он должен хорошо работать и в автоматическом варианте. Второй важный аспект экспертных знаний, который целесообразно использовать при создании механизмов принятия решений, касается структур признаков, которые используют эксперты в своей практической работе. Обычно с точки зрения экспертов наиболее важная информация для принятия решений в моделях группового поведения – это последовательности действий различных объектов (их и называют паттернами поведения), а также информация о параллельно исполняемых множествах действий. Эта информация является очень ценной, поскольку она подсказывает разработчику структуры признаков, подлежащих поиску в множестве обучающих данных о групповом поведении в зависимости от его целевых состояний, и это знание существенно облегчает задачу *инжиниринга признаков* для машинного обучения. Далее это утверждение иллюстрируется практическими примерами.

Алгоритм распознавания намерений и предсказания класса целевого состояния соперника. Рассмотрим алгоритмы решения задачи предсказания намерений соперника ***A*** для каждой из двух вариантах её постановки, сформулированных в разд. 3, и покажем важную роль цифрового двойника группового поведения соперника в обоих вариантах.

Постановка задачи 1: Предсказание целевого состояния группового поведения соперника. Из анализа источников экспертных знаний, приведенного выше, следует, что эксперты могут предложить варианты структур признаков и паттернов поведения, по значениям которых в текущем цикле Бойда система ***B*** сможет формировать решающие правила по предсказанию намерений соперника и оценки их угрозы для себя и вырабатывать рекомендации по мерам противодействия. Опишем содержательно общую идею алгоритма, реализующего этот подход, и уточним в нем роль математической модели соперника ***A.***

В рассматриваемой постановке задаче полагается, что объекты $A_1, ..., ,A_n$ реализуют групповое поведение в соответствии со сценарием, который неизвестен системе ***B***. Эксперты тоже не знают этого сценария. На рис. 7 он представлен графом (слева), задающим частичный порядок

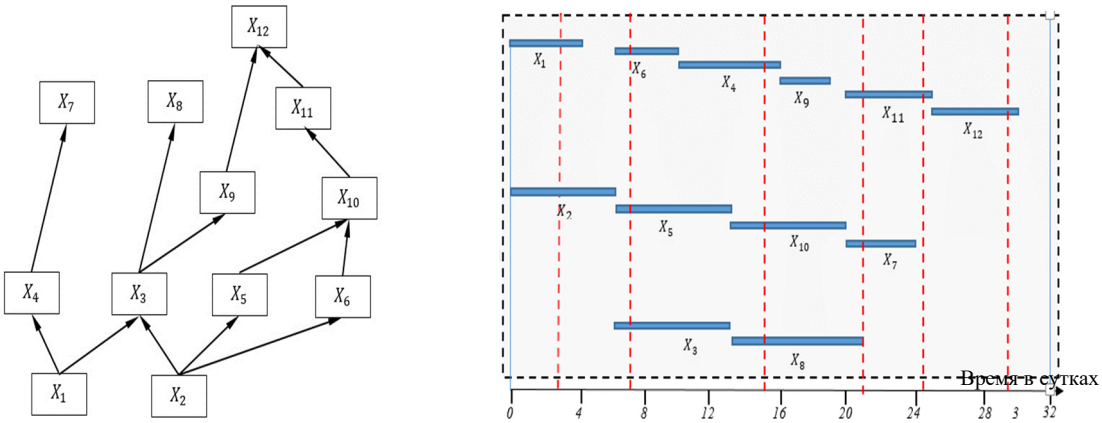


Рис. 7. Сценарий реализации намерения системы *A*, в форме графа (слева) и диаграммы Ганта (справа). Красными линиями отмечены моменты времени, к которым относятся сообщения о состоянии и поведении системы *A*, получаемые системой *B*

на множестве действий, выполняемых объектами $A_1, ..., ,A_n$. На временной шкале тот же сценарий (при номинальных значениях продолжительности действий сценария) представлен базовой диаграммой Ганта (справа). Пусть информация, получаемая и обрабатываемая системой ***B*** в последовательных циклах Бойда**,** относятся к моментам времени, отмеченным на диаграмме Ганта вертикальными линиями**.** В эти моменты входная информация может содержать различные сведения об объектах $A_1, ..., ,A_n$ и о выполняемых ими действиях, в том числе о том, что некоторые действия выполняются объектами этот множества параллельно, Например, из рис. 7 можно видеть, что группы объектов $\{A_1\ A_2\}$, $\{A_3, A_5\ ,\ A_6\}$, $\{A_4, A_8, A_{10}\}$ и $\{A_7\ A_{11}\}$ на некоторых интервалах времени выполняют свои действия X_1 и X_2 , X_3, X_5 и X_6 , X_4, X_8 и X_{10}, а также X_7 и X_{11} параллельно. Эксперты на основе опыта могут также установить и последовательности действий, которые повторяются в разных реализациях соответствующего класса сценариев для некоторого намерения. Например, они в случае использования сценария рис. 7 могут наблюдать паттерны поведения $< X_1\ X_3 >$, $< X_1\ X_3\ X_8 >$, $< X_5\ X_{10}\ X_{11} >$, $< X_6\ X_{10} >$. На графе сценария они представлены явно, и хотя этот граф системе ***B*** неизвестен, эти паттерны могут быть обнаружены экспертами из опыта своей работы.

