

**110 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ
АКАДЕМИКА А. Ю. ИШЛИНСКОГО**

**Сборник статей
под общей редакцией профессора М. Р. Либерзона**

Санкт-Петербург
Медиапапир
2023

УДК 621.01:531.8

ББК 34.41

С81

Общая редакция:

Либерзон Марк Романович, доктор физико-математических наук,
профессор, Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет), г. Москва

Верстка и коррективировка:

Жуков Иван Алексеевич, доктор технических наук, доцент, заведующий
кафедрой машиностроения Санкт-Петербургского горного университета
императрицы Екатерины II; директор Научно-исследовательского
центра «МашиноСтроение», г. Санкт-Петербург

110 лет со дня рождения академика А. Ю. Ишлинского: Сборник статей /
под общ. ред. проф. М. Р. Либерзона. — СПб.: Медиапайр, 2023. — 150 с.

Сборник содержит материалы, посвященные жизни и деятельности
академика А. Ю. Ишлинского, а также статьи, посвященные передовым
научным достижениям в области механики.

Материалы могут быть полезными для научных и инженерно-техниче-
ских работников, докторантов, аспирантов и студентов механико-маши-
ностроительного профиля.

Сборник представляет собой 1-й этап Программы, посвященной
110-летию со дня рождения академика А. Ю. Ишлинского. Программа
осуществляется при поддержке ПАО АФК «Система».

Подписано в печать 18.08.2023. Формат 60×84/16. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 9,38. Тираж 1000. Заказ 148.

Выпущено ООО «Медиапайр»

с готового оригинал-макета, предоставленного заказчиком
194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 28, литера А,
помещ. 3-н, ком. 184, 185, 188, 192, 193, 194. Тел.: (812) 987-75-26
mediapapir@gmail.com www.mediapapir.com www.mediapapir.ru

ISBN 978-5-00110-372-1

© МФП МГАТУ, 2023

© Медиапайр, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

<i>От редактора</i>	5
Садовничий В.А. Александр Юльевич Ишлинский.....	6
Климов Д.М., Черноусько Ф.Л., Журавлев В.Ф., Горячева И.Г. Академик А.Ю. Ишлинский – выдающийся ученый-механик.....	11
Гуляев Ю.В., Друкaренко С.П. Академик А.Ю. Ишлинский – выдающийся организатор инженерного дела и науки, активный общественный деятель....	15
Гусев Б.В., Саурин В.В. Ещё раз об Александре Юльевиче Ишлинском	36
Самсонов В.А. Научно-методический совет по теоретической механике – детище А.Ю. Ишлинского	47
Либерзон М.Р. Александр Юльевич Ишлинский	49
Горячева И.Г. Исследования А.Ю. Ишлинского в области трения качения и их развитие	55
Александров В.В., Лемак С.С., Тихонова К.В., Шуленина Н.Э. Динамическая имитация перегрузки при подъёме на орбиту и гальваническая коррекция визуального управления в открытом космосе	64
Морозов В.М., Каленова В.И. Об одной классической работе А.Ю. Ишлинского.....	69
Досаев М.З. Особенности равновесия тела на телескопической упругой опоре ..	72
Локшин Б.Я., Самсонов В.А. Об одной задаче внешней баллистики	76
Старовойтов Э.И., Леоненко Д.В. Деформирование трехслойной круговой пластины локальными нагрузками в температурном поле	78
Лемак С.С. Формирование позиционных стратегий тестирования качества управления динамическими объектами	90
Кобрин А.И. Необходимость демонстрации в курсе теоретической механики ее современных методов и технологий	97
Болотин Ю.В., Вязьмин В.С., Голован А.А. Путь от скалярной к векторной аэрогравиметрии	105
Чечкин А.В. Техносфера искусственного интеллекта	118

Магомедов М.Х., Громов А.Е. Использование серийного шагового двигателя в системах цифрового ударного гравирования	126
Либерзон М.Р. Новые технологии разведки углеводородов	131
Арутюнов Ю.А., Чашин Е.А. Создание современных технологий экспресс-диагностики патологий миокарда	134
Селюцкий Ю.Д., Климина Л.А. Об управлении трехзвенным роботом-змеей с помощью внутреннего маховика в случае анизотропного сухого трения..	141
Буданов В.М. Аналитическое приближение для ухота Магнуса.....	148

Уважаемый читатель!

Вы держите в руках Сборник, подготовленный к 110-й годовщине со дня рождения великого учёного-механика академика Александра Юльевича Ишлинского.

Естественно было бы в предисловии рассказать о жизни и деятельности Александра Юльевича, но здесь это излишне: в ряде статей Сборника представлена детальная информация об этом замечательном человеке, о его выдающихся научных достижениях, о его неординарном таланте педагога, об исключительно значимых результатах его деятельности как организатора научной работы и образования, об организациях и учреждениях, в которых он работал и зачастую непосредственно принимал участие в их создании, о редких человеческих качествах Александра Юльевича. Особую роль в этой связи играет Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова.

В 1931 году А.Ю. Ишлинский поступил в МГУ и с тех пор на протяжении более семидесяти лет его жизнь и деятельность были неразрывно связаны с Московским университетом. Вот что об этом сказал сам Александр Юльевич: «Московский университет мне бесконечно дорог. Профессора Московского университета указывали нам на необходимость учиться новому всю жизнь, и сами показывали прекрасный пример тому. Ни один из них никогда не гордился своей большой эрудицией, никогда не стеснялся заявить о случайном незнании какого-либо отдельного вопроса. Всеми силами я стремлюсь следовать примеру и указаниям своих учителей, ибо нахожу их глубоко правильными. Лично я в высшей степени обязан Московскому университету. Мне довелось учиться у первоклассных ученых, участвовать в научных семинарах, самому читать лекции, вести практические занятия, радоваться достижениям своих учеников. Дух университета – логическая последовательность рассуждений, тщательный анализ экспериментального материала, своеобразная точность формулировок и самого мышления всегда являются для меня направляющими факторами моей жизни и деятельности».

В Сборник включены статьи с научными результатами, некоторые из которых основаны на исследованиях А.Ю. Ишлинского, представляют продолжение и развитие этих исследований, решение им поставленных задач. Многие авторы являются учениками и последователями Александра Юльевича и свято чтут светлую память о своём Учителе.

Составители Сборника надеются, что он будет Вам интересен, уважаемый читатель.

М.Р. Либерзон

АЛЕКСАНДР ЮЛЬЕВИЧ ИШЛИНСКИЙ

Садовничий В.А.

Московский государственный университет им М.В. Ломоносова

Ключевые слова: Ишлинский А.Ю., механика, ученый-механик, люди Московского университета.

Аннотация. Статья содержит материалы, посвященные жизненным этапам и деятельности академика А.Ю. Ишлинского. Раскрывается тематика направлений научной работы Ишлинского, приводятся сведения об основных результатах его творческой деятельности.



Александр Юльевич Ишлинский – выдающийся ученый-механик XX века и замечательный педагог. Работая в области механики сплошной среды, динамики твердого тела, гироскопии и инерциальной навигации, он создал новые направления в тех разделах науки, которым посвятил свой талант ученого и инженера.

А.Ю. Ишлинский происходил из старинной дворянской семьи. Его отец был техником-механиком, начинал работу на железной дороге; во время Русско-японской войны служил на крейсере «Богатырь»; за участие в Кронштадтском восстании (1906) был лишен дворянского звания.

Со школьной скамьи он почувствовал в себе страсть к математике и технике. В 13 лет сделал свое первое научное открытие: это был оригинальный переключатель радиоприемника с длинных на короткие волны. В 1926 году газета «Новости радио» опубликовала его заметку «Штепсель для переключения на длинные и короткие волны». Так началась научная карьера будущего академика.

Отец умер, когда Александру Юльевичу было 19 лет. В это время он уже преподавал в Московском электромеханическом техникуме им. Л.Б. Красина,

заменя отсутствующих педагогов по математике и механике, и даже вел самостоятельный курс сопротивления материалов.

После семилетней школы и электротехнических курсов в 1931 году А.Ю. Ишлинский поступает сразу на второй курс Московского университета, сначала это был физико-математический факультет, потом, после разделения, – механико-математический.

Годы учебы определили всю дальнейшую жизнь и судьбу Александра Юльевича. Среди его учителей были Н.Н. Бухгольц, В.В. Голубев, М.А. Лаврентьев, А.П. Минаков, А.И. Некрасов, А.Я. Хинчин – блестящие представители профессуры Московского университета той поры.

Во время учебы один из будущих создателей отечественной космонавтики проходил производственную практику на авиационных заводах и в конструкторском бюро «Дирижаблестрой». Находил время и для общественной работы, спорта, играл на скрипке в студенческом оркестре.

Позднее он скажет: «Московский университет мне бесконечно дорог. Профессора Московского университета указывали нам на необходимость учиться новому всю жизнь, и сами показывали прекрасный пример тому. Ни один из них никогда не гордился большой эрудицией, никогда не стеснялся заявить о случайном незнании какого-либо отдельного вопроса. ...Лично я в высшей степени обязан Московскому университету. ...Дух университета – логическая последовательность рассуждений, тщательный анализ экспериментального материала, своеобразная точность формулировок и самого мышления всегда являются для меня направляющими факторами моей жизни и деятельности».

А.Ю. Ишлинский отдал Московскому университету 70 лет плодотворной научно-педагогической деятельности.

Помним мы и о том, что, уже работая в университете на кафедре упругости и не прекращая этой работы, он по приглашению М.А. Лаврентьева переезжает в Киев, где избирается академиком Украинской Академии наук и становится директором Института математики АН УССР (1948-1955).

В 1956 году по предложению И.Г. Петровского А.Ю. Ишлинский возглавляет кафедру прикладной механики, которой отдает почти полвека своей жизни.

В это же время он принимает активное участие в создании Института механики МГУ и становится его первым директором.

Параллельно с этим с 1965 года в течение 20 лет Ишлинский возглавлял Институт проблем механики АН СССР (сейчас институт носит его имя). Когда по возрасту он уже не смог занимать пост директора, «передал эстафету» своему ученику – Дмитрию Михайловичу Климову

Научные работы А.Ю. Ишлинского явились ключевыми для ряда направлений механики. К важнейшим относятся: построение моделей деформирования тела за пределами упругости; работы по теории пластической деформации в классической постановке; модель трения качения; исследования, связанные с проявлениями сил сухого трения; вопросы устойчивости деформирования упругих образцов и образцов, работающих за пределами

упругости; теория гироскопических систем; теория инерциальной навигации; исследование движения твердого тела, подвешенного на струне.

Важная особенность научного творчества А.Ю. Ишлинского – свойственное Московской инженерно-механической школе Н.Е. Жуковского сочетание теоретической фундаментальности с инженерной интуицией, позволяющее искусно решать сложные прикладные задачи и выявлять новые эффекты с использованием ограниченных математических средств.

Начало научной деятельности А.Ю. Ишлинского связано с задачами механики твердого деформируемого тела. В 1938 году он защитил кандидатскую диссертацию «Трение качения» (о движении катка по релаксирующему и вязкопластическому грунту). А уже во время войны, в 1943 году, он защитил докторскую диссертацию «Механика не вполне упругих и вязкопластических тел».

И работал Ишлинский в это время на кафедре теории упругости.

На его исследования в этой области, в частности, повлияли эксперименты, которые вел М.А. Лаврентьев, изучая воздействие взрывных нагрузок на деформируемые тела.

В 1940-е годы начались исследования А.Ю. Ишлинского по теории гироскопов.

Эта тема тогда была очень актуальна. Например, в Германии к работе по созданию гироскопов были привлечены лучшие ученые, включая А. Эйнштейна. Александр Юльевич с гордостью рассказывал, что не им, а ему удалось создать точную теорию пространственного гироскопа и двухгироскопической вертикали.

При непосредственном участии Ишлинского было разработано большинство отечественных гироскопических приборов и систем. Он был крупнейшим специалистом страны в этой области.

Его первые работы по теории гироскопов были посвящены изучению геометрии и кинематики кардановых подвесов, в которых устанавливаются практически все гироскопические приборы и устройства.

Для определения ошибок стабилизации и погрешностей в определении угловых координат удаленных объектов он применил аналитический метод исследования и получил ряд точных результатов механики конечных вращений. Ему принадлежит классическая теорема о так называемом накоплении телесного угла («угла Ишлинского»), которая позволяет рассчитывать точность стабилизации различного рода объектов.

Этот эффект, выявленный Ишлинским, оказался важным для разных областей физико-математического знания: в механике так называемых гироскопических систем, в поляризационной оптике, в специальной теории относительности. Его теперь называют эффектом присутствия «топологической фазы» («топологического угла»). Этот эффект тесно связан с параллельным переносом вектора в римановой геометрии. Это – удивительный пример того, как привычные системы в евклидовом пространстве демонстрируют свойства риманового пространства.

Ишлинский исследовал причины, влияющие на точность гироскопических приборов: жесткость конструкций, влияние трения и вибраций. Он создал теорию новых гироскопических приборов, например, гировертикали на воздушном подвесе, гироскопа направления и др. Им впервые была построена теория гиромаятника и гироскопа направления при их движении по земной сфере.

Летом 1955 года он принял участие в экспедиции к Земле Франца-Иосифа для проверки работы навигационных приборов в северных широтах.

В ряде своих работ Ишлинский получил условия, налагаемые на параметры гироскопических систем и начальные условия их движения, обеспечивающие независимость девиации гироскопических устройств от ускорения маневрирования объектов, на которых эти устройства установлены. Развитием работ Ишлинского по теории гироскопов стало исследование систем инерциальной навигации.

Исследования А. Ю. Ишлинского позволили создать теорию управления баллистическими ракетами. Он нашел красивое решение задачи об определении точного времени отсечки (момента выключения двигателя) так, чтобы дальнейшее неуправляемое (баллистическое) движение ракеты позволило бы ей достигнуть цели.

В самом начале ракетной эры (40-е годы XX века) А.Ю. Ишлинский разработал математическую теорию автомата, задающего дальность полета баллистической ракеты. Эта работа носила принципиальный характер, поскольку не только решала важную оборонную задачу, но и обогащала теорию управления подвижными объектами принципиально новой идеей: цель может быть достигнута не обязательно при движении по программной траектории, а и по бесконечному множеству других, в определенном смысле соседних траекторий.

С 1950-х годов начинается активное участие А.Ю. Ишлинского в ракетно-космических программах нашей страны, проводившихся под общим инженерным руководством С.П. Королева. Александр Юльевич принимал участие в работах Государственной комиссии при подготовке и проведении большинства летных испытаний ракет и первых запусков искусственных спутников Земли и других космических аппаратов с космодрома Байконур.

Александр Юльевич чудом уцелел в октябре 1960 года на космодроме Байконур при подготовке к первому пуску межконтинентальной баллистической ракеты «Р-16», когда произошло самопроизвольное включение второй ступени, а вслед за этим взрыв и гигантский пожар, из-за чего погибли более 100 человек.

А.Ю. Ишлинский – глубокий историк механики. Говоря о значении механики, Ишлинский подчеркивал, что многие важнейшие открытия в истории человечества были сделаны именно в ходе решения механических задач. Так, обнаружение Кеплером явления движения планет по эллиптическим орбитам привело к открытию закона всемирного тяготения. Открытие Резерфордом структуры атома было сделано при анализе движения заряженной частицы в поле ядра атома. В теории оптимального управления, создание которой стало крупным успехом науки XX века, существенно использовались идеи аналитической механики. Воздействие этих идей оказало значительное влияние на становление современных термодинамики, электродинамики, квантовой теории поля.

Принципы и методы теоретической механики, ее расчетные алгоритмы широко проникли во все области техники, в биологию и медицину.

А.Ю. Ишлинский придавал большое значение развитию высшего технического инженерного образования в стране. При этом он всегда подчеркивал и отстаивал исключительную роль теоретической механики как базовой фундаментальной дисциплины, борясь с попытками сократить ее преподавание или даже вовсе исключить из вузовских программ как самостоятельную дисциплину.

Интересны педагогические приемы Иншинского. Он считал, что лучше решить одну и ту же задачу на различных моделях, например, без трения, с сухим трением, с вязким трением, а не три разных задачи одним методом. Его аспиранты перепроверяли результаты друг друга, перед тем как представлять их в научные издания.

А.Ю. Ишлинский высоко ценил инженерное дело. С 1971 года был вице-президентом (в 1987-1991 гг. – президентом) исполкома Всемирной федерации инженерных обществ. В 1990 году вместе с академиком Г.А. Николаевым он создал Инженерную академию.

А.Ю. Ишлинский остался в нашей памяти не только своим мощным интеллектом и поразительной научной интуицией. Его отличали корректность и доброжелательность, высокая требовательность к себе.

Его оценка событий и людей была трезвой и взвешенной. Он так определил свое место и отношение к жизни: «Ученый – не политик, он должен заниматься своими делами и на окружающий мир влиять в основном с помощью открытых им законов природы. Тогда меньше претензий к обществу, больше – к самому себе».

АКАДЕМИК А.Ю. ИШЛИНСКИЙ – ВЫДАЮЩИЙСЯ УЧЕНЫЙ-МЕХАНИК

*Климов Д.М., Черноусько Ф.Л., Журавлев В.Ф., Горячева И.Г.
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН*

Ключевые слова: академик А.Ю. Ишлинский, этапы жизни и научной деятельности, общая механика, теория автоматического управления, инерциальные системы.

Аннотация. В статье освещаются основные этапы жизни и научной деятельности великого советского и российского ученого-механика, специалиста в различных областях механики академика А.Ю. Ишлинского. Прекрасный организатор науки Александр Юльевич Ишлинский сыграл определяющую роль в создании Института проблем механики Академии наук СССР, много лет проработав его директором, который с 2008 г. носит его имя – Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН. Благодаря его умелому руководству, Институт стал крупнейшим научным центром нашей страны в области механики.

Великий советский и российский ученый, специалист в области общей механики, теории гироскопов, теории автономного управления и инерциальных систем, механики деформируемого твердого тела и математической физики, организатор науки и педагог Александр Юльевич Ишлинский родился 6 августа 1913 года в Москве. С ранних школьных лет он проявлял интерес к науке и исследованиям. Он увлекался математикой, физикой, химией, электротехникой, фотографией и радиотехникой, а его первая научная заметка об оригинальном переключателе радиоприемника на длинные и короткие волны была опубликована в газете «Новости радио» уже в 1926 г. После семилетней школы он поступает в Московский электромеханический техникум им. Л.Б. Красина, где, после его окончания, продолжает заведовать кабинетом технического черчения, заменять временно отсутствующих педагогов, преподавать теоретическую механику, физику, сопротивление материалов. Благодаря своей целеустремленности уже в 1931 г. Александр Юльевич поступает на механико-математический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова сразу на второй курс, где ему посчастливилось слушать лекции выдающихся педагогов и ученых. В университете А.Ю. Ишлинский много занимался общественной работой, находил время для спорта и играл на скрипке в студенческом оркестре. Дипломную работу «Задача об эластике» он писал под руководством большого знатока теории упругости и сопротивления материалов М.М. Филоненко-Бородича. В 1935 г., после получения высшего образования, А.Ю. Ишлинский был принят в аспирантуру, по окончании которой в 1938 г. защитил кандидатскую диссертационную работу «Трение качения», посвященную изучению движения абсолютно жесткого катка по релаксирующему и упруговязкому грунтам, и продолжил работать в университете в качестве доцента кафедры теории упругости.

С 1940 г. Александр Юльевич начинает работать в области гироскопической техники, вначале применительно к проблемам судостроения. Знакомство с замечательным ученым академиком А.Н. Крыловым и тесная дружба с выдающимся инженером Н.Н. Остряковым сыграли важную роль в развитии исследовательского дара и способствовали приобретению обширных

инженерных знаний в области гироскопической техники, следящих и навигационных систем, а также в ряде других вопросов точного приборостроения. Вместе с тем, основное место в его публикациях в этот период продолжают занимать задачи механики вязкопластических и не вполне упругих тел. По данной проблеме в 1943 г. он защищает докторскую диссертацию и вскоре после защиты избирается профессором кафедры теории упругости МГУ.

В 1945 г. А.Ю. Ишлинский поступил на работу в Институт механики Академии наук СССР, где занимался вопросами теории пластичности и общей механики. В 1947 г. по приглашению вице-президента Академии наук Украинской ССР академика М.А. Лаврентьева он начинает работать в Киеве в Институте математики Академии наук УССР, который он возглавил в 1948 г. Под руководством А.Ю. Ишлинского получили широкое развитие исследования по математической физике, вычислительной математике, механике и ее приложениям в народном хозяйстве. Он создал новый отдел общей механики, в котором выполнялся ряд важных исследований по динамике твердого и деформируемого тела, теории гироскопов и систем инерциальной навигации. Работая в Киеве, А.Ю. Ишлинский продолжал свою деятельность и в Москве в приборостроительной промышленности (систематически приезжал для научных консультаций, руководства аспирантами и ведения семинаров).

Летом 1955 г. А.Ю. Ишлинский принял участие в морской экспедиции в район Земли Франца-Иосифа с целью изучения работы в условиях высоких широт новых отечественных навигационных приборов. В 1956 г., ректор Московского университета академик И.Г. Петровский приглашает его заведовать кафедрой прикладной механики механико-математического факультета. В МГУ Александр Юльевич также руководит отделением механики, читает лекции по теории гироскопов, ведет семинары, принимает активное участие в организации Института механики МГУ, становится его первым директором и одновременно продолжает активно работать в области приборостроения, интенсивно занимается научно-исследовательской, организационной и педагогической деятельностью. За выдающиеся научные достижения Академия наук СССР избирает А.Ю. Ишлинского своим действительным членом в 1960 г.

В 1964 г. Александр Юльевич становится директором вновь созданного Института проблем механики Академии наук СССР, в организации которого он сыграл определяющую роль и который с 2008 г. носит его имя – Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН). Благодаря его умелому руководству, Институт быстро становится крупнейшим научным центром нашей страны в области механики. Продолжая работать в областях механики гироскопической техники и инерциальных систем, Александр Юльевич издает фундаментальные монографии «Механика специальных гироскопических систем» (1952), «Механика гироскопических систем» (1963), «Инерциальное управление баллистическими ракетами» (1968), «Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация» (1976), «Механика относительного движения и силы инерции» (1981), в которых излагаются трудные вопросы многих разделов механики и которые быстро становятся

настольными книгами для молодых исследователей, инженеров и научных работников.

Большая эрудиция, умение поставить практически важную проблему как задачу математики и механики, эффективно решить ее современными методами всегда привлекали к Александру Юльевичу молодежь, ищущую новые идеи и приложение своих творческих сил. Он воспитал много учеников, кандидатов и докторов наук. Его постоянное творческое участие в развитии актуальных направлений науки и техники, ясная и четкая постановка проблем, умение получать самыми простыми способами ясные, доведенные до числа результаты, так необходимые инженерной практике, личное обаяние, чуткость и жизнерадостность постоянно привлекали и располагали к нему специалистов из самых различных областей. Сегодня ученики и последователи Александра Юльевича используют и развивают его идеи, применяют полученные им результаты при конструировании и изготовлении различного рода механических устройств.

Александр Юльевич прожил долгую и насыщенную жизнь. Его научное творчество охватывало почти все разделы механики: общую механику, или механику систем, включая механику твердого тела, теорию гироскопов и теорию колебаний; механику твердого деформируемого тела, включая теорию упругости и пластичности; механику вязкоупругих и вязкопластических сред; теорию трения и динамику тел, содержащих жидкость. Им решены многие прикладные задачи механики в области гироскопической техники, сельскохозяйственных машин и других приложений. Он долгие годы являлся лидером в области механики гироскопов и внес важный вклад в создание гироскопических приборов, решение проблем навигации и управления для морских судов, ракетной и космической техники. Его исследования самым непосредственным образом способствовали прорыву нашей страны в космос и созданию ее ракетно-ядерного щита. Его труды отличаются глубиной, строгостью и ясностью изложения. Многие из его работ стали классическими, определили на долгое время уровень исследований в ряде областей механики и оказали большое влияние на дальнейшее развитие этих разделов науки, как в нашей стране, так и за ее пределами. Им создана плодотворная научная школа, продолжающая и развивающая его традиции. Почти сорок лет Александр Юльевич проработал в Институте проблем механики, сначала директором, а затем почетным директором. Его коллеги, сотрудники и ученики помнят его как в высшей степени интеллигентного и доброжелательного человека, интересного и внимательного собеседника.

В 2023 году исполняется сто десять лет со дня рождения Александра Юльевича. Мы, сотрудники его Института, являясь потомками его самоотверженного труда и великих научных свершений, очень трепетно относимся ко всему, что связано с нашим Основателем. На нашем сайте появился раздел «Мемориальный кабинет А.Ю. Ишлинского» – ipmnet.ru/mem/. В нем содержатся редкие издания и очерки Александра Юльевича, посвященные ему мемориальные монографии, воспоминания его коллег и сотрудников, фотографии и видеозаписи из его рабочего и личного архива. Материалы для данной онлайн-

экспозиции могут быть предоставлены всеми желающими. Мы надеемся, что память о нашем великом Учителе будет сохраняться и приумножаться.

Благодарный Александру Юльевичу коллектив его Института

Список литературы

1. Ишлинский А.Ю. Механика. Идеи, задачи, приложения. – М.: Наука, 1985. – 623 с.
2. Актуальные проблемы механики: Академик А.Ю. Ишлинский – выдающийся ученый-механик; сб. трудов (отв. ред. Ф.Л. Черноусько). – М.: Наука, 2013. – 237 с.

АКАДЕМИК А.Ю. ИШЛИНСКИЙ – ВЫДАЮЩИЙСЯ ОРГАНИЗАТОР ИНЖЕНЕРНОГО ДЕЛА И НАУКИ, АКТИВНЫЙ ОБЩЕСТВЕННЫЙ ДЕЯТЕЛЬ

Гуляев Ю.В., Друкаренко С.П.

Международный и Российский союзы научных и инженерных общественных объединений

Ключевые слова: научно-технические общества и объединения, общественное управление наукой, инженерное дело, высшее образование.

Аннотация. Крупнейший учёный А.Ю. Ишлинский был активным общественным деятелем и выдающимся организатором инженерного дела и науки. В статье рассматривается вклад А.Ю. Ишлинского в организацию и сплочение отечественного и мирового научного и инженерного сообщества, поднятие престижа научной и инженерной деятельности. Его жизнь неразрывно связана с созданием и последующим руководством научных и инженерных общественных объединений (Союзы НИО), которые продолжают и развивают традиции Русского технического общества (РТО) по консолидации научно-технической общественности. Неоценим вклад А.Ю. Ишлинского как крупного организатора науки и инженерного дела в деятельность научно-технических обществ в должности Президента Всемирной федерации инженерных организаций.

Крупнейший учёный и общественный деятель академик Ишлинский Александр Юльевич внёс весомый вклад в организацию и сплочение отечественного и мирового научного и инженерного сообщества и движения, поднятие престижа научной и инженерной деятельности, обогатив развитие системы общественного управления наукой, инженерным делом, высшим образованием. Особенно его руководящая роль в формировании идей, в конкретизации и достижении высоких целей, постановке и реализации задач проявилась в периоды времени, когда он возглавлял на протяжении более 20 лет (с 1970 по 1991 год) ордена Ленина Всесоюзный совет научно-технических обществ СССР и в течение 5 лет (1986-1991 г.г.) будучи президентом Всемирной федерации инженерных организаций.

Исторически его жизнь неразрывно связана с событиями в жизни нашей организации, название которой менялось: РТО – ВСНТО – Союз НИО СССР – Союз НИО. В советский период организация именовалась Всесоюзный совет научно-технических обществ (ВСНТО) – с 1988 года Союз научных и инженерных обществ СССР (Союз НИО СССР), с 1991 Международный и Российский Союзы научных и инженерных общественных объединений (Союзы НИО), которые продолжают и развивают традиции Русского технического общества (РТО) по консолидации научно-технической общественности.

Наряду со 110-летием со дня рождения академика А.Ю. Ишлинского в текущем 2023 году, являющимся вторым годом Десятилетия науки и технологий, которое объявлено Президентом Российской Федерации Владимиром Путиным, отмечается целое созвездие круглых дат мероприятий, имеющих непосредственное отношение к жизни и деятельности Александра Юльевича. Отметим некоторые из них, упоминание о которых может более ярко и детальной характеризовать кипучую деятельность А.Ю. Ишлинского как крупного

организатора науки и инженерного дела, включая и его деятельность в научно-технических обществах.

Кадры кинохроники, доступные в сети Интернет, позволяют вспомнить, как ровно 50 лет назад, в 1973 году, в Кремлёвском дворце съездов А.Ю. Ишлинскому, как председателю ВСНТО, вручали орден Ленина, которым научно-технические общества СССР награждены в соответствии с Указом Президиума Верховного Совета СССР от 23 января 1973 года за большой вклад в развитие научно-технического прогресса, активную работу по пропаганде научно-технических знаний среди трудящихся. На этом съезде отмечалось, что НТО внесли весомый вклад в развитие советской науки и техники. Орден Ленина – это высшая награда страны, это одна из самых высоких оценок деятельности нашего общества со стороны государства. Орден Ленина вызывает восхищение и гордость за славную историю ВСНТО, включая многие научно-технические общества, которые успешно продолжают свою деятельность в настоящее время: Российское геологическое общество (РОСГЕО, предыдущее название – Научно-техническое горное общество с 1887 года); НТО нефтяников и газовиков имени академика И.М.Губкина (НТО нефтяной и газовой промышленности им. И. М. Губкина с 1933); Российское НТО радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова (НТО радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова 1918); НТО судостроителей имени академика А.Н. Крылова (НТО судостроительной промышленности им. А.Н. Крылова с 1930); Российское химическое общество имени Д.И. Менделеева (Всесоюзное химическое общество им. Д.И. Менделеева с 1868) и другие.

Высокую оценку Союзу НИО, продолжателю деятельности ВСНТО и дела академика А.Ю. Ишлинского в современных условиях дал действующий Президент Российской Федерации В.В.Путин. В телеграмме, направленной в адрес Союза НИО, отмечается: Союз НИО – «Одна из старейших общественных организаций объединила в своих рядах передовых ученых, инженеров, организаторов производства. На протяжении всей своей истории деятельность РТО служила эффективному развитию отечественной научно-технической мысли, прогрессу и просвещению. Важно, что замечательные традиции общества, его идеи востребованы и сегодня. Убежден, что Союз НИО и впредь будет вносить достойный вклад в реализацию богатейшего интеллектуального, технологического потенциала страны, решению насущных общенациональных задач»¹.

Как неоднократно отмечал председатель ВСНТО академик А.Ю. Ишлинский, «промышленная реализация идей ученых», «открытия ради практики», «технологическое освоение» научно-технических достижений, передача этих разработок производству, является основной задачей научно-технических обществ. И в своей научной деятельности он всегда следовал этому принципу. Его фундаментальные исследования в области механики сплошной среды, гироскопии и инерциальной навигации имели большое значение для

¹ Телеграмма Международному Союзу научных и инженерных объединений, участникам и гостям торжественных мероприятий, посвященных 140-летию со дня учреждения Русского технического общества 27.06.2006 // <http://www.kremlin.ru/events/president/letters/26094/print>

создания гироскопических командных приборов и систем, систем боевого управления стратегического ракетного оружия, систем управления космическими аппаратами, создания систем ПВО и др. Теоретические разработки А.Ю. Ишлинского явились научной основой для большинства отечественных гироскопических приборов и систем навигации, которые были разработаны при его непосредственном участии.

Результаты научных работ академика А.Ю. Ишлинского весьма быстро использовались при решении практических задач, как это было характерно для многих российских инженеров и ученых, особенно для выдающегося российского инженера академика Владимира Григорьевича Шухова, ученого, инженера-кораблестроителя академика Алексея Николаевича Крылова, Главного конструктора космических кораблей инженера академика Сергея Павловича Королева и многих других.

В текущем году исполняется 170 лет со дня рождения «первого инженера России» Владимира Григорьевича Шухова. Александр Юльевич очень высоко ценил В.Г. Шухова, много говорил и писал о нём. А.Ю. Ишлинский отмечал, что «В технике одно лишь только предложение идеи, даже статья в журнале, либо заявка на открытие, еще по-существу ничего не значат. В технике нужны конструкции, выполненные и завоевавшие своей добротностью и замечательными качествами всеобщее положительное техническое мнение.

В.Г. Шухов как раз и являлся создателем таких конструкций. Именно инженер – творец технического прогресса»².

Один из докладов, прочитанных А.Ю. Ишлинским в 1998 году, называется «В.Г. Шухов – Великий Инженер века». А.Ю. Ишлинский подчеркивал: «Многие научные и инженерные идеи Шухова, его творческий метод и сейчас близки нашей науке и способствуют техническому прогрессу»³.

В кабинете А.Ю. Ишлинского в Институте проблем механики (теперь мемориальный кабинет А.Ю. Ишлинского), как и при Александре Юльевиче, висит на стене большой портрет В.Г.Шухова.

В 1972 году для изучения научной и научно-технической деятельности ученого и инженера В.Г. Шухова Президиумом Академии наук СССР была основана Комиссия по увековечиванию памяти почетного академика инженера-механика В.Г. Шухова (распоряжение Президиума АН СССР от 28 июля 1972 г.). Председателем этой комиссии с 1972 по 2003 гг. был академик А.Ю. Ишлинский. Основной задачей работы Комиссии стала подготовка материалов о научном и техническом творчестве В.Г. Шухова и его вкладе в науку в самых разных областях.

Имя В.Г. Шухова неразрывно связано с деятельностью научно-технических обществ.

² Шухов Владимир Григорьевич (1853-1939). Избранные труды: строительная механика / В.Г. Шухов; под ред. акад. А.Ю. Ишлинского; Акад. наук СССР, Институт истории, естествознания и техники, Комиссия по увековечению памяти почетного акад. В.Г. Шухова. – М.: Наука, 1977. – 192 с. – С. 9.

³ Там же.

Высшей наградой РосСНИО и Союза НИО с 1990 года является нагрудная Золотая медаль имени гениального русского инженера В.Г.Шухова, учрежденная по предложению А.Ю. Ишлинского (постановление Совета Министров СССР от 10 июля 1989 г. № 547), которая присуждается за выдающийся вклад в развитие науки и техники (среди награжденных академики РАН Л.Н. Кошкин, В.П. Бармин, К.С. Колесников, В.П. Мишин, С.Н. Ковалев, Ю.В. Гуляев, Ю.С. Соломонов, академик Российской Академии медицинских наук С.Н. Федоров, академик НАН Украины Б.Е. Патон, член-корреспондент РАН И.В. Бармин, М.Т. Калашников, В.Л. Александров, Н.А. Макаровец и другие).