Однако, для того, чтобы эти характерные признаки и паттерны поведения обнаружить с помощью методов машинного обучения, нужно иметь представительную выборку обучающих данных, в которой *представлено именно поведение* объектов системы ***A***. В реальной практике для задач указанного класса, однако, накопить адекватную выборку обучающих данных, как правило, не представляется возможным. Для представительной выборки, в которой ее объем «сбалнсирован№ с размерностью пространства признаков, должно выполняться соотношение *n>m×log(m)*, где *n* – число примеров выборки, а *m* – размерносить пространства признаков. Если иметь в виду, что поведение соперника, который может состоять из сотен объектов и более может описываться тысячами признаков и паттенов поведения, то нереально надеяться, что имеющаяся выборка примеров будет для каких-то приложений описываемого класса удовлетворять этим требованиям. Можно с высокой долей уверенности утверждать, что реально доступные выборки обучающих данных будут относиться к классу малых данных. Поэтому в них высока роль экспертных знаний, о которых шла речь выше, но не только таких экспертных знаний.

Ситуацию можно кардинально *изменить к лучшему*, если построить *математическую модель группового (сценарного) поведения* объектов системы ***A***, зависящую от её намерений, и это можно реально сделать опираясь на знания экспертов, сообщества математиков и специалистов в предметной области. Такую модель можно использовать в качестве генератора размеченной выборки данных для каждого класса намерений системы ***A.*** Каждый пример такой выборки будет представлять собой множество *траекторий совместного поведения* объектов $A_1, ..., ,A_n$ с их привязкой к общему времени. Рис. 5 иллюстрирует понятие траектории совместного поведения. Такая выборка траекторий будет содержать информацию о групповом поведении объектов системы ***A*** и о временных закономерностях их поведения, что необходимо для решения задач предсказания. Поэтому её можно использовать как выборку для машинного обучения классификатора

предсказываемых целевых состояний системы $\boldsymbol{A}$ с распределением вероятностей на множестве их альтернатив. Этот классификатор позволит системе $\boldsymbol{B}$ для каждого онлайн-входа (множества наблюдаемых траекторий поведения объектов $A_1, \ldots, A_n$) строить текущее распределение вероятностей на множестве альтернатив намерений соперника и оценивать степень их угрозы.

Постановка задачи 2: Распознавание класса сценариев поведения. В постановке задачи 1 сценарий группового поведения объектов $A_1, \ldots, A_n$ в зависимости от намерений системы $\boldsymbol{A}$ не является предметом классификации для системы $\boldsymbol{B}$, и она «не знает» что-либо об этих сценариях и их классах. В отличие от этого, в постановке задачи 2 система $\boldsymbol{B}$ «знает» множество классов сценариев $\boldsymbol{S}(I_p, I_q)$ группового поведения объектов соперника для всех переходов $\boldsymbol{V} = \{V_{p,q}\}$ графа переходов $\boldsymbol{G}$ и использует это знание в задаче классификации их текущих реализаций.

Идея алгоритма распознавания класса сценариев поведения соперника $\boldsymbol{A}$ в реальном времени, а значит, и его намерения состоит в том, что задачи 1 и 2 решаются параллельно, а решение формируется на основе слияния полученных решений для постановок задачи 1 и 2. В этом случае предварительно с помощью математической модели группового поведения объектов системы $\boldsymbol{A}$ генерируются обучающие выборки траекторий поведения её объектов $A_1, \ldots, A_n$, размеченные именами классов целевых состояний (для задачи 1) и именами классов сценариев (для задачи 2). После обучения соответствующих классификаторов система $\boldsymbol{B}$ будет готова к работе.