Отрадно отметить, что нагрудная Золотая медаль им. В.Г. Шухова присуждена академику А.Ю. Ишлинскому за работы по общей механике, теории гироскопов, автономного управления инерциальных систем, математической физике, за научные достижения в приборостроении (1992 год).

А.Ю. Ишлинский высоко ценил дружбу с академиком А.Н. Крыловым, 160-летие со дня рождения которого в текущем году отмечает научно-техническая общественность. Академики А.Н. Крылов и А.Ю. Ишлинский были учеными – механиками, жизнь и общественная деятельность которых на протяжении десятков лет тесно связана с научно-техническими обществами страны, в первую очередь обществом судостроителей, ВСНТО, Союзом НИО.

В раннем возрасте академик А.Н. Крылов по своей собственной инициативе пришел в Русское техническое общество. Приведем выдержку из воспоминаний будущего академика А.Н. Крылова: «В ноябре 1878 г., в возрасте 15 лет, будучи воспитанником Морского училища, прочел в газете, что в IV (военно-морском) отделе Русского технического общества инженер Карышев будет делать доклад о подводном плавании и своем проекте подводной лодки. День был субботний, т.е. вечер у меня свободный, и я решил идти прослушать этот доклад, справедливо считая, что мундир Морского училища откроет мне доступ»⁴. Действительным членом РТО А.Н. Крылов избран в 1890 году, и уже в 1891 году на заседании IV отдела РТО выступает с сообщением «О кораблестроительных вычислениях». В 1895 году (когда будущему академику было 32 года) А.Н. Крылов выступил на заседании РТО с научным докладом «Новая теория килевой качки корабля на волнении с учётом возникающих при этом усилий». Как отмечают современники А.Н. Крылова, доклад имел большой успех. Через 3 года, в 1898 году, он изложил созданную общую теорию качки корабля на волнении также на заседании РТО.

Через несколько лет, уже профессором, А.Н. Крылов возглавил в 1902-1903 годах один из шести отделов Русского технического общества, который назывался «Отдел судостроения, морской техники, артиллерии и оружейного производства».

Академик (с 1916) А.Н. Крылов был избран первым председателем Всесоюзного научно-инженерного технического общества судоходства и судостроения, спустя много лет, в период 1932-1945 годов он был председателем общества. В настоящее время Научно-техническое общество судостроителей носит имя академика А.Н. Крылова.

⁴ Крылов А.Н. Мои воспоминания. – 10-е изд., доп. – СПб.: Политехника, 2014. – 511 с.

Жизнь и деятельность А.Н. Крылова – убедительный пример «связующей нити» РТО и ВСНТО, формирования и развития традиций отечественного профессионального инновационного объединения.

Главного конструктора С.П. Королева академик А.Ю. Ишлинский в своей статье представил «прежде всего великим инженером»⁵, «инженерного гения»⁶, «крупнейшего инженера и ученого»⁷, «истинного отца первого спутника Земли»⁸, жизнь которого – «яркое горение до самой смерти»⁹, сумевшего воплотить многие свои великие замыслы. А.Ю. Ишлинский начинает статью словами: «С именем академика Сергея Павловича Королева связаны эпохальные события человеческой цивилизации: запуск первого искусственного спутника Земли, достижение Луны и Венеры, беспрецедентный полет в космос нашего соотечественника Юрия Гагарина. Много замечательного было сделано Сергеем Павловичем до этих свершений и после них. Все созданное им в жизни — это единство цели в достижении все больших скоростей и высот»¹⁰.

Важной вехой в жизни С.П. Королева явилась разработка и защита дипломного проекта, построенного к тому времени и летавшего легкого двухместного самолета своей конструкции под руководством А.Н. Туполева.

Командный подход к решению сложных, комплексных задач характерен и для А.Ю. Ишлинского, и для С.П. Королева. Как отмечает А.Ю. Ишлинский: «Сергей Павлович всегда трезво смотрел на вещи, всегда ставил перед собой хотя и трудные, но выполнимые задачи. Он понимал, что нельзя работать одному, что важно привлечь к вопросам реактивного движения общественность»¹¹. И далее: «он стремился к расширению фронта работ по реактивным двигателям и содружеству с другими коллективами»¹². Как и А.Ю. Ишлинский, по инициативе С.П. Королева: «еще в 1932 г. в Москве были организованы инженерно-конструкторские курсы, где прочли лекции видные советские ученые, в их числе будущий академик Борис Сергеевич Стечкин, изложивший свою теорию воздушно-реактивных двигателей»¹³.

Приведем еще несколько извлечений из статьи А.Ю. Ишлинского о С.П. Королеве. Эти инженеры заслуживают такого внимания. «Новый этап творческой деятельности С.П. Королева начался в 1946 г., когда он был назначен Главным конструктором управляемых баллистических ракет дальнего действия... ракетному оружию отводилось здесь одно из первых мест. Стало ясно, что баллистическая ракета может транспортировать атомный заряд.

Назначение Сергея Павловича Главным конструктором было закономерным: крупнейший инженер и ученый в области ракетной техники,

⁵ Академик С. П. Королев. Ученый. Инженер. Человек. Творческий портрет по воспоминаниям современников: Сб. статей / Отв. ред.: Ишлинский А.Ю. – М.: Наука, 1986. – 520 с. – С. 13.

⁶ Там же. – С. 11.

⁷ Там же. – С. 13.

⁸ Там же.

⁹ Там же. – С. 7.

¹⁰ Там же.

¹¹ Там же. – С. 7.

¹² Там же.

¹³ Там же. – С. 9.

выдающийся организатор, человек с широким горизонтом знаний, смелый, решительный и вместе с тем трезво оценивающий трудности, умеющий выбрать главные направления прогресса техники и сочетать их с долговременной перспективой исследований»¹⁴.

«Конструкторское бюро, возглавляемое Сергеем Павловичем, стало головным и обеспечило практическую реализацию программы – от научно-технической идеи до производства ракет и космических кораблей. Такая форма организации оказалась весьма эффективной.

Можно только поражаться исключительному таланту Королева – организатора, сумевшего привлечь к себе многие десятки и сотни талантливых людей и создать крепко спаянный коллектив единомышленников»¹⁵.

«Сергей Павлович понимал необходимость широкой кооперации научно-исследовательских институтов, предприятий и других организаций для создания, испытаний и отработки баллистических ракет дальнего действия и налаживал эту кооперацию с исключительной энергией. Как правило, никто не мог отказать Сергею Павловичу в помощи. Его личное обаяние, умение найти время для разговора по душам с ученым, с рядовым конструктором и рабочим во многом способствовали успеху... В августе 1957 г. совершила свой первый успешный полет межконтинентальная ракета. Эта ракета – одна из вершин инженерного гения С.П. Королева»¹⁶.

И в заключение: «Сергей Павлович Королев был прежде всего великим инженером»¹⁷.

Союз НИО постоянно проводит работу по увековечиванию памяти российских инженеров, ученых, конструкторов. По предложению РосСНИО и поддержке Правительства Москвы и Главы Чувашской Республики установлены памятники выдающимся ученым и инженерам. На средства, собранные Союзом НИО и научно-технической общественностью страны, авторским коллективом народного художника Российской Федерации С.А. Щербакова были созданы памятники всемирно известному ученому, конструктору и инженеру С.П. Королеву (открыт в 2008г. в Москве), гениальному инженеру В.Г. Шухову (открыт в 2008 г. в Москве) и великому ученому-кораблестроителю инженеру А.Н. Крылову (открыт в 2015 г. в г. Чебоксары на его родине).

Открытие памятников – это дань глубокого уважения и признания заслуг выдающихся наших соотечественников, поднявших на высочайший уровень планку инженерной мысли и звание инженера. Открытие этих памятников – это и вечная память первому секретарю Союза НИО (с 1988 по 2022 гг.) Владимиру Михайловичу Ситцеву, который продолжительное время работал с А.Ю. Ишлинским, был инициатором и главным организатором многих крупных мероприятий.

¹⁴ Академик С. П. Королев. Ученый. Инженер. Человек. Творческий портрет по воспоминаниям современников: Сб. статей / Отв. ред.: Ишлинский А.Ю. – М.: Наука, 1986. – 520 с.

¹⁵ Там же. – С. 10.

¹⁶ Там же. – С.11.

¹⁷ Там же. – С. 13.

Союз НИО – исторический правопреемник и духовный наследник Русского технического общества (РТО), организованного в Санкт-Петербурге в 1866 году. Это старейшая среди отечественных общественных научно-технических организаций. Главной целью РТО согласно уставу было «содействовать развитию техники и технической промышленности в России»¹⁸.

Среди основателей РТО и его активных членов были крупнейшие отечественные ученые, конструкторы и инженеры – видные русские ученые: Д.И. Менделеев, А.С. Попов, Д.К. Чернов, В.Г. Шухов, А.Н. Крылов, М.А. Шателен, Г.О. Графтио, Н.Е. Жуковский, П.Н. Яблочков, а также крупные промышленники и пропагандисты научно-технических знаний, такие как Людвиг Нобель, другие выдающиеся представители науки, инженерного дела. Они заложили основы и на многие годы определили направление деятельности научно-технических обществ в нашей стране, реализовали крупные научно-технические проекты и программы.

В этом году исполняется 210 лет со дня рождения первого председателя Русского технического общества, инженера-генерала Дельвига Андрея Ивановича.

Научно-технические общества СССР (НТО СССР) были организованы по отраслям производства, активно участвовали в создании новой техники, в мероприятиях по интенсификации производства, механизации и автоматизации производств, процессов, повышению качества продукции, направляли усилия на решение проблем охраны окружающей среды, вели значительную воспитательную и пропагандистскую работу.

Под председательством академика А.Ю. Ишлинского, как руководителя самой массовой и авторитетной организации Всесоюзного совета научно-технических обществ проведены IV, V, VI и VII съезды ВСНТО.

Как председатель ВСНТО, А.Ю. Ишлинский уделял большое внимание развитию численности и структуры общества, искал и определял пути по вовлечению трудящихся в научно-техническую деятельность и расширению структуры организаций НТО. В тот период масштабы деятельности научно-технических обществ неуклонно возрастали, расширялся круг вопросов, в решении которых принимала участие научно-техническая общественность.

В стенографическом отчете торжественного пленума Всесоюзного совета научно-технических обществ от 17 ноября 1966 года, когда официально отмечалось столетие научно-технических обществ, указано, что ВСНТО, состоящее из 21 научно-технического общества, «объединяет около 3 млн инженеров, техников, научных работников, специалистов сельского хозяйства и рабочих-новаторов..... На предприятиях, стройках, совхозах создано свыше 60.000 первичных организаций НТО»¹⁹.

В докладах председателя ВСНТО академика А.Ю. Ишлинского, а также отчётных материалах отмечалось, что в 1973 году в составе научно-технических обществ СССР состояло почти 6 млн. работников науки и производства, первичные организации обществ имелись практически во всех научно-

¹⁸ Научно-технические общества СССР: Ист. очерк. – М.: Профиздат, 1968. – 455 с. – С. 11.

¹⁹ Торжественный Пленум Всесоюзного совета научно-технических обществ 17 ноября 1966 г.: стенографический отчет. – М.: Профиздат – 1967. – 32 с. – С. 13.

исследовательских институтах промышленности и сельского хозяйства, проектных и конструкторских бюро, на всех заводах и фабриках, в крупных колхозах и совхозах, отделениях железных дорог и пароходств, на шахтах, рудниках и промыслах их около 100 тысяч, в 1976 году – свыше 7,8 млн., а в 1978 году НТО объединяло почти 8,5 млн. научных работников, инженеров, техников, специалистов. В 1983 году НТО составило более 11 млн. человек, а к 1988 году число членов НТО возросло до 13 млн. учёных, инженеров, техников, передовых рабочих и колхозников, которые объединены в 24 всесоюзных научно-технических общества страны.

Объединяя в своих рядах учёных и производителей, ВСНТО содействовало укреплению связей науки с производством, быстрейшему использованию научных открытий и результатов исследований практической жизни, широкому привлечению общественности к активному участию в развитии и использованию достижений научно-технической революции, обеспечению высокого научно-технического уровня всего производства.

Настойчиво и неустанно А.Ю. Ишлинский на различных форумах и в средствах массовой информации высказывал свою позицию по ключевым вопросам повышения уровня научных исследований и инженерных разработок, усиления роли научно-технических обществ, совместной работе с Российской академией наук, министерствами и ведомствами, с производством.

Важным направлением деятельности ВСНТО и Союза НИО было и является взаимодействие с исполнительными и законодательными органами власти и Российской академией наук.

За период времени в 20 лет с 1972 по 1992 годы было принято не менее 12 нормативных актов Правительства страны и других государственных и общественных ведомств и организаций, РАН по вопросам, касающимся деятельности ВСНТО, Союза НИО. При этом многие эти документы были совместными.

Исходя из принятого законодательства страны, новой формой работы ВСНТО стало выдвижение кандидатов в депутаты Верховного Совета СССР. В 1989 году народными депутатами СССР от Союза НИО СССР было избрано 10 человек.

Эти направления работы продолжают быть актуальными всегда. Вспомним, что Русское техническое общество имело статус императорского, другими словами – государственного общества, с соответствующими полномочиями и поддержкой государя России.

В настоящее время деятельность общества находит отражение в действующих нормативных актах и поддержку в стране.

По распоряжению Правительства Российской Федерации от 22 января 2001 г. № 77-р и от 10 октября 2002 г. № 1428-р была поддержана инициатива Союза НИО и РосСНИО по проведению ежегодного Всероссийского конкурса «Инженер года», а молодёжная премия «Надежда России» внесена в Перечень международных, иностранных и российских премий за выдающиеся достижения в области науки и техники, образования, культуры, литературы, искусства и средств массовой информации, суммы которых, получаемые

налогоплательщиками, не подлежат налогообложению в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 5 августа 2010 г. №602.

Председатель ВСНТО А.Ю. Ишлинский отмечал, что «Имея свои организации во всех союзных республиках, краях и областях страны, научно-технические общества могут и должны более активно содействовать осуществлению государственной политики в области науки и техники. Министерствам и ведомствам следует больше опираться на научно-технические общества, на их возможности в доведении всего нового, прогрессивного до каждого коллектива»²⁰.

Научно-техническая общественность располагает большими резервами для расширения своего участия в формировании планов развития науки и техники и их реализации. Под руководством А.Ю. Ишлинского тщательно изучались и продолжались традиции Русского технического общества, формировались новые базовые направления деятельности, реализовывались задачи научных и инженерных общественных объединений с целью развивать и отстаивать науку, инженерное дело и образование, осуществлялся поиск новых путей финансирования инженерной науки, прилагались усилия для привлечения внимания общественности к проблемам современной науки, инженерного дела и технического образования.

Приведем несколько важных задач и направлений деятельности общества, которые руководитель ВСНТО и Союза НИО А.Ю. Ишлинский определял и ставил перед научно-техническими обществами. Это:

- объединение усилий учёных, инженеров, техников, рабочих-новаторов на всемерное ускорение внедрения и использование в народном хозяйстве результатов научных исследований, укрепление творческого содружества науки и производства. Решались задачи комплексной механизации и автоматизации производственных процессов, сокращение ручного труда;

- привлечение трудящихся к научно-техническому творчеству, привлечение их к управлению производством, широкое вовлечение учёных, инженерно-технических работников, рабочих и служащих в творческий поиск на основе использования научно-технических достижений для дальнейшего ускорения темпов развития производственных сил страны, совершенствования производства;

- привлечение молодёжи к научно-техническому творчеству, молодых специалистов, рабочих новаторов, студентов;

- воспитание у работников науки и производства неустанного стремления к новым достижениям, творческого отношения к труду, непримиримости к застою;

- решение проблемы существенного повышения качества продукции, способствовать развитию соответствующих производств.

- пропаганда достижений науки и техники, распространение передового опыта, повышение знаний и деловой квалификации специалистов и рабочих, воспитание у них высокого профессионального и нравственного долга;

²⁰ Материалы VI Всесоюзного съезда научно-технических обществ. – М.: Профиздат, 1983. – 64 с. – С. 9.

– участие в улучшении технической оснащённости, совершенствование системы связей промышленности и торговли, помогать во владении научно обоснованными методами управления производством, использование новейших технических средств;

– расширение и укрепление связи актива НТО с научными инженерными организациями зарубежных стран. Это направление работы развивалось с момента образования Русского технического общества и продолжается в настоящее время с учетом внешней обстановки. Несомненно, оно способствует изучению зарубежного опыта, обмену научно-техническими достижениями, а также позволяет отечественным специалистам пропагандировать успехи России в области науки, техники, экономики, культуры, раскрывать наши национальные преимущества²¹.

Академик А.Ю. Ишлинский завоевал авторитет во многих странах мира и был избран иностранным членом ряда академий и организаций зарубежных стран. Как ранее отмечалось, в 1986-1991 годах он избирался президентом Всемирной федерации инженерных организаций (ВФИО, World Federation of Engineering Organizations, WFEO), а в периоды 1971-1986 был вице-президентом, в 1991-2003 годах почетным президентом ВФИО. С 1966 г. – член Национального географического общества (США), с 1967 г. А.Ю. Ишлинский – член делегации СССР на сессиях Генеральной Ассамблеи Международного союза теоретической и прикладной механики (IUTAM). В 1976-1984 – член Генеральной ассамблеи Международного союза теоретической и прикладной механики (IUTAM), в 1984-1988 – член Бюро Международного союза теоретической и прикладной механики (IUTAM), в 1970-1991 годах – вице-президент Всемирной Федерации научных работников, член Международной Академии астронавтики (штаб-квартира в Стокгольме). С 1981 г. А.Ю. Ишлинский – почётный член Международной Академии истории науки (штаб-квартире в Париже).

А.Ю. Ишлинский избирается в 1977 году иностранным членом Академии наук Польши, иностранным членом Академии наук Чехословакии, иностранным членом-корреспондентом Мексиканской инженерной Академии, в 1988 г. – членом-корреспондентом Королевской инженерной академии Великобритании.

Союз НИО в своей деятельности опирается на опыт и авторитет Русского технического общества, без научного заключения которого в былые времена не принималось ни одно сколько-нибудь ответственное решение, затрагивавшее судьбы людей и интересы промышленности, регионов, государства в целом.

Союз НИО располагает необходимыми для проведения такой работы ресурсами, т.к. членские организации Союза НИО и РосСНИО – это 10 национальных научно-инженерных объединений, 35 профессиональных обществ и ассоциаций в составе Союза НИО, 23 российских научно-технических обществ, 25 региональных организаций и отделений, 19 домов науки и техники и 5 комитетов в составе РосСНИО.

Союз НИО считает своей важнейшей задачей способствовать практической реализации государственной политики в научно-технологической сфере,

²¹ Всесоюзный съезд научно-технических обществ (4; 1973; Москва). Материалы IV Всесоюзного съезда научно-технических обществ. – М.: Профиздат, 1973. – 116 с. – С. 36.

безопасному и устойчивому развитию экономики, и, следовательно, повышению уровня жизни населения.

Союзом НИО ведется активная работа, направленная на расширение связей с общественными организациями. Были заключены соглашения с Камским кластером, включая Российский центр открытых инноваций «Инноскоп», укрепились связи с Ассоциацией «Российский дом международного научно-технического сотрудничества», Всероссийским обществом изобретателей и рационализаторов, Вольным экономическим обществом России, Московской конфедерацией промышленников и предпринимателей (работодателей), Российским профессорским собранием, Союзом развития наукоградов России, Фондом содействия экономическому развитию им. Байбакова Н.К., Русско-китайским центром гуманитарного сотрудничества и развития.

Союз НИО ставит перед собой задачу повышения статуса профессии инженера в обществе, популяризации достижений инженерного искусства, привлечению внимания общественности к проблемам инженерного дела в России и странах СНГ. И существенную роль в этом играют проводимые Союзом НИО ежегодно Всероссийский конкурс «Инженер года» и конкурс по присуждению молодежной премии «Надежда России». Всероссийский конкурс «Инженер года» осуществляется с 2000 года, а конкурс «Надежда России» – с 2009 года.

Ежегодный Всероссийский конкурс «Инженер года» проводится по 49 номинациям в двух версиях: «Профессиональные инженеры» – для участников конкурса, имеющих стаж работы на инженерных должностях не менее 5 лет и «Инженерное искусство молодых» – для участвующих в конкурсе молодых специалистов в возрасте до 30 лет включительно. Победители конкурса награждаются дипломом жюри конкурса, памятной медалью «Лауреат конкурса» и заносятся в Реестр профессиональных инженеров России.

В 2025 году РосСНИО совместно с научной и инженерной общественностью будут отмечать 25-летний юбилей конкурса «Инженер года», который за эти годы стал массовым и популярным. Многие предприятия, учебные заведения, организации, в том числе подведомственные Минпромторгу России, Минобрнауки России, Минэнерго России, участвуют в конкурсе.

По масштабу, задачам и охвату такого количества направлений инженерной деятельности, по числу принимающих участие на всех этапах конкурс стал крупнейшим социальным проектом, реализуемым в России с целью выявления и распространения передового опыта и достижений инженерных кадров, лучших в своей сфере деятельности. Ежегодно в конкурсе принимают участие 75 тысяч человек практически из всех регионов страны.

По итогам 2022 года лауреатами Всероссийского конкурса «Инженер года» стали 420 участников конкурса, в том числе 274 – по версии «Профессиональные инженеры» и 146 – по версии «Инженерное искусство молодых». Можно смело утверждать, что соискатели, получившие сертификаты профессионального инженера и звания «Лауреат» заслужили своим творческим трудом и инженерным искусством право быть гордостью нации.

Они своей повседневной практикой творят и создают нормы современной инженерной культуры. Лауреаты конкурсов пользуются заслуженным уважением

в инженерном сообществе страны, их чествуют в областях, краях и республиках Российской Федерации, приветствия в их адрес направляют руководители федеральных и региональных органов власти.

Молодежной премии Российского Союза НИО в области науки и техники «Надежда России» за 2022 год удостоены авторы шести работ (из Москвы, Железногорска (Красноярский край), Оренбурга, Перми, Самары).

С каждым годом возрастает количество участников в этих конкурсах и увеличивается количество номинаций. По предложению председателя научно-технического совета Военно-промышленной комиссии Российской Федерации – заместителя председателя коллегии Военно-промышленной комиссии Российской Федерации академика Ю.М. Михайлова в список номинаций конкурса добавлена номинация «Диверсификация оборонно-промышленного комплекса». По предложению бывшего посла Китайской народной республики Ли Хуэя в список номинаций конкурса «Инженер года» добавлена 45-я номинация «Международное сотрудничество».

По предложению действующего посла КНР в России Чжан Ханьхуэя в рамках ежегодного Всероссийского конкурса Инженер года посольством КНР в РФ и РосСНИО была учреждена Премия Посла Китая. Чрезвычайный и Полномочный Посол КНР в России Чжан Ханьхуэй принимает участие в торжественной церемонии награждения победителей ежегодного Всероссийского конкурса Инженер года и молодежной премии Надежда России в области науки и техники, выступает с приветственной речью и вручает почетные дипломы лауреатам Премии Посла Китая. К настоящему времени Премией отмечено 48 инженеров в таких сферах, как искусственный интеллект, передовые производственные технологии и медицинские технологии и другие. Лауреатам этой премии предоставлена возможность при финансовой поддержке посольства КНР посетить научно-исследовательские учреждения и промышленные предприятия Китая.

Традиционно подведение итогов Всероссийских конкурсов «Инженер года» и «Надежда России» приурочено ко Дню российской науки и посвящено Всемирному дню инженерии, который по решению ЮНЕСКО ежегодно отмечается 4 марта (день образования Всемирной федерации инженерных организаций, ВФИО). Российский Союз научных и инженерных общественных объединений, как член ВФИО, был инициатором учреждения этого праздника.

Считаем, что одним из важнейших направлений работы Союза НИО в современных условиях должно стать обеспечение участия научно-технической общественности в законотворческой деятельности, в процессе выработки выверенных решений в таких важнейших сферах, как образование, наука, инженерная деятельность.

Союз НИО уделяет большое внимание работе с молодежью. Содействие воспитанию творчески активной молодежи и оказания общественной поддержки профессиональному становлению одаренных, креативно мыслящих специалистов это очень важная часть деятельности Союза НИО, направленная на обеспечение квалифицированными специалистами отечественной экономики.

Союз НИО постоянно ведет работу по формированию научной грамотности населения, выпуску научно-популярной литературы, рассматривает вопросы повышения качества инженерного образования, внедрения новых образовательных технологий, переподготовки кадров.

Дома науки и техники РосСНИО ведут подготовку и переподготовку кадров, обеспечивая возможности системы дополнительного образования для специалистов различного уровня подготовки, проводят научно-технические конференции, семинары и круглые столы по актуальным вопросам науки и образования.

Союз НИО организует коммуникационные площадки и проводит крупные научно-технические мероприятия, международные конференции, форумы, конгрессы, симпозиумы, семинары с целью обмена новейшими знаниями, выбора направлений исследований и оценки их результатов, внедрения современных технических решений и новых технологий, выявления и формирования общественного мнения по актуальным научно-техническим проблемам.

Научно-технические общественные организации, которые направляет и консолидирует Союз НИО, уделяют особое внимание использованию всего нового и прогрессивного, что достигнуто в науке и технике, мониторингу глобальных технологических трендов – актуальных направлений развития технологий, и способны внести существенный вклад в реализацию национальных проектов и в решение тех актуальных задач, которые встают на современном этапе научно-технологического развития нашей страны.

Союз НИО является единственным членом от Российской Федерации в такой авторитетной международной организации, как Всемирная федерация инженерных организаций (WFEO).

WFEO учреждена под эгидой ООН по вопросам образования, науки и культуры (ЮНЕСКО) авторитетными мировыми научными и техническими ассоциациями, в том числе по инициативе ВСНТО, включает национальные инженерные организации из 103 стран мира и представляет более 30 миллионов инженеров. Цель WFEO, как ведущей организации в разработке и применении инжиниринга, заключается в объединении многопрофильных инженерных ассоциаций для конструктивного решения международных и национальных проблем на благо человечества. Обсуждение этих направлений посвящены многочисленные международные конференции, инициированные Союзом НИО.

В сентябре 2001 года в Москве РосСНИО при поддержке Правительства Российской Федерации (распоряжение Правительства Российской Федерации №77-р от 22 января 2001 г., распоряжение мэра Москвы №789-РМ от 8 августа 2001 г.) была проведена Генеральная ассамблея Всемирной Федерации Инженерных Организаций.

В настоящее время РосСНИО – один из крупнейших членов WFEO. Обмен информацией между учеными, инженерами и специалистами – важнейшая составляющая часть научно-технического прогресса.

В последние годы стабильно и неуклонно продвигается вперед научно-техническое сотрудничество между Российской Федерацией и Китайской Народной Республикой. Общественные научно-технические организации России

и Китая ведут активную работу по практической реализации государственной политики в научно-технологической и образовательной сферах, содействуя консолидации усилий ученых, инженеров и научных работников, специалистов для внедрения передовых инновационных технологий и подготовки высокопрофессиональных инженерных кадров в своих странах, а также активно сотрудничают между собой.

Союз НИО и Китайская ассоциация по науке и технике (CAST) связаны тесными дружескими отношениями. С 2001 года в Москве было принято более 60 делегаций от отраслевых и региональных китайских научно-технических обществ, подписан ряд соглашений о сотрудничестве.

В 2019 году Союз НИО принял в Москве делегацию Китайской ассоциации по науке и технике, которую возглавил исполнительный вице-президент и главный исполнительный секретарь CAST Хуай Цзиньпин. В настоящее время он занимает должность Министра образования КНР.

19 июня 2019 года делегация CAST посетила Российскую академию наук, где провела переговоры с участием президента Российского Союза научных и инженерных общественных объединений академика Ю.В. Гуляева и исполнительного вице-президента, первого секретаря Секретариата CAST Хуай Цзиньпина. Следуя в русле политики своих государств, ведущие научно-технические общественные организации России и Китая, РосНИО и CAST договорились о подписании Меморандума о взаимопонимании по вопросу дальнейшего укрепления сотрудничества и обмена информацией в научной и гуманитарной сферах.

Меморандум «О взаимопонимании по вопросам укрепления сотрудничества и обмена информацией в научной и гуманитарной сферах между РосНИО и CAST» был торжественно подписан 17 сентября 2019 года в Мраморном зале Константиновского дворца в Стрельне, в рамках 24-й регулярной встречи глав правительств России и Китая, на которой обсуждались основные вопросы и перспективные направления укрепления двухстороннего торгово-экономического сотрудничества.

РосНИО поддерживает отношения и деловые связи со многими общественными научно-техническими и инженерными организациями, организует и проводит крупные научно-технические мероприятия, съезды, международные конференции, форумы, конгрессы, симпозиумы, семинары с целью обмена новейшими знаниями, выбора направлений исследований и оценки их результатов, внедрения современных технических решений и новых технологий, выявления и формирования общественного мнения по актуальным научно-техническим проблемам.

При поддержке Минпромторга России в 2010 году РосНИО и Сибирским отделением РАН в г. Красноярске был проведен Международный научно-технический конгресс «Энергетика в глобальном мире», участие в котором приняли Европейская федерация национальных ассоциаций инженеров (FEANI), ряд членов Всемирной федерации инженерных организаций (WFEO) и Исполнительной дирекции Международной премии «Глобальная энергия». В мероприятиях Конгресса участвовали около 2 тыс. ученых и производственников.

Среди них были представлены лауреаты Премии «Глобальная энергия», специалисты реального сектора экономики, крупные предприниматели и бизнесмены, руководители предприятий и организаций ТЭК, машиностроительной, приборостроительной и металлургической отраслей, региональных хозяйственных служб. На Конгресс прибыли зарубежные гости из Франции, Германии, Чехии, Эстонии, Израиля, КНР, а также из Украины и Казахстана.

В целях развития и укрепления связей с техническими университетами 23 ноября 2018 года в рамках юбилейных мероприятий, посвященных 165-летию со дня рождения В.Г. Шухова, в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана (национальном исследовательском университете) было проведено совместное заседание Международного и Российского союзов научных и инженерных общественных объединений и Ассоциации технических университетов, которая является членом Союза НИО, по теме: «Инженерная наука, инженерное дело, инженерное образование на службе технологического развития России». Участники заседания приняли резолюцию, в которой, в частности, отмечено:

«1. Считать важнейшей и приоритетной задачей организаций Союза НИО, РосСНИО и Ассоциации технических университетов практическую деятельность в осуществлении мер, обеспечивающих научно-технологическое развитие России в соответствии с Указом Президента Российской Федерации В.В.Путина от 7 мая 2018 года № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года».

2. Членам Союза НИО, РосСНИО и Ассоциации принять активное участие в реализации новой стратегии научно-технологического развития на долгосрочный период, совершенствовании инструментов ее реализации, которые позволят учитывать глобальные тенденции и вызовы, гибко реагировать на запросы общества и экономики, на новые технологии, научные знания, образовательные компетенции.

3. Постоянно развивать сотрудничество и партнерские отношения между отраслевыми и региональными организациями Союза НИО и РосСНИО с высшими учебными заведениями, университетами, входящими в состав Ассоциации технических университетов, обеспечивая непосредственную связь научной, научно-технической и инновационной деятельности с образованием, подготовкой инженерных и научных кадров».

В октябре 2019 года на площадке Российского государственного университета (РГУ) имени А.Н. Косыгина под патронатом ЮНЕСКО и WFEO состоялся Международный Косыгинский форум: «Современные задачи инженерных наук», одним из организаторов которого является Российский Союз научных и инженерных общественных объединений. Статус ЮНЕСКО был получен по инициативе Союза НИО и РосСНИО при поддержке действующего президента WFEO Марлен Канга, избранного президента WFEO Гонг Ке и ответственного секретаря Комиссии Российской Федерации по делам ЮНЕСКО Г.Э. Орджоникидзе. На Форуме выступил президент WFEO профессор Гонг Ке.

В настоящее время ведется подготовка очередного международного форума «Современные задачи инженерных наук», который будет проведен в феврале 2024 года.

Присущая А.Ю. Ишлинскому острота мысли, компетентность, ясное понимание актуальных направлений науки и техники, чёткость и жизнерадостность, терпимость человеческих отношениях привлекало к нему общавшихся с ним людей: студентов, учёных, инженеров, создателей новой техники.

Большое внимание уделял А.Ю. Ишлинский «Инженерному братству». Приведем ряд извлечений, суждений, взгляды, мысли и слова Ишлинского по этой теме, которые очень актуальны, важны сегодня:

1. «Всегда инженерное дело, технические вопросы, претворение идей ученых было главной задачей научно-технических обществ. Так и осталось до сих пор».

2. «Я помню времена, когда званием «инженер» гордились, даже на визитных карточках указывали, потом перестали, престиж этой профессии пошел на убыль. Почему? Причин много, возникли они не в один день, корни некоторых из них нужно искать в прошлом.

Вернемся лет на 25-30 назад. Тогда, в конце 50-х годов, произошла коренная переоценка роли науки. Так называемые «ученые», прикрывавшие свое бессилие демагогией, получили со стороны истинно научных сил отпор, поддержанный соответствующими решениями партии и правительства. Мои современники, думаю, помнят то настроение подъема, оптимизма, охватившего людей. Можно было работать без опасения, что на тебя навесят ярлык «лжеученый». Естественно, поднялась эффективность научных исследований, усилился авторитет науки. И заодно укоренилось мнение, что настоящим делом может быть только такое, где предварительно найден и обоснован научный подход. А как и где его осуществлять? Конечно же, в научных учреждениях»²².

3. «Объединяя ученых прикладных направлений, работающих в академических и ведомственных институтах, в высших учебных заведениях, научно-технические общества могут многое сделать для дальнейшего развития советской науки и техники, повышения их роли в решении поставленных партией задач ускорения научно-технического прогресса, перевода экономики на интенсивный путь развития»²³.

4. «Инженер – ключевая фигура в производстве материальных ценностей, развитии промышленности и технической части аграрного комплекса, добыче полезных ископаемых, строительстве, сооружении дорог, создании информационных систем, приборостроении. Его деятельностью определяются благосостояние государства, достижения научно-технического прогресса. Именно поэтому надо обратить особое внимание на повышение эффективности инженерного корпуса.