Общая структура системы принятия решений, включающая процедуры машинного обучения обоих классификаторов и предсказание намерений системы $\boldsymbol{A}$, использует модель Бойда (рис. 6), в которую добавлен контур с цифровым двойником группового поведения системы $\boldsymbol{A}$ (рис. 8). Этот контур решает две задачи. Первая – генерация обучающих выборок, пополняющих имеющееся множество примеров, если таковое имеется. Машинное обучение проводится офлайн на этапе подготовки системы предсказания намерений к работе, но может использоваться и для модификации классификаторов по мере накопления новых примеров. Результаты машинного обучения используются в блоке «Оценка и прогнозирование» цикла Бойда (рис. 8).

Вторая задача – это прогнозирование траекторий поведения объектов $A_1, \ldots, A_n$ в задаче предсказания намерений. Соответствующий итеративный алгоритм кратко поясняется ниже.

Начальные данные для s–го цикла Бойда – результаты $(s-1)$-го цикла:

1. $\widehat{\boldsymbol{X}}^{(i)}(s-1)$, $i \in \{i_1, \ldots, i_k\}$ – множество альтернатив классов целевых состояний, которые остаются актуальными после $(s-1)$-го цикла;
2. $\widehat{\boldsymbol{I}}(s-1) = \{I_{i_1}, \ldots, I_{i_k}\}$ – аналогичное множества альтернатив намерений системы $\boldsymbol{A}$;
3. $\boldsymbol{P}(\widehat{\boldsymbol{I}}(s-1)) = \{p(I_{i_1}), \ldots, p(I_{i_k})\}$ – распределение вероятностей альтернатив на множестве намерений, построенное на шаге $(s-1)$;
4. $\widehat{\boldsymbol{S}}(s-1) = \{\boldsymbol{S}(I_p, I_q)\}|_{p,q}, p, q \in \{i_1, \ldots, i_k\}, q \neq p$ – текущее множество альтернатив для класса исполняемого сценария;
5. $\widetilde{\boldsymbol{X}}(s) = \{\widetilde{X}_1(s), \ldots, \widetilde{X}_n(s)\},\}$ – состояния объектов $A_1, \ldots, A_n$ в s –ом цикле Бойда, предсказанные в $(s-1)$-ом цикле с помощью цифрового двойника для всех $S \in \widehat{\boldsymbol{S}}(s-1)$.

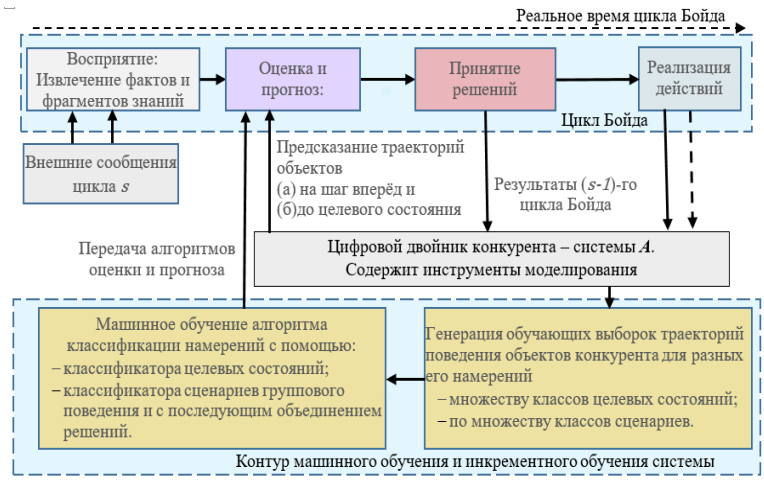


Рис. 8. Цикл Бойда с контуром машинного обучения

Алгоритм на произвольном шаге s

1. Блок *Оценка и прогноз* получает факты из входных данных, Источник – блок *Восприятие*.

2. Обновляется прогноз $(s-1)$-ого цикла для текущих состояний объектов $\widetilde{\boldsymbol{X}}(s)$, используя входные факты, результат – $\widetilde{\boldsymbol{X}}(s+1)$.

3. Прогнозируется целевые состояния для каждой альтернативы $I \in \widehat{\boldsymbol{I}}(s-1)$ текущего множества альтернатив сценариев, стартуя из состояния $\widehat{\boldsymbol{X}}^{(i)}(s+1)$.

4. Выполняет классификацию целевых состояний и сценариев с помощью алгоритмов, полученных методами машинного обучения, и строит новое распределение $\boldsymbol{P}(\tilde{\boldsymbol{I}}(s)) = \{p(I_{i_1}), \dots, p(I_{i_k})\}$ для s–го цикла Бойда.