²² Ишлинский А.Ю. Инженерное братство // Техника – молодежи. 1987. – №. – С. 22-25.

²³ Материалы VI Всесоюзного съезда научно-технических обществ. – М.: Профиздат, 1983. – 64 с. – С. 8.

Многие проблемы этого корпуса решает правление Союза научных и инженерных обществ, его местные организации. Они дают рекомендации по развитию соответствующих отраслей промышленности, созывают конференции, помогают в создании временных творческих коллективов, центров инженерных услуг, научно-технических кооперативов. Правление Союза научных и инженерных обществ входит с научно-техническими предложениями в правительство и президентский совет. Оно расширяет сеть своих местных организаций, руководит работой домов техники, способствует созданию совместных предприятий и укреплению международных связей»²⁴.

5. «Научно-технические общества должны расширять оправдавшую себя практику общественной экспертизы новых проектов, целью которой является повышение эффективности, экономичности, надежности и долговечности, обеспечение высокого качества продукции и, разумеется, уменьшение доли ручного труда при соблюдении полной безопасности работ»²⁵.

6. «Положение инженера особое. Он обеспечивает материализацию научных знаний, превращение науки в непосредственную производительную силу. Инженер работает в контакте с ученым и рабочим, нередко образуя вместе с ними высокоэффективные творческие бригады. Это обуславливает его значимость не только в процессе внедрения достижений науки в производство, но и в развитии творческой инициативы рабочих. Последнее наиболее характерно проявляется в массовом движении, которое развернулось под девизом «Рабочей инициативе – инженерную поддержку»²⁶.

7. «Практика нередко ставит перед наукой большие задачи, решение которых позволяет получить крупные, фундаментальные результаты в самой науке. Наряду с этим и ученые подчас предлагают такие разработки научных тем, которые сразу же приобретают большое практическое значение. Это прежде всего относится к лазерной технике.

Здесь наука достигла многого, и мы с вами должны добиться того, чтобы все это внедрялось в производство.

Но распространение новых идей, которые можно с успехом применять на практике в различных отраслях производства, в различных областях техники, просто невозможно без постоянных контактов между специалистами, постоянных связей между инженерами и учеными, и именно в налаживании таких контактов общества видят одну из главных своих задач. Они и сами стремятся поддерживать творческие связи с ведомствами и общественными организациями. ... У нас сегодня действует много объединенных советов, но еще больше осталось таких, которые было бы целесообразно объединить, превратить в постоянные места встреч инженеров с учеными, с руководителями производства. Нужно переходить к совместному составлению планов научных исследований, передавать в научно-технические общества перечни завершенных фундаментальных исследований и другие сведения о работах, ведущихся в

²⁴ Какой быть инженерной академии СССР // Вестник АН СССР. – 1991. – №. – С. 31-36.

²⁵ Материалы VI Всесоюзного съезда научно-технических обществ. – М.: Профиздат, 1983. – 64 с. – С. 22.

²⁶ Там же. – С. 20.

академиях. Особенно заинтересованы НТО в том, чтобы научно-исследовательские институты держали их в курсе выполняемых ими работ прикладного характера»²⁷.

8. «Выделяется прослойка людей, которые не производят материального продукта, а создают новые проекты, технологии и т. п. Но именно от их работы в значительной мере зависит уровень экономики. При развитой технике сделать любую вещь не проблема, проблема придумать эту вещь и изготовить ее с наименьшими затратами. Вот почему роль инженера будет постоянно возрастать. Но это не произойдет само по себе. Нужно решить, и притом кардинально, те противоречия, с которыми мы сегодня сталкиваемся. Наступила пора четко определить, кто может называться инженером, со всеми вытекающими отсюда выводами. Если в ближайшее время мы этого не сделаем, то и на решение проблем, связанных с инженерным трудом, надеяться не придется.

Можно выделить три категории ИТР:

- Инженеры-конструкторы, проектирующие объекты производства, технологическое оборудование, оснастку и другие технические средства.
- Инженеры-технологи, разрабатывающие технологические процессы и всю сопутствующую им технологическую документацию.
- Инженеры-производственники, в обязанность которых входит подготовка, планирование и организация производства»²⁸.

9. «Перестройку в работе НТО невозможно осуществить без изменения стиля и характера деятельности их руководящих органов. Эту задачу нельзя решить, ограничиваясь одними призывами. Надо добиться, чтобы работа в составе выборных органов обществ стала по-настоящему творческой, интересной, позволяла бы членам НТО в полной мере проявить свои способности. Это станет возможным в том случае, если в центре внимания будут наиболее актуальные проблемы, жизненно важные для организаций вопросы. Возможно ли это? Да, возможно. В истории отечественной науки и техники немало блистательных примеров общественной деятельности выдающихся ученых и инженеров. И это было для них не только выполнением общественного долга, но и прежде всего формой и способом пропаганды своих научных и гражданских идей, своей жизненной позиции».

10. «Инженер должен быть во всеоружии последних достижений науки»²⁹.

11. «Основное назначение инженера – творить»³⁰.

12. «Главное для инженера – развитие общества»³¹.

А.Ю. Ишлинский и возглавляемый им Союз НИО СССР выступили в роли учредителей Инженерной академии наук СССР (13 мая 1990 г.), он принимал

²⁷ Об укреплении творческих связей между организациями Академии наук СССР и научно-технических обществ в решении задач ускорения научно-технического прогресса // Вестник Академии наук СССР. – 1984. – №6. – С. 5-13.

²⁸ Ишлинский А.Ю. Инженерное братство // Техника – молодёжи. – 1987. – №1. – С. 22-25.

²⁹ Там же.

³⁰ Стенограмма заседания Президиума Всесоюзного совета научно-технических обществ от 29 октября 1986 г. – 63 с. – С. 30.

³¹ Ишлинский А. Главное для инженера - развитие общества // Инженерная газета. – 2001. – №28.

активное участие в ее создании, которая 24 декабря 1991 года была преобразована в Российскую инженерную академию. А.Ю. Ишлинский был её почётным президентом с момента образования и до конца своих дней.

Основательность теоретических исследований и неустанное стремление использовать фундаментальные разработки в инженерных проектах удачно сочетались с многолетней педагогической практикой Александр Юльевича.

А.Ю. Ишлинский придавал огромное значение вопросам развития высшего технического образования в стране.

Свою педагогическую деятельность А.Ю. Ишлинский начал со студенческих лет: с 1931 по 1938 г. – преподаватель Московского электромеханического техникума имени Л.Б. Красина. В 1938 году А.Ю. Ишлинский защитил кандидатскую диссертацию по теме «Трение качения», начал работу в МГУ в должности доцента кафедры теории упругости, в 1944 г. он стал профессором этой кафедры. В 1943-1945 годах – заведующий кафедрой теоретической механики в Московском военно-инженерном училище. В 1949 г. избран профессором кафедры теории упругости Механико-математического факультета Киевского государственного университета имени Т.Г. Шевченко, где работал до 1955 года.

В 1956 г. ректор МГУ И.Г. Петровский пригласил его возглавить кафедру прикладной механики на механико-математическом факультете университета, где впоследствии выросла научная школа по механике гироскопических и навигационных систем. Параллельно он преподавал во многих высших учебных заведениях Москвы: МВТУ имени Н.Э. Баумана, МЭИ, Автомеханическом институте, Педагогическом институте имени К. Либкнехта, Военно-инженерной Академии имени В.В. Куйбышева, Артиллерийской академии им. Ф.Э. Дзержинского и других вузах.

В 1964 году по его инициативе был создан Научно-методический совет по теоретической механике при Министерстве высшего и среднего специального образования СССР, а в 1965 году Ишлинский стал председателем совета, возглавляя его затем в течение многих лет.

Александр Юльевич был одним из организаторов и возглавил созданный в 1964 году Институт проблем механики АН СССР (ныне – ФГБУН Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН).

При А.Ю. Ишлинском ВСНТО развивалось и реформировалось. В крупных городах страны укреплялись региональные отделения ВСНТО и велось строительство новых домов науки и техники. Преобразование затронуло и название организации: ВСНТО преобразовано в Союз НИО СССР, а затем в Союз НИО.

Современники вспоминают, что «в конце 50-х и первой половине 60-х годов прошлого века он вел научные семинары как в институтах, где создавалась первая в мире работающая астроинерциальная система для крылатых ракет и самолетов, так и в институтах, где проектировалась инерциальная система для управления баллистическими ракетами. Значение этих семинаров трудно переоценить. Они служили базой для разработчиков, часто весьма смутные идеи

и технические предложения благодаря Александру Юльевичу обретали четкую формулировку. При этом происходило взаимное обогащение сторон.

Александр Юльевич практиковал свои фирменные научно-практические семинары для конструкторов новой техники с целью минимизировать временной промежуток между результатами научных исследований и разработанными на их основе инженерными проектами»³².

Академик А.Ю. Ишлинский являлся руководителем многих семинаров «Международное научно-техническое сотрудничество», организуемых Союзом НИО в зарубежных странах, например, в Турции в 1995 году, в Тунисе в 1996 году, на Кипре в 1997 году, в Италии в 1998 году. Практика организации семинаров за рубежом, в которых принимали участие руководители и представители высших учебных заведений и научно-технической сферы России и иностранные специалисты, широко практиковалась Российским Союзом НИО при участии Президента Союза НИО академика А.Ю. Ишлинского. С основным докладом на этих семинарах выступал академик А.Ю. Ишлинский, а программа этих семинаров также включала посещение ведущих предприятий и компаний по месту их проведения.

А.Ю. Ишлинский считал очень важным пробудить у молодежи интерес к технике, научиться простому изложению результатов научных исследований, в инженерной школе преодолевать, опираясь на знания, не только технические проблемы, но и психологический барьер.

Ученики и последователи А.Ю. Ишлинского используют и развивают его идеи, применяют полученные им результаты при проектировании, конструировании, изготовлении различного рода механических устройств и систем, развивают организованные им общественные структуры, продолжают его дело.

Уверенно можно отметить, что большие достижения выдающегося организатора инженерного дела, ученого и общественного деятеля академика А.Ю. Ишлинского достигнуты благодаря тому, что «Его творчество – это не только яркие ключевые работы, но и огромный систематический труд, последовательное решение многих вопросов для достижения поставленной цели».

Список литературы

1. Академик С.П. Королев. Ученый. Инженер. Человек. Творческий портрет по воспоминаниям современников: Сб. статей / Отв. ред.: Ишлинский А.Ю. – М.: Наука, 1986. – М.: Наука, 1986. – 520 с.
2. Александров В., Парусников Н. Развитие теории навигации и А.Ю. Ишлинский // Вестник Московского университета. Серия 1. Математика, механика. – 2013. – №1. – С. 51-53.
3. Ишлинский А. Главное для инженера – развитие общества // Инженерная газета. – 2001. – №28.
4. Ишлинский А.Ю. Инженерное братство // Техника – молодёжи. – 1987. – №. – С. 22-25.
5. Какой быть инженерной академии СССР // Вестник АН СССР. – 1991. – №1. – С. 31-36.
6. Крылов А.Н. Мои воспоминания. – 10-е изд., доп. – СПб.: Политехника, 2014. – 511 с.

³²Александров В., Парусников Н. Развитие теории навигации и А.Ю. Ишлинский // Вестник Московского университета. Серия 1. Математика, механика. – 2013. – №1. – С. 51-53.

7. Материалы VI Всесоюзного съезда научно-технических обществ. – М.: Профиздат, 1983. – 64 с.
8. Металлические конструкции академика В.Г. Шухова: сб. ст. / АН СССР, Ин-т истории естествознания и техники, Комис. по увековечению памяти В.Г.Шухова / Отв. ред. В.П. Мишин. – М.: Наука, 1990. – 109 с.
9. Научно-технические общества СССР: Ист. очерк. – М.: Профиздат, 1968. – 455 с.
10. Об укреплении творческих связей между организациями Академии наук СССР и научно-технических обществ в решении задач ускорения научно-технического прогресса // Вестник Академии наук СССР. – 1984. – №6. – С.5.-13.
11. Стенограмма заседания Президиума Всесоюзного совета научно-технических обществ от 29 октября 1986 г. – 63 с.
12. Торжественный Пленум Всесоюзного совета научно-технических обществ 17 ноября 1966 г.: стенографический отчет. – М.: Профиздат, 1967. – 32 с.
13. Шухов Владимир Григорьевич (1853-1939). Избранные труды: строительная механика / В.Г. Шухов; под ред. акад. А. Ю. Ишлинского; Акад. наук СССР, Институт истории, естествознания и техники, Комиссия по увековечению памяти почетного акад. В.Г. Шухова. – М.: Наука, 1977. – 192 с.

ЕЩЁ РАЗ ОБ АЛЕКСАНДРЕ ЮЛЬЕВИЧЕ ИШЛИНСКОМ

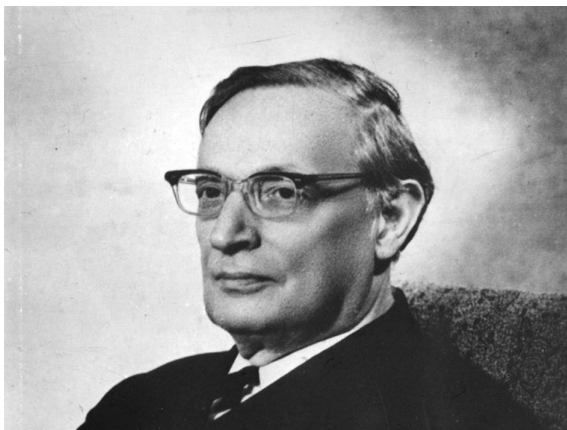
Гусев Б.В., Саурин В.В.

Российская инженерная академия;

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

Ключевые слова: академик А.Ю. Ишлинский, семья, научные достижения, образовательные инициативы, Российская инженерная академия.

Аннотация. Александр Юльевич Ишлинский – выдающийся ученый-механик XX века, автор фундаментальных исследований в области механики, динамики, инерциальной навигации. Свой талант ученого, инженера, педагога он направил на создание перспективных направлений в различных отраслях науки. В статье приводятся исторические данные о семье Александра Юльевича, которая послужила фундаментом дальнейшего формирования его как выдающего ученого и организатора научных исследований в России. Большое значение А.Ю. Ишлинский придавал постановке высшего технического образования в стране, развитию инженерного дела. Александр Юльевич выступил одним из основных создателей Инженерной академии СССР, в дальнейшем – Российской инженерной академии.



Александр Юльевич Ишлинский – выдающийся ученый-механик XX столетия, автор фундаментальных исследований в области механики деформируемых сред, динамики твердых тел, гироскопии и инерциальной навигации, создавший новые направления в разделах науки, которым он посвятил свой талант ученого, инженера, педагога.

А.Ю. Ишлинский родился 24 июля (6 августа) 1913 года в Москве.

Александр Юльевич происходил из старинной дворянской семьи. Его отец, Юлий Эдуардович был морским офицером; во время русско-японской войны (1905) служил машинным квартирмейстером крейсера «Богатырь», позже был лишен дворянского звания, отсидел два года в одиночной камере в петроградской тюрьме «Кресты» за участие в Кронштадтском восстании моряков 1906 года. Мать, Софья Ивановна Кириллова была в молодости модисткой в шляпном ателье. Дед, Эдуард Ишлинский был родом из Литвы, его предки жили в Литве, родовое имение Ишлины находилось на Жямайской возвышенности близ

Пошиле (лит. Pašiliai) под Каунасом. Бабушка, Августа Иогановна Штраус, с восьми лет жила в Москве.

Интерес к науке у А.Ю. Ишлинского проявился еще в школьные годы, особенно сильным было его увлечение радиотехникой. Уже тогда была опубликована первая статья «Штепсель для переключения на длинные и короткие волны» («Новости радио», 1926), где он описал изобретённый им оригинальный переключатель радиоприёмника. В 1928 году, сразу после окончания семилетней школы, он поступил на Электротехнические курсы, затем – в Московский электромеханический техникум имени Л.Б. Красина, который успешно окончил в 1930 году. После этого Александр Юльевич заведовал в техникуме кабинетом технического черчения, а в 1931-1938 гг. был преподавателем этого техникума. В 1931 году, изучив экстерном программу первого курса, он поступил сразу на второй курс в Московский университет. Одногруппником А.Ю. Ишлинского был будущий академик Ю.Н. Работнов. В Московском университете Александр Юльевич обучался у Б.В. Булгакова, Н.Н. Бухгольца, В.В. Голубева, М.А. Лаврентьева, Л.С. Лейбензона, А.П. Минакова, А.И. Некрасова, И.Г. Петровского, Н.А. Слезкина, В.В. Степанова, М.М. Филоненко-Бородича (руководитель его дипломной работы «Задача об эластике»). Обучение было не простым: его первый научный руководитель Л.С. Лейбензон был арестован 10 июля 1936 года и затем выслан в Казахстан, второй – А.И. Некрасов был арестован 10 января 1938 года (по необоснованному обвинению в «соучастии в антисоветской, вредительско-диверсионной, шпионской организации в ЦАГИ», а затем осужден на 10 лет лишения свободы). Во время учебы он прошел большую производственную практику на авиационных заводах и в конструкторском бюро «Дирижаблестрой». Находил время и для общественной работы, спорта и играл на скрипке в студенческом оркестре. В 1935 году А.И. Ишлинский окончил механико-математический факультет университета и поступил в аспирантуру.

А.Ю. Ишлинского всегда отличало стремление к практическим задачам. В 1937 году им были опубликованы статьи «Теория движения прицепа трактора», «Задача о скорости косыбы злаков», «О захватывающей способности шпинделя» (все в журнале «Сельскохозяйственная машина»).

В 1938 году он защитил диссертацию на тему «Трение качения» (о движении катка по релаксирующему и вязкопластическому грунту) и получил степень кандидата физико-математических наук. Был оставлен в Университете, работал доцентом кафедры теории упругости. Одновременно с работой в МГУ преподавал в ряде вузов Москвы: в МВТУ, МЭИ, МФМИ, Московском индустриально-педагогическом институте, Военно-инженерной академии имени В. В. Куйбышева и др. В Артиллерийской академии им. Ф.Э. Дзержинского читал курс лекций по механике, в связи с чем заинтересовался теорией гироскопов и с 1940 года началась его работа в этой области. В Германии к работе по созданию гирокомпасов были привлечены лучшие ученые и даже А. Эйнштейн. Александр Юльевич с гордостью рассказывал, что не им, а ему удалось создать точную теорию пространственного гирокомпаса и двухгироскопической вертикали. В дальнейшем, большинство отечественных гироскопических приборов и систем

было разработано при непосредственном участии Ишлинского. Он стал крупнейшим специалистом страны в этой области. Результаты его исследований вошли в фундаментальные монографии «Механика специальных гироскопических систем» (1952), «Механика гироскопических систем» (1963), «Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация» (1976). Показательно, что 12 статей для Большой советской энциклопедии (1971), посвященные гироскопам и их приложениям, написаны А.Ю. Ишлинским (в соавторстве с С.С. Ривкиным).

Большую роль в развитии исследовательского дара Ишлинского сыграло знакомство с академиком А.Н. Крыловым, глубокое уважение к которому Александр Юльевич сохранил на всю жизнь. Как-то, уже в преклонном возрасте Ишлинский подал пальто Ю.Г. Мартыненко и заметив его смущение добавил: «Не волнуйтесь. Меня одевал сам А.Н. Крылов».

Основное место в научных интересах А.Ю. Ишлинского в 1940-е годы продолжали занимать проблемы теории упругости и пластичности. С 1940 года в течение 25 лет он работал в судостроении и приборостроительной промышленности. В 1943 году, в годы Великой Отечественной войны Александр Юльевич защитил докторскую диссертацию на тему «Механика не вполне упругих и вязкопластических тел». В 1944 году он стал профессором МГУ по кафедре теории упругости. В 1943-1945 гг. был заведующим кафедрой теоретической механики в Московском военно-инженерном училище. В 1945-1946 гг. работал в Институте механики АН СССР. В 1947 году М.А. Лаврентьев пригласил А.Ю. Ишлинского на работу в Киев. В 1948 году его избрали действительным членом Украинской академии наук. Сменив М.А. Лаврентьева, он возглавил Институт математики Украинской академии наук (1948-1955), затем заведовал отделом общей механики института (1956-1965). В 1949-1955 годах он также работал профессором кафедры теории упругости Киевского университета. Много работал по взрывной тематике. Наиболее ярким результатом, полученным в это время, является обоснование экспериментально открытой М.А. Лаврентьевым «потери устойчивости по высшим гармоникам». Так, например, ударно сжатый с концов стержень не выгибается дугой, а приобретает волнообразную форму «гармошка». Проведенное исследование позволило объяснить, почему конструкции могут выдерживать кратковременные нагрузки, многократно превышающие пределы их устойчивости. Позднее Ишлинский положил в основу исследования устойчивости упругих и неупругих систем анализ изменения во времени формы, связанный с ростом начальных отклонений, что дало возможность решить вопрос о потере устойчивости стержней и пластин при развитии высших гармоник. Именно постановке задач устойчивости с точки зрения теории упругости посвящена опубликованная в 1954 году вторая ключевая работа А.Ю. Ишлинского в данной области. Следуя Л.С. Лейбензону, он показал, что граничные условия надо выставлять на уже деформированной поверхности – вполне естественное в наше время требование, позволяющее получать решение вопросов устойчивости строгими методами теории упругости. В 1955 году А.Ю. Ишлинский вернулся в Москву, но до последних дней жизни сохранял тесные творческие научные связи со своими киевскими коллегами и учениками.

Ишлинский не был кабинетным ученым, он был очень подвижным и энергичным человеком, трудно найти место на Земле, которое он бы не посетил. Летом 1955 года А.Ю. Ишлинский принял участие в экспедиции к Земле Франца-Иосифа. Изучив на практике поведение гироскопических приборов в условиях длительного плавания в полярных широтах, он построил строгую теорию гирогоризонткомпыаса. Александр Юльевич встречался со многими известными людьми: космонавтами, главами государств, членами королевских семей. Дружил с нобелевским лауреатом академиком П.Л. Капицей и чемпионом мира по шахматистам, гроссмейстером В.В. Смысловым. Сам был увлеченным шахматистом. Радовался проявлениям жизни, умел подмечать ее закономерности, находил задачи механики, стоя, например, на смотровой площадке делового центра Нью-Йорка, «озадачивал» коллег и радовался, если удавалось находить решение. Любил парадоксальные задачи. Его суждения врезались в память: как-то проезжая Ленинские горы в виду воссозданного храма Христа Спасителя, он заметил: «А вы знаете, прежний храм был светлее».

В 1950-х годах начинается активное участие А.Ю. Ишлинского в осуществлении ракетно-космических программ СССР, проводившихся под общим инженерным руководством Сергея Павловича Королёва. Александр Юльевич принимал – вместе с М.В. Келдышем – личное участие в работах Государственной комиссии, при подготовке и проведении большинства лётных испытаний ракет и первых запусков искусственных спутников Земли и других космических аппаратов на созданном в 1955 году космодроме Байконур. Наиболее тесно он сотрудничал с главными конструкторами Н.А. Пилюгиным и В.И. Кузнецовым. В этот период А.Ю. Ишлинский публикует значительное число работ, в которых развивает теорию гироскопических приборов и устройств как систем взаимосвязанных твёрдых тел с учётом их конструктивных и технических особенностей, изучает динамику гироскопических систем в реальных условиях их эксплуатации. Он исследовал геометрию и кинематику систем гироскопической стабилизации, неголономные движения гироскопических систем, влияние вибраций на работу гироприборов. Результаты исследования уходов гироскопических систем при вибрациях и решение вопроса о жёсткости крепления приборов на корпус подвижных ускоряющихся объектов оказались исключительно важными для практики. А.Ю. Ишлинским была предложена рациональная форма составления уравнений движения сложных гироскопических систем, образованных набором последовательно соединённых рамок кардановых подвесов, построена теория ряда гироскопических устройств: пространственного гироскопического компаса, двухгироскопной вертикали, гироскопического креновыравнивателя, гироскопического маятника и др. Изучил явления, связанные с упругими деформациями элементов конструкций гироскопических систем.

В 1956 году ректор МГУ И.Г. Петровский пригласил его возглавить кафедру прикладной механики на механико-математическом факультете Университета, которую Александр Юльевич возглавлял до самой смерти в 2003 году (в 1993 году название кафедры было изменено на «кафедра прикладной механики и управления»). А.Ю. Ишлинский читал оригинальные курсы по общей

механике, теории упругости и инерциальной навигации. Созданный им при активном участии В.И. Борзова и Н.П. Степаненко годовой курс «Динамика систем твёрдых тел и гироскопы» остаётся обязательным для студентов кафедры прикладной механики и управления (после кончины А.Ю. Ишлинского чтение курса перешло к Н.П. Степаненко и В.В. Тихомирову). Организовал спецсеминар по теории гироскопов. В последствии, на кафедре выросла научная школа по механике гироскопических и навигационных систем. Среди воспитанников кафедры известные ученые: В.Д. Андреев, Е.А. Девянин, И.В. Новожилов, Н.А. Парусников, Д.М. Климов, Ю.К. Жбанов, В.В.Александров, Ю.Г. Мартыненко, М. Р. Либерзон и др. Также Ишлинский вошёл в первоначальный состав Национального комитета СССР по теоретической и прикладной механике (1956).

В исследованиях 1956-1957 годов, посвящённых анализу относительного равновесия физического маятника, теории гирогоризонткомпаса и двухгироскопной гировертикали, А.Ю. Ишлинский получил относительно простые и вполне строгие дифференциальные уравнения прецессионного движения в угловых переменных. Он установил основное условие невозмущаемости двухроторного гироскопа, при выполнении которого ось «центр тяжести – центр подвеса» гиросферы для произвольного движения точки подвеса по поверхности Земли направлена по геоцентрической вертикали, а векторная сумма собственных кинетических моментов обоих гироскопов лежит в горизонтальной плоскости и при этом ортогональна вектору абсолютной скорости точки подвеса. А.Ю. Ишлинским было также показано, что уравнения малых движений гирогоризонткомпаса не распадаются на две независимые подсистемы, а представляют собой единую систему из четырёх линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами; он получил решение данной системы в квадратурах при произвольном движении точки подвеса по поверхности Земли для случая, когда можно пренебречь отличием силы тяжести от силы гравитационного притяжения. А.Ю. Ишлинскому принадлежит ставшая уже классической теорема о накоплении телесного угла («угла Ишлинского»)(1952): если жёстко связанная с абсолютно твёрдым телом ось при движении тела описывает в неподвижной системе отсчёта замкнутую коническую поверхность и при этом проекция вектора угловой скорости тела на данную ось всё время остаётся равной нулю, то после возвращения этой оси в исходное положение тело окажется повернутым вокруг неё на угол, численно равный телесному углу описанного конуса. Теорема позволяет рассчитывать точность стабилизации различного рода подвижных объектов. Данный эффект, помимо механики гироскопических систем, нашёл применение в поляризационной оптике, в специальной теории относительности. Полученные А.Ю. Ишлинским научные результаты оказали большое влияние на развитие отечественной морской и космической навигационной техники. Развил теорию инерциальной навигации на земной сфере. Он впервые систематически изложил математические основы способов инерциального управления полётом баллистических ракет. Результатом работ по созданию теории инерциальных навигационных систем явилось создание в СССР одной из первых мехатронных

систем, в которых для управления движением подвижного объекта применялись счётно-решающие устройства.

В конце 1959 года Ишлинский стал директором воссозданного после некоторого перерыва Института механики МГУ, близость которого к механико-математическому факультету Университета определяла широкую тематику работы. Александр Юльевич не относился к тому типу руководителей научных коллективов, которые берутся руководить по всем научным направлениям. Им были приглашены заместители по науке, среди них Г.Г. Черный, возглавивший вскоре Институт в связи с переходом Ишлинского на другую работу. В эти годы Александр Юльевич был очень дружен с академиком Л.И. Седовым. Говоря о значении механики, Ишлинский подчеркивал, что многие важнейшие открытия в истории человечества были сделаны именно в ходе решения механических задач. Так, обнаружение Кеплером явления движения планет по эллиптическим орбитам привело к открытию закона всемирного тяготения. Открытие Резерфордом структуры атома было сделано при анализе движения заряженной частицы в поле ядра атома. В теории оптимального управления, создание которой стало крупным успехом науки двадцатого века, существенно использовались идеи аналитической механики. Воздействие этих идей оказало значительное влияние на становление современных термодинамики, электродинамики, квантовой теории поля. Принципы и методы теоретической механики, ее расчетные алгоритмы широко проникли во все области техники, в биологию и медицину. Свои взгляды на основные понятия и закономерности механики Ишлинский изложил в книге «Классическая механика и силы инерции» (1987). В области общей механики А.Ю. Ишлинским и его учениками была открыта и развита её новая глава – движение твёрдого тела, подвешенного на струне (абсолютно гибкой невесомой нити).

В 1960 году А.Ю. Ишлинский был избран академиком АН СССР. Александр Юльевич был одним из организаторов и возглавил созданный в 1964 году Институт проблем механики АН СССР, работа в котором стала главным делом всей оставшейся его жизни. Обладая тонкой интуитивной оценкой людей, он считал, что с пополнением штатов Института торопиться не стоит, Институт, как живой организм, должен прирастать кадрами естественно. Пост директора Института сравнивал с постом капитана корабля. Он был в курсе всех выполнявшихся в Институте работ, самостоятельно перерабатывал обзорные доклады о достижениях института из представленных ему материалов, внося много своего. В 1990 году на посту директора института его сменил Д.М. Климов.

Профессор А.В. Аксёнов вспоминал, как А.Ю. Ишлинский на встрече со студентами механико-математического факультета МГУ в присутствии гроссмейстера Е.П. Геллера рассказывал историю «Шахматы спасли мне жизнь». 24 октября 1960 года Александр Юльевич находился на космодроме Байконур, где готовился первый пуск ракеты «Р-16». Пуск откладывался, и Ишлинский решил отлучиться, чтобы сыграть партию в шахматы. В это время на космодроме произошла катастрофа, которая считается одним из самых печальных инцидентов в истории советского ракетостроения – при подготовке к первому пуску

межконтинентальной баллистической ракеты Р-16 произошло самопроизвольное включение второй ступени, а вслед за этим взрыв и гигантский пожар, из-за которых погибли более 100 человек, среди них – Главнокомандующий ракетными войсками стратегического назначения СССР маршал М.И. Неделин, заместитель министра общего машиностроения СССР Л.А. Гришин, многие конструкторы и военные.

Большое значение придавал А.Ю. Ишлинский постановке высшего технического образования в стране. Интересны педагогические приемы Ишлинского. Он считал, что лучше решить одну и ту же задачу на различных моделях – без трения, с сухим трением, с вязким трением, а не три разных задачи одним методом. Его аспиранты перепроверяли результаты друг друга перед тем, как представлять их в научные издания и т.д. Александр Юльевич очень верил в талантливость отечественных научных кадров, говорил, что отечественное образование, должным образом организованное, сможет преодолеть любой «отток мозгов» за рубеж путем подготовки молодых кадров.

В 1964 году по его инициативе был создан Научно-методический совет по теоретической механике при Министерстве высшего и среднего специального образования СССР, а в 1965 году Александр Юльевич занял пост председателя этого совета, возглавляя его затем в течение многих лет (в 1991 году председателем совета по рекомендации А.Ю. Ишлинского стал Ю.Г. Мартыненко, а сам Александр Юльевич был в последние годы своей жизни почётным председателем совета). Совет координировал научную и методическую деятельность кафедр теоретической механики вузов страны, регулярно проводил совещания-семинары заведующих кафедрами, студенческие олимпиады, издавал Сборник научно-методических статей по теоретической механике. Решающее значение Александр Юльевич придавал именно фундаментальности преподавания механики, позволяющей подготовить специалистов, умеющих самостоятельно разбираться в любых задачах, избежать опасности от сенсационных изобретений, противоречащих объективным законам окружающего мира – «гравилетов», «инерциоидов», «торсионных полей» и др. Руководя работой совета, Александр Юльевич всегда подчёркивал и отстаивал исключительную роль теоретической механики как базовой фундаментальной дисциплины, борясь с многочисленными попытками сократить её преподавание или даже вовсе исключить её из вузовских программ.

С 1971 года Ишлинский был вице-президентом (в 1987-1991 гг. – президентом) исполкома Всемирной федерации инженерных организаций, проводил большую научно-организационную работу.

В 1970-1991 гг. он являлся председателем Всесоюзного совета научно-технических обществ.

Научная деятельность А.Ю. Ишлинского разнообразна и объёмна. Основные труды А.Ю. Ишлинского относятся к общей механике, динамике твёрдого тела и гироскопов, теории систем инерциальной навигации, теории упругости, теории пластичности, механике систем с трением. В каждой из перечисленных областей им были получены основополагающие результаты, решены важные для практики сложнейшие проблемы. Александр Юльевич автор

фундаментальных исследований, создавший новые направления в тех разделах науки, которым посвятил свой талант учёного и инженера. Как отмечал академик В. А. Садовничий, важнейшей особенностью научного творчества А.Ю. Ишлинского было свойственное Московской инженерно-механической школе Н.Е. Жуковского сочетание теоретической фундаментальности с инженерной интуицией, которое позволяет искусно решать сложные практические задачи и выявлять новые эффекты, опираясь на строгий математический подход.

Научное творчество Александра Юльевича Ишлинского характеризует широта и разнообразие интересов – от вопросов, имеющих фундаментальное значение для теории, до конкретных прикладных задач. А.Ю. Ишлинскому принадлежат более 300 научных публикаций, им написаны фундаментальные монографии, в которых изложены сложнейшие вопросы многих разделов механики. Вот некоторые из них:

Монографии:

Ишлинский А.Ю. Механика специальных гироскопических систем. – Киев: Изд-во АН УССР, 1952. – 432 с.

Ишлинский А.Ю. Механика гироскопических систем. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 482 с.

Ишлинский А.Ю. Инерциальное управление баллистическими ракетами. – М.: Наука, 1968. – 142 с.

Ишлинский А.Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. – М.: Наука, 1976. – 670 с.

Ишлинский А.Ю., Борзов В.И., Степаненко Н.П. Лекции по теории гироскопов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983. – 248 с.

Ишлинский А.Ю. Механика относительного движения и силы инерции. – М.: Наука, 1981. – 191 с.

Ишлинский А.Ю. Механика: идеи, задачи, приложения. – М.: Наука, 1985. – 624 с.

Ишлинский А.Ю. Классическая механика и силы инерции. – М.: Наука, 1987. – 320 с.