5. Обновляет s-ое множество актуальных альтернатив для намерений, применяя пороговый алгоритм для вероятностей $\boldsymbol{P}(\tilde{\boldsymbol{I}}(s)) = \{p(I_{i_1}), \dots, p(I_{i_k})\}$, и обновляет множества $\tilde{\boldsymbol{X}}(s-1)$ и $\tilde{\boldsymbol{S}}(s-1)$ до $\tilde{\boldsymbol{X}}(s)$ и $\tilde{\boldsymbol{S}}(s)$.

6. Выполняет с помощью цифрового двойника уточненный прогноз начального условия $\tilde{\boldsymbol{X}}^{(i)}(s+1) = \left\{\tilde{X}_1^{(i)}(s+1), \dots, \tilde{X}_n^{(i)}(s+1)\right\}, i \in \{i_1, \dots, i_k\}$, стартуя из состояний $\tilde{\boldsymbol{X}}^{(i)}(s) = \left\{\tilde{X}_1^{(i)}(s), \dots, \tilde{X}_n^{(i)}(s)\right\}, i \in \{i_1, \dots, i_k\}$, для всех текущих альтернатив классов сценариев.

7. $s = s + 1$ Переход к п. 1, т.е. к выполнению следующего цикла Бойда.

На рис. 8 показана связь этого алгоритма с процедурами, предусмотренными циклом Бойда.

Заключение. Основные проблемы задачи предсказания намерений конкурента обусловлены дефицитом онлайн-информации о его текущем поведении, а также дефицитом знаний о его поведении. Другие факторы сложности – это слабая зрелость методов машинного обучения в поведенческих моделях ИИ и отсутствие представительных обучающих данных.

Использование цифрового двойника группового поведения конкурента для генерации и обогащения выборки, а также для прогнозирования траекторий объектов конкурента позволяют свести задачу предсказания его намерений к решению двух задач машинного обучения и классификации с последующим объединением их решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Евстафьев Д.Г., Манойло А.В.** Гибридные войны в контексте постглобализации. //Контуры глобальных трансформаций: политика, экономика, право, Т.14, № 4, 2021, С. 160 – 175.
2. **Саати Т.Л.** Математические модели конфликтных ситуаций. М.: Сов. радио, 1977. 300 с. (Saaty T.L. Mathematical models of arms control and disarmament: application of mathematical structures in politics, New York: Wiley, 190 pp.)
3. **Городецкий В.И.** Теория, модели, инфраструктуры и языки спецификации командного поведения автономных агентов: Обзор, Часть 1. //Искусственный интеллект и принятие решений, 2011, №2, С. 19 – 30. Часть 2. //Искусственный интеллект и принятие решений, 2011, №3, С. 34 – 47.
4. Broad Agency Announcement “Active Interpretation of Disparate Alternatives” (AIDA). URL https://www.nas.gov.ua/text/EuropeanIntegration/HR001117S0026%20(AIDA).pdf (доступ 20.07.2022).
5. **В.И. Городецкий, И.В. Котенко.** Концептуальные основы стохастического моделирования конкуренции в среде Интернет. // Труды института системного анализа РАН. Т. 9: Фундаментальные основы информационных технологий и систем. Под ред. С.В.Емельянова. М.: URSS, 2005.
6. **Gorodetski Vladimir, Kotenko Igor, Karsaev Oleg**. Multi-agent technologies for computer network security: Attack simulation, intrusion detection and intrusion detection learning. International Journal of Computer System Science & Engineering № 4, P. 191–200, CRL Publishing Ltd, 2003.
7. **GorodetskyV. and Panteleev M.** Networks of Autonomous Real-Time Agents in Environments with Counteraction: Features and Components of the Model. Journal of Physics Conference Series 1864(1):012079, May 2021.
8. **Городецкий В.И., Пантелеев М.Г.** Сети автономных агентов реального времени в среде с противодействием: Особенности и компоненты модели. Труды 13-ой Мультиконференции по проблемам управления. Санкт-Петербург, 6 - 8 октября 2020, стр. 22 - 31
9. **Городецкий В.И**. Принципы автономного группового управления. Труды X международной научно-практической конференции «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте», (ИММВ-2021, 17-20 мая 2021 г., Коломна, Том 1, стр. 16 – 48.
10. **Gorodetsky V.** Multi-agent Autonomous Group Control in Collective Robotics-Based Assembly. In CEUR-WS.org vol. 1, 2648/paper.pdf “Russian Advances in Artificial Intelligence: selected contributions to the Russian Conference on Artificial intelligence (RCAI 2020), October 10-16, 2020, Russia.
11. **Городецкий В.И.** Поведенческие модели кибер-физических систем и групповое управление: основные понятия // Известия ЮФУ. Технические науки. № 1. 2019. С. 133-152.
12. **Городецкий В.И.** Самоорганизующиеся сети агентов – базовая модель группового и кооперативного поведения автономных объектов. Сборник трудов Всероссийской конференции Искусственный интеллект: Проблемы и решения, 14-16 марта, 2018 г., Москва.
13. **Brooks R.A.** Intelligence without Reasoning // Proceedings of International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'91). 1991, vol. 1, P. 569–595.
14. **Matarić M.J., Michaud F.** Behavior-Based Systems. In: Siciliano B., Khatib O. (Eds.) Springer Handbook of Robotics. Springer, Berlin, Heidelberg. 2008.
15. OODA loop/ https://en.wikipedia.org/wiki/OODA_loop (доступ 15.07.2022)