Ишлинский А.Ю., Стороженко В.А., Темченко М.Е. Вращение твёрдого тела на струне и смежные задачи. – М.: Наука, 1991. – 330 с.

Александров В.В., Воронин Л.И., Глазков Ю.Н., Ишлинский А.Ю., Садовничий В.А. Математические задачи имитации аэрокосмических полётов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. – 160 с.

Ишлинский А. Ю., Ивлёв Д.Д. Математическая теория пластичности. – М.: Физматлит, 2001. – 704 с.

Ишлинский А.Ю. Теоретическая механика. Архивная копия от 26 августа 2019 на Wayback Machine.

Ишлинский А.Ю. Классическая механика и силы инерции. Архивная копия от 26 августа 2019 на Wayback Machine.

Ишлинский А.Ю., Чёрный Г.Г. Основы теории оптимального проектирования конструкций. Архивная копия от 26 августа 2019 на Wayback Machine.

Статьи:

Динамика твёрдого тела и гироскопов:

Ишлинский А.Ю. Об относительном равновесии физического маятника с подвижной точкой опоры // Прикл. математика и механика. – 1956. – Т. 20, вып. 3. – С. 297-308.

Ишлинский А.Ю. К теории гирогоризонткомпаса // Прикл. математика и механика. – 1956. – Т. 20, вып. 4. – С. 487-499.

Ишлинский А.Ю. К теории гироскопического маятника // Прикл. математика и механика. – 1957. – Т. 21, вып. 1. – С. 3-14.

Ишлинский А.Ю., Стороженко В.А., Темченко М.Е. К исследованию устойчивости высокоскоростной центрифуги на электромагнитной подвеске // Изв. РАН. Механика твёрдого тела. – 1998. – № 3. – С. 197-208.

Инерциальная навигация:

Ишлинский А.Ю. Об уравнениях задачи определения местонахождения движущегося объекта посредством гироскопов и измерителей ускорений // Прикл. математика и механика. – 1957. – Т. 21, вып. 6. – С. 725-739.

Ишлинский А.Ю. Геометрическое рассмотрение устойчивости решения основной задачи инерциальной навигации // Инженерный журнал. Механика твёрдого тела. – 1968. – № 3. – С. 12-16.

Бойчук О.Ф., Ишлинский А.Ю., Стороженко В.А. Построение функции Ляпунова для совокупности уравнений основной задачи инерциальной навигации // Изв. АН СССР. Механика твёрдого тела. – 1975. – № 5. – С. 13-18.

Механика систем с трением:

Ишлинский А.Ю. Трение качения // Прикл. математика и механика. – 1938. – Т. 2, вып. 2. – С. 245-260.

Ишлинский А.Ю., Крагельский И.В. О скачках при трении // Журнал технической физики. – 1944. – Т. 14, вып. 4/5. – С. 276-282.

Ишлинский А.Ю., Соколов Б.Н., Черноусько Ф.Л. О движении плоских тел при наличии сухого трения // Изв. АН СССР. Механика твёрдого тела. – 1981. – № 4. – С. 17-28.

Ишлинский А.Ю., Крагельский И.В., Алексеев Н.М., Блюмен А.В., Добычин М.И. Проблемы изнашивания твёрдых тел в аспекте механики // Трение и износ. – 1986. – Т. 7, № 4. – С. 581-592.

Грудев А.И., Ишлинский А.Ю., Черноусько Ф.Л. О движении точки по вращающейся шероховатой плоскости // Прикл. математика и механика. – 1989. – Т. 53, вып. 3. – С. 372-381.

Теория упругости:

Лаврентьев М.А., Ишлинский А.Ю. Динамические формы потери устойчивости упругих систем // Доклады Академии наук. – 1949. – Т. 64, № 6. – С. 779-782.

Ишлинский А.Ю. Рассмотрение вопросов об устойчивости равновесия упругих тел с точки зрения математической теории упругости // Украинский математический журнал. – 1954. – Т. 6, № 2. – С. 140-146.

Баничук Н.В., Ишлинский А.Ю. О некоторых особенностях задач устойчивости и колебаний прямоугольных пластин // Прикл. математика и механика. – 1995. – Т. 59, вып. 4. – С. 620-625.

Теория пластичности:

Ишлинский А.Ю. Об устойчивости вязко-пластического течения полосы и круглого прута // Прикл. математика и механика. – 1943. – Т. 7, вып. 2. – С. 109-130.

Ишлинский А.Ю. Осесимметричная задача пластичности и проба Бринелля // Прикл. математика и механика. – 1944. – Т. 8, вып. 3. – С. 201-224.

Ишлинский А.Ю. Общая теория пластичности с линейным упрочнением // Украинский математический журнал. – 1954. – Т. 6, № 3. – С. 314-324.

Ишлинский А.Ю. О плоском движении песка // Украинский математический журнал. – 1954. – Т. 6, № 4. – С. 430-441.

Баренблатт Г.И., Ишлинский А.Ю., Черноусько Ф.Л. Об ударе вязко-пластического стержня о жёсткую преграду // Прикл. математика и механика. – 1962. – Т. 26, вып. 3. – С. 497-502.

Ивлев Д.Д., Ишлинский А.Ю., Максимова Л.А. Условия изотропии и обобщённый ассоциированный закон пластического течения // Доклады Академии наук. – 2000. – Т. 371, № 1. – С. 49-51.

Ивлев Д.Д., Ишлинский А.Ю. Статически определяемые соотношения теории пластичности и предельное состояние и разрушение тел // Изв. РАН. Механика твёрдого тела. – 2003. – № 3. – С. 84-90.

А.Ю. Ишлинский вел громадную издательскую работу. Много лет был главным редактором журнала «Известия РАН. Механика твердого тела». Был членом редакционной коллегии журнала «Прикладная математика и механика», членом редакционной коллегии подсерии «Памятники истории науки» серии «Классики науки» РАН (издательство «Наука»). Вместе с А.И. Целиковым, Г.А. Николаевым и другими членами АН СССР принимал активное участие в создании Инженерной академии СССР.

Александр Юльевич Ишлинский был удостоен:

Звания Героя Социалистического Труда (1961), Ордена Ленина (1956, 1973, 1981), Ордена Октябрьской Революции (1975), Ордена Трудового Красного Знамени (1957, 1969), Ордена «Знак Почёта» (1954), Ордена Дружбы народов (4 августа 1993 года), Благодарности Президента Российской Федерации (13 октября 1998 года), Ордена «Кирилл и Мефодий» I степени (НРБ, 1970), Ленинской премии (1960), Государственной премии СССР (1981), Государственной премии Российской Федерации (1996), Премии имени Н. Н. Острякова (Минсудпром СССР, 1975), Премии имени А. Н. Динника (АН УССР, 1981).

А.Ю. Ишлинский являлся Заслуженным профессором МГУ (1994), Заслуженным профессором КГУ (1989).

Российским национальным комитетом по теоретической и прикладной механике в 2013 году была учреждена премия имени академика А.Ю. Ишлинского (с медалью). Премии присуждаются ежегодно, на основании открытого конкурса, гражданам Российской Федерации за выдающиеся научные

достижения в области общей и прикладной механики. Учреждена также премия имени академика А.Ю. Ишлинского для молодых ученых, возраст лауреата не должен превышать 35 лет на момент присуждения премии.

Александр Юльевич оставил неизгладимый след в науке, его достижения вошли в золотой фонд механики. Благодаря его трудам отечественные баллистические ракеты получили более качественные системы навигации, развилась теория гироскопов, были запущены многие космические аппараты, включая первые спутники Земли.

Если отмечать человеческие качества, Александру Юльевичу были присущи острота мысли, компетентность, корректность, доброжелательность. Лишенный напыщенности и важности, Александр Юльевич просил не переоценивать звание академика. С присущим ему юмором говорил, что член-корреспондент – это неплохой ученый, рядом с которым можно поставить десяток столь же хороших (а может быть, и лучше), но ему повезло, а академик – такой же ученый, но ему повезло еще больше. Он обладал исключительно мощным интеллектом, поразительной научной интуицией. Его суждения были глубоко осмыслены, оценка событий и людей была трезвой и взвешенной. Он сам определил свое место и отношение к жизни: ученый не политик, он должен заниматься своими делами и на окружающий мир влиять, в основном, с помощью открытых им законов природы. Тогда меньше претензий к обществу, больше – к самому себе.

А.Ю. Ишлинский оставил пример исключительно высокой требовательности к себе и бесконечной доброжелательности к людям.

Умер Александр Юльевич 07 февраля 2003 года.

Могила А.Ю. Ишлинского находится на Введенском кладбище города Москвы (20-й участок).

Список литературы

1. Журнал «Механика твердого тела». №5. 2013 год [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mtt.ipmnet.ru/ru/Issues/2023/4/178>
2. Ишлинский А.Ю. Биография [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ru/wiki/352036>
3. Газета «Московский университет». Воспоминания о А.Ю. Ишлинском. Лекция в мемориальном кабинете Л.И. Седова [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.getmedia.msu.ru/newspaper/newspaper/4196/all/rodod.htm>
4. Ишлинский А.Ю. Награды и звания [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bigenc.ru/c/ishlinskii-aleksandr-iul-evich-f1e22c>
5. Ишлинский А.Ю. Биография [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Ишлинский,_Александр_Юльевич
6. Научная Россия. Ишлинский А.Ю. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://scientificrussia.ru/articles/v-1913-g-rodilsa-vydausijsa-ucenyj-mehanik-aleksandr-islinskij>
7. Ишлинский А.Ю. Биография [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sites.google.com/site/oilindustry95/i/ishlinskij-aleksandr-ulevic>
8. Механика и прикладная математика. Ишлинский А.Ю. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mechmath.ipmnet.ru/mech/biography/Ishlinsky/>
9. Герои страны. Ишлинский А.Ю. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://warheroes.ru/hero/hero.asp?Hero_id=15450

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ СОВЕТ ПО ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МЕХАНИКЕ – ДЕТИЩЕ А.Ю. ИШЛИНСКОГО

Самсонов В.А.

НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова

Ключевые слова: теоретическая механика, научно-методический совет, фундаментальное образование, учебный процесс, методическое обеспечение.

Аннотация. В 60-х годах А.Ю. Ишлинский как выдающийся ученый в области теоретической механики инициировал создание при Минвузе СССР научно-методического совета (НМС) по теоретической механике, целью которого было совершенствование фундаментального образования и форм организации учебного процесса по теоретической механике, методическое обеспечение преподавания этой дисциплины в системе многоуровневого образования. Дополнительно А.Ю. Ишлинский стремился к тому, чтобы руководили этим процессом специалисты по теоретической механике.

А.Ю. Ишлинский ещё в 60-х годах прошлого столетия ощутил давление на преподавание основного инженерного курса теоретической механики со стороны смежников. Для оказания сопротивления этому процессу он инициировал создание при Минвузе СССР научно-методического совета (НМС) по теоретической механике. Задачей совета было совершенствование содержания фундаментального образования и форм организации учебного процесса по теоретической механике, обеспечения методического единства содержания, форм и средств её преподавания в системе многоуровневого образования. Дополнительно А.Ю. Ишлинский стремился к тому, чтобы руководили этим процессом специалисты именно по теоретической механике. Ведь именно теоретическая механика вводит студентов в область механико-математического моделирования, прокладывая связи между математикой, физикой и техникой.

К сожалению, большинство кафедр теоретической механики в технических вузах не были выпускающими. А ставить на руководство кафедрами выпускников других вузов не хотело их руководство. Это и другие тенденции, в частности, исключение предмета из ГОСТА привело к тому, что во многих вузах исчезли не только кафедры теоретической механики, но и сам предмет. Его заменили то на техническую механику, то на классическую механику, то на аналитическую и т.д. Странно, что в числе показателей для аттестации вуза была графа – участие в олимпиадах по теоретической механике, которую уже практически не преподавали. На недостаток знаний теоретической механики у выпускников вузов жалуются уже более 10-лет, в частности, на XI-м съезде в Казани и на ряде отраслевых конференций.

Тем не менее, НМС продолжает функционировать, правда, на уровне энтузиастов, понимающих важность проблемы.

Работа Совета ведётся по ряду направлений:

1. Организация и проведение Всероссийских и региональных семинаров и совещаний заведующих кафедрами теоретической механики и ведущих лекторов. К сожалению, число таких кафедр в последнее время резко сократилось, и лекции читают сотрудники других, иногда междисциплинарных, кафедр. Тем не менее, НМС смог организовать несколько таких мероприятий: в рамках Казанского

съезда по теоретической и прикладной механике в 2014 г., совещание в Махачкале в 2016-м году, в рамках 1-й международной конференции «Проблемы механики и управления» в Махачкале в 2018-м году. Ежегодно организуется секция на чтениях памяти Н.Е. Жуковского в МГТУ им. Баумана.

2. Подготовка и выпуск сборников научно-методических статей «Теоретическая механика», №№ 29 (2015), 30 (2018), 31 (2020).

3. Работа с молодёжью. Подготовка и проведение студенческих олимпиад по теоретической механике, участие в которых составляло позицию в аттестации технических вузов. К сожалению, многие вузы заменяют это участием в олимпиадах по другим предметам (например, по сопромату), т.к. заведующие соответствующих кафедр имеют другие специальности.

4. Обсуждение вопросов модернизации учебного процесса с привлечением современных информационных технологий.

5. Проведение регулярных заседаний президиума НМС (с 2018-го года проведено 20 заседаний).

6. Оценка качества учебно-методической литературы. После «монетизации» акта грифования изданий эта функция была у совета отнята, но некоторые издательства продолжают обращаться в совет за одобрением того или иного пособия.

На совещании в Махачкале участвовало свыше 30-ти преподавателей, из европейской части России, из Екатеринбурга – 3, из Омска – 1, из ДНР (Донецк) – 2. Было принято Решение, в котором отмечено значительное снижение качества преподавания теоретической механики в вузах из-за исключения этого предмета из стандартов, обязательных для технических вузов России. Это решение было поддержано президиумом Национального комитета по теоретической и прикладной механики и руководством Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН [1, с. 1-3] и направлено в высшие инстанции. Однако, положительной реакции не последовало. Более того, из списка выпускных специальностей выпало то, что раньше называлось «Квалификация – механика». Остался вопрос: кого же брать в аспирантуру на новую специальность «Теоретическая механика. Динамика машин»? Да, и на другие разделы механики. Математиков? Важно отслеживать эволюцию подобных вопросов в рамках грядущей реформы высшего образования РФ.

Список литературы

1. Сборник научно-методических статей. Теоретическая механика. Вып. 30. / Под ред. проф. В.А. Самсонова. – М.: Изд-во Московского университета, 2018.

АЛЕКСАНДР ЮЛЬЕВИЧ ИШЛИНСКИЙ

Либерзон М.Р.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Ключевые слова: академик А.Ю. Ишлинский, направления научной и образовательной деятельности, научные школы.

Аннотация. Представлены воспоминания о встречах и совместной работе с академиком А.Ю. Ишлинским. Приводятся примеры его научной и образовательной деятельности, воспитания учеников и студентов, создания научных школ.

О великом ученом Александре Юльевиче Ишлинском написано очень много, в том числе и воспоминаний тех, кто знал его лично. Здесь хочу вспомнить некоторые моменты своих собственных встреч и общений с этим выдающимся и замечательным человеком¹.

Александра Юльевича я достаточно близко узнал в конце второго курса своего обучения на механико-математическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова, когда студенты выбирали кафедру, на которой планировали в дальнейшем обучаться. Александр Юльевич проводил встречи со студентами, подробно и очень интересно рассказывал о научных направлениях кафедры прикладной механики, которой руководил, о работавших на ней людях, об истории кафедры, по нашим просьбам – о некоторых своих научных результатах.

С самого начала нашей учебы на третьем курсе на кафедре прикладной механики Александр Юльевич читал нам годовой курс по теории гироскопов. Лекции были очень интересными и увлекательными, Александр Юльевич даже о самых сложных вещах говорил понятно и доступно, постоянно использовал метафоры и сравнения, обязательно приводил примеры реального применения теоретических положений на практике в механических и технических системах. От него веяло бесконечной добротой и расположением к нам, искренним стремлением отдать все свои знания и опыт для нашего развития. Мы навсегда запомнили эти лекции, забыть их невозможно.

Александр Юльевич говорил, что для большей плодотворности работы нужно стараться примерно каждые 10 лет менять сферу своей деятельности, что он и сам делал. Конечно, Александр Юльевич не предавал науку, которой был предан всю жизнь, но в его биографии были следующие периоды. В 1938 году после защиты кандидатской диссертации Александр Юльевич стал преподавать на механико-математическом факультете МГУ. В 1947 году по приглашению академика М.А. Лаврентьева Александр Юльевич переехал в Киев, где стал директором Института математики Академии наук Украины. В 1956 году Александр Юльевич вернулся в Москву, был одним из создателей Научно-исследовательского института механики МГУ и первым директором этого института. В 1964 году начал работать основанный Александром Юльевичем

¹ Эта статья представляет собой несколько расширенный и в некоторых местах сокращённый очерк об академике А.Ю. Ишлинском из книги *М.Р. Либерзон. Несколько задач прикладной механики. М.: Изд-во РИИ, 2019 г.*

Институт проблем механики Академии наук СССР, в котором Александр Юльевич был бессменным директором многие годы, а затем – почетным директором вплоть до самой своей кончины в 2003 году. Теперь Институт проблем механики РАН носит имя академика А.Ю. Ишлинского.

Везде, где Александр Юльевич работал, он создавал научные школы, очень высокие и по научному уровню, и по уровню отношений между людьми. Связи со своими бывшими сотрудниками Александр Юльевич сохранил навсегда. Как-то я подготовил научную статью в наш главный журнал «Доклады Академии наук СССР» и попросил Александра Юльевича рекомендовать эту статью к публикации. «Конечно, – сказал Александр Юльевич, – только сначала обсудите статью с людьми из Киева» и направил её в Киев в Институт математики Академии наук Украины. Мы общались с украинскими учеными по поводу моей статьи несколько месяцев, обсуждая различные вопросы, затронутые в статье, и особенно тщательно – доказательство основной теоремы. В результате это доказательство стало настолько строгим и отточенным, что я до сих пор испытываю чувство глубокой благодарности к моим киевским коллегам и, конечно, к Александру Юльевичу.

В 1996 году по приглашению НАСА мы, вдвоем с Александром Юльевичем, поехали на полтора месяца в США с лекциями. Естественно, что все там ждали именно Александра Юльевича, а не меня, тем более, что к тому времени я уже много раз бывал в США. Я подготовил афишу с именем Александра Юльевича и его кратким резюме. По плану первая лекция была в Стэнфордском Университете. Мы прилетели в Сан-Франциско за три дня до лекции. Когда Александр Юльевич увидел афишу, он потребовал её немедленно снять и повесить другую, в которую было бы вписано и моё имя. Мои возражения не были приняты. Александр Юльевич дважды корректировал новый вариант афиши, утвердил его и потребовал, чтобы именно эта афиша была отправлена во все университеты и научные центры, где состоятся лекции. В этом в очередной раз проявилась скромность Александра Юльевича и его уважение к коллегам и ученикам, хотя я считаю, что в данном случае им была проявлена излишняя щепетильность: лекции читал он сам, а я лишь отвечал на немногочисленные адресованные мне вопросы, давал краткие комментарии по его просьбе и иногда исправлял переводчиков. Везде на кафедрах и в лабораториях нам с гордостью демонстрировали полки с переводами книг Александра Юльевича.

Во время наших гуляний по Сан-Франциско Александр Юльевич спросил меня о назначении металлической прорези между трамвайными рельсами. Я рассказал, что в городе есть очень круглые улицы (одна из них считается самой крутой в мире), поэтому в правила дорожного движения включено правило, за нарушение которого следует самое суровое наказание: при парковке автомашины на улице необходимо вывернуть руль до конца влево или вправо, чтобы в случае срыва с тормоза машина не могла проехать большое расстояние по улице. Также по причине крутизны улиц нет надежды на достаточное сцепление колес трамвая с рельсами, поэтому между рельсами сделана прорезь, в которой под землей помещен механизм с зубчатыми шестеренками, а из самого трамвая в эту прорезь опускается металлический стержень с зубчатой шестеренкой для сцепления с

зубчаткой в прорези под землей. Услышав это, Александр Юльевич тут же лег на землю между рельсами и стал вглядываться в прорезь. Я увидел приближающийся к нам сверху трамвай и поспешил ему навстречу. Трамвай остановился метрах в 20 от нас, вагоновожатый вышел и подошел ко мне. Я сказал, что величайший в мире ученый-механик изучает трамвайную систему. Вагоновожатый передал пассажирам свою интерпретацию: «Нобелевский лауреат проводит экспертизу трамвайной системы Сан-Франциско. Нужно подождать». Минут через пять Александр Юльевич поднялся и сказал «Это замечательная механическая система». Я перевел вагоновожатому, а он – пассажирам: «Нобелевский лауреат сказал, что все в порядке, можем ехать» и с восхищением посмотрел на Александра Юльевича. Александр Юльевич широко улыбнулся своей светлой улыбкой и пожал вагоновожатому руку. Вокруг щелкали фотоаппараты, вагоновожатый готов был лопнуть от распиравшего его счастья. Это был один из огромного числа людей, которых Александр Юльевич одарил радостью так, как умел только он.

Из Сан-Франциско мы полетели в Лос-Анджелес, где нас принимал Калифорнийский технологический институт. Поселили нас в доме для приглашенных профессоров. Мне досталась комната, в которой когда-то жил Альберт Эйнштейн. На стене была подпись Эйнштейна, сделанная фломастером, и еще много подписей. Я тоже расписался и предложил Александру Юльевичу оставить автограф. Он взял фломастер, расписался и написал «Я жил через стенку, но между моей кроватью и кроватью Эйнштейна было всего 15 см». По Лос-Анджелесу нас возил Президент Всемирной федерации инженерных организаций, который сменил на этом посту Александра Юльевича. Лекции проходили в аудитории амфитеатром вместимостью человек на 400. Как и на других лекциях, Александр Юльевич показывал привезённые им металлические шарики, кубики, пластинки, соединенные ниточками и проволочками, и на их движениях объяснял законы механики. Это было совершенно восхитительно, но повторить это невозможно. В конце лекции Александр Юльевич отвечал на многочисленные вопросы о лунной программе, председателем которой он был более 20 лет, об этапах освоения космоса, о подготовке полета Ю.А. Гагарина и об их встрече после полета. Один из присутствовавших спросил, пожимал ли Александр Юльевич руку Ю.А. Гагарину, и после утвердительного ответа попросил разрешения тоже пожать руку Александру Юльевичу. Александр Юльевич согласился. К нему выстроилась очередь до самого верха аудитории. Александр Юльевич с улыбкой пожимал руку всем желающим, эта процедура заняла минут 30. Отпускать не хотели.

Из Лос-Анджелеса мы перелетели в Бостон, лекции проходили в знаменитом Дрейперском институте (CharlesStarkDraperLaboratory), прилетели люди из других городов, успех и популярность Александра Юльевича были оглушительными. В один из дней я пригласил на обед моего старшего сына Даниэля, который в то время учился в Бостоне. Сев за стол, Александр Юльевич сцепил зубцами две вилки и на этом «механизме» стал рассказывать нам о трении качения, о его теории, законах и приложениях в технике. Длилась эта лекция минут 20. Как всегда, за столом было несколько крупных американских ученых.

Все внимательно слушали, не проронив ни слова. Официант тоже застыл у нашего стола с подносом в руках и завороченно слушал, глядя на качающиеся вилки. Думаю, что для моего сына и для всех остальных этот обед стал одним из самых интересных и запоминающихся в жизни. Для меня – несомненно.

Потом были другие города: Нью-Йорк, Филадельфия, Вашингтон. Я боялся, что поездка может стать слишком утомительной для Александра Юльевича, ведь ему уже было далеко за восемьдесят. Но Александр Юльевич был бодр и весел, каждое утро делал зарядку, днем много гулял, лекции читал очень энергично и увлеченно, много встречался с людьми, приезжавшими и прилетавшими к нему из разных городов. После возвращения в Москву мы часто вспоминали эту поездку. Я был счастлив тем, что мне удалось организовать все перелёты, проживание в гостиницах, составить удобное расписание лекций, встреч с разными людьми, прогулок и экскурсий, чем доставил Александру Юльевичу удовольствие. А то, сколько радости получил я от полуторамесячного постоянного общения с Александром Юльевичем, как это общение было мне полезно, передать словами невозможно.

Александр Юльевич был создателем или входил в группу создателей важнейших и исключительно востребованных организаций. Это Всемирная ассоциация инженерных организаций, Международный Союз по теоретической и прикладной механике, Союз научных и инженерных организаций, Инженерная академия СССР (ныне Российская инженерная академия), Научно-исследовательский институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Институт проблем механики Академии наук СССР (ныне РАН) и многие другие. Участие Александра Юльевича в каком-либо деле неизменно приносило успех. Вот один пример.

В 1993 году возникла идея провести в Москве Международный Аэрокосмический Конгресс. После многочисленных бесплодных общений с министрами, руководителями крупных организаций, «Роскосмоса» (тогда это было Российское авиационно-космическое агентство) я понял, что поддержки подготовке и проведению Конгресса нет. Многие говорили, что после недавнего обстрела нашего Дома Правительства никто в Москву из-за рубежа не придет, что время для проведения в Москве крупного международного мероприятия совершенно неподходящее. Когда я рассказал об этой ситуации Александру Юльевичу, он сказал: «Мне ваша идея нравится, давайте Конгресс проведем» и согласился стать председателем Оргкомитета Конгресса. Сразу же информация о предстоящем Конгрессе стала широко известна в нашей стране и за рубежом. Стали приходиться многочисленные заявки на участие и доклады. Конгресс состоялся в зданиях МГУ имени М.В. Ломоносова в период с 14 по 19 августа 1994 года. В нем приняли участие известные учёные, конструкторы, инженеры, космонавты и астронавты из России и ещё из 29 стран. Особое значение имеет то, что студенты многих вузов на протяжении всей работы Конгресса посещали пленарные и секционные заседания, общались с именитыми участниками, которые с удовольствием проводили встречи со студентами. Конгресс был настолько успешным, что на заключительном заседании единогласно было принято решение проводить Международный Аэрокосмический Конгресс в

Москве каждые три года, что и выполняется до сего дня. А успехом и самим фактом своего существования Конгресс обязан Александру Юльевичу Ишлинскому.

Научный вклад Александра Юльевича в мировой научно-технический прогресс колоссален. Поставленные и решенные им задачи открывали целые направления в науке, технике, промышленности. При этом Александр Юльевич даже не задумывался о славе, почестях, зачастую и о своем авторстве. Есть проблема – надо её решать, решена – не суть важно, кто решил, главное – решена и можно двигаться дальше. Вот показательный пример.

В самом начале испытаний новых космических мощных ракет они неожиданно и необъяснимо стали одна за другой взрываться в одно и то же время после старта. Производство и испытания пришлось остановить. Вот как описывает эту ситуацию Александр Юльевич в своей книге «Полеты на Луну и проблемы космической техники».

«При попытке вывода в космос первой же лунной ракеты (термин А.Ю. Ишлинского – прим. автора) примерно через минуту после старта с космодрома возникла авария. Ракета-носитель преждевременно распалась на части и взорвалась. То же повторилось при второй и третьей попытках запуска лунной ракеты и их пришлось временно приостановить.

После мучительных раздумий академик М.В. Келдыш и автор настоящих строк усмотрели причину этих аварий в следующем. Блоки первой ступени имеют возможность совершать упругие колебания относительно центральной части (т.е. второй ступени) ракеты-носителя в направлении ее оси – так называемые продольные колебания. Такие колебания, вызывая дополнительные инерционные нагрузки на содержимое баков, обуславливают с некоторым запаздыванием изменение силы тяги двигателей блоков. В результате их амплитуды могут неограниченно возрасти и привести к разрушению связи блоков со второй ступенью, т.е. к аварийному полету ракеты и взрыву. Так оно и оказалось.

Первый заместитель С.П. Королева талантливый инженер (впоследствии академик) В.П. Мишин воспользовался простым способом демпфирования продольных колебаний, по идее близким к так называемому динамическому гасителю колебаний механических систем при резонансе. В дальнейшем полеты ракет-носителей лунных и других ракет происходили уже без подобного рода осложнений».

Я разговаривал об этом случае с В.П. Мишиным. Василий Павлович сказал следующее: «Ишлинский сделал все сам. Он передал Келдышу листок бумаги со своими объяснениями аварий, попросил прочитать и позвонить. Келдыш позвонил в тот же вечер, сказал, что объяснение ему кажется верным. На следующий день Ишлинский передал мне на другом листке бумаги схему демпфера со всеми размерами, предлагаемым для его изготовления материалом, проектом крепления демпфера к ступеням ракеты. Мы сделали так, как предложил Ишлинский. Больше таких аварий никогда не было ни у нас, ни за рубежом. Ишлинский – гений. И всем, что он знает и создает, он всегда хочет с кем-то делиться».

У меня в кабинете висит портрет А.Ю. Ишлинского и под ним небольшой абзац одного его высказывания, в котором особо выделена такая строка: «поменьше претензий к другим, побольше требовательности к себе». Этот принцип – еще одно из того исключительно важного в человеческих отношениях, чему мы учились и продолжаем учиться у Александра Юльевича.

ИССЛЕДОВАНИЯ А.Ю. ИШЛИНСКОГО В ОБЛАСТИ ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ И ИХ РАЗВИТИЕ

Горячева И.Г.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

Ключевые слова: трение качения, результаты академика А.Ю. Ишлинского, напряжения, скольжение, деформирование.

Аннотация. Приведены результаты исследований академика А.Ю. Ишлинского и других авторов в области трения качения деформируемых тел с учетом частичного проскальзывания в области контакта и несовершенной упругостью взаимодействующих тел. Показано развитие указанных результатов.

А.Ю. Ишлинский начал свою научную деятельность с исследований в области теории трения качения, результаты которых изложены в его кандидатской диссертации (1938 г.) [1] и первых публикациях [2-4]. Эти работы вошли впоследствии в его монографии [5, 6]. А.Ю. Ишлинский один из первых разработал математические модели, позволившие изучить влияние на силу трения качения двух основных источников сопротивления перекатыванию тел - относительного проскальзывания поверхностей деформируемых тел в области контактного взаимодействия, экспериментально обнаруженное О. Reynolds [7], и гистерезисных потерь в материалах контактирующих тел, связанных с их несовершенной упругостью (этот механизм трения экспериментально изучен Д. Табором [8]).

В данном обзоре приводятся результаты теоретических исследований А.Ю. Ишлинского и других авторов в области трения качения деформируемых тел с учетом частичного проскальзывания в области контакта и несовершенной упругости взаимодействующих тел.

1. Постановка задачи о стационарном качении деформируемых тел с учетом частичного проскальзывания в области контактного взаимодействия

Рассмотрим качение с угловой скоростью ω относительно оси Oy и линейной скоростью V , направленной вдоль оси x , одного тела по поверхности другого (рис. 1).

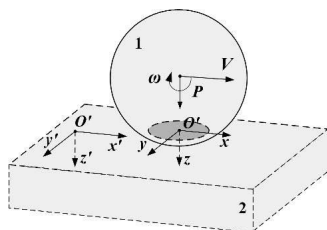


Рис. 1. Схема контакта

Вследствие деформации тел точки на их поверхностях ($z=0$) имеют касательные перемещения $u_{xi}(x, y, t)$ вдоль оси x и $u_{yi}(x, y, t)$ вдоль оси y , а также перемещения по нормали к поверхности $u_{zi}(x, y, t)$. Скорости относительного проскальзывания $s_x(x, y, t)$ в направлении оси Ox и $s_y(x, y, t)$ в направлении оси Oy в

точке (x, y) области контакта определяются разностью скоростей частиц взаимодействующих тел в этой точке.

При стационарном качении, т.е. равномерном движении под действием постоянных сил и моментов, упругие перемещения в системе координат $Oxyz$ не зависят от времени. В этом случае $\partial u_{xi}/\partial t = \partial u_{yi}/\partial t = 0$ и скорости относительного проскальзывания $s_x(x, y, t)$ и $s_y(x, y, t)$, а также компоненты перемещений и напряжений являются функциями только координат (x, y) .

При качении вся область контакта Ω делится на две подобласти: подобласть $\Omega_{сц}$, в которой имеет место сцепление частиц, расположенных на поверхностях взаимодействующих тел, и $\Omega_{ск}$, где они проскальзывают. Граничные условия в области контакта записываются в виде:

– в подобласти сцепления, $(x, y) \in \Omega_{сц}$, отсутствует проскальзывание и тангенциальные напряжения $\tau(x, y)$ не превышают предельной величины, т.е.

$$s_x = s_y = 0, |\tau(x, y)| \leq \mu p(x, y), \quad (1.1)$$

где $p(x, y)$ – контактное давление, μ – коэффициент трения;

– в подобласти проскальзывания, $(x, y) \in \Omega_{ск}$, действует закон трения Кулона–Амонтона

$$|\tau(x, y)| = \mu p(x, y), \quad (1.2)$$

и направление тангенциальных напряжений $\tau(x, y)$ противоположно направлению проскальзывания, т.е.

$$\frac{\tau(x, y)}{|\tau(x, y)|} = - \frac{s(x, y)}{|s(x, y)|}. \quad (1.3)$$

Заметим, что в случае полного скольжения закон Кулона–Амонтона (1.2) имеет место во всей области контакта Ω .

Условие контакта поверхностей взаимодействующих тел приводит к следующему соотношению, накладываемому на перемещения u_{zi} точки поверхности в направлении нормали к ней:

$$u_{z1} + u_{z2} = D - (f_1(x, y) + f_2(x, y)), \quad (x, y) \in \Omega, \quad (1.4)$$

где $f_1(x, y)$ и $f_2(x, y)$ – уравнения поверхностей взаимодействующих тел, D – смещение тел в направлении оси Oz в результате их деформирования.

Для определения распределения напряжений в контактирующих телах и сопротивления качению необходимо решить контактную задачу с приведенными выше граничными условиями. Наибольшая трудность при ее решении состоит в определении расположения и границ зон сцепления и проскальзывания.

2. Качение упругих тел

Напряженное состояние упругих тел и сопротивление качению зависят от разницы кривизн тел в области контакта и соотношения модулей упругости.

Исследованию контактной задачи в плоской постановке о качении упругого цилиндра радиуса R по основанию из того же материала под действием момента M и тангенциальной силы T посвящены работы [9-13]. В случае равномерного качения цилиндра