Приложение. Базовые понятия поведенческой модели ИИ. В постановке задачи работы и в описании модели группового поведения объектов и алгоритма распознавании намерений соперника используется терминология, приводимая ниже.

Намерение системы – преимущество или качество другого рода, которое стремится получить система в результате исполнения миссии. Намерение является неформальным понятием, смысл которого формулируется на естественном языке в контексте предметной области приложения. Примером намерения может быть получение конкурентного преимущества в бизнесе, смена власти в результате цветной революции, получение доступа к коммерческой информации при атаке команды хакеров и т.п.

Состояние системы/объекта – время, место и список значений других атрибутов системы/объекта в конкретный момент времени. Среди возможных состояний системы/объекта имеется множество *выделенных состояний*, которые называют *начальными* и/или *конечными.* Множества начальных и конечных (целевых) состояний факторизуются в *классы начальных* и *классы конечных* (целевых) состояний (рис. 3).

Класс целевых состояний системы/объекта – множество возможных состояний системы/объекта, достижение которых система отождествляет с реализацией того или иного намерения.

Допустимый переход системы/объекта – смена состояния системы/объекта, при которой система/объект, находившаяся в некотором начальном состоянии, переходит в некоторое допустимое конечное состояние. Переход выполняется за конечное время, которое в каждой реализации допустимого перехода является случайной величиной с известным распределением.

Траектория допустимого перехода системы/объекта – многомерная функция значений ее атрибутов в зависимости от времени процесса перехода из заданного ее начального состояния в конечное состояние.

Класс допустимых траекторий перехода системы/объекта – фактор-множество траекторий допустимых переходов для пары классов начальных и конечных (целевых) состояний.

Цель системы/объекта – класс целевых состояний, который она стремится достигнуть для реализации своего намерения. Например, при намерении добиться конкурентного преимущества целью, которая позволит этого достигнуть, может быть, снижение стоимости производимого продукта или/и повышение его потребительских качеств при сохранении стоимости. В цветной революции целью может быть добиться *добровольного* сложения полномочий легитимным правительством. Цели объектов системы, являются компонентами дерева целей системы в целом.

Сценарий (миссии, группового поведения) системы– структурированная последовательность действий объектов системы, которое переводит систему из начального состояния некоторого класса в целевое состояние заданного класса. Сценарий есть множество действий, структурированных в пространстве и времени, выполняемых объектами группы в процессе перехода.

Класс сценариев (группового поведения) системы – множество сценариев *(миссии, группового поведения)*, которые реализуют переход системы/объекта из любого начального состояния заданного класса в некоторое конечное (целевое) состояние другого, но одного и того же класса.

Индивидуальное поведение объекта – последовательность задач (действий), которые он решает (выполняет) в составе группы в сценарии миссии/группового поведения.

Паттерн поведения –последовательность действий объекта/системы.

Групповое поведение – множество паттернов поведения объектов группы, структурированное в пространстве и во времени, которое выполняется в интересах достижения общей цели группы.

Групповое управление – управление целями и паттернами поведения (координация целей и паттернов поведения) объектов группы, направленное на достижение групповой цели.

V.I. Gorodetsky (EURECA LLC, St. Petersburg). **Prediction of intention and group behavior of an opponent.**

The paper considers one of the key tasks of the problem of antagonistic behavior of two complex systems in a common environment that is online prediction the intentions of the opponent to evaluate the threat it can carry in order to plan own actions ahead of time. The novelty of the proposed approach is that it uses the concept of a digital twin of the opponent's group behavior. The latter is involved both at the stage of machine learning of the system for predicting the opponent's intentions, and at the decision-making stage. The methodological novelty of the approach lies in the use of a scenario model of the opponent’s group behavior as a means of structuring the group behavior of distributed objects that form an opponent’s system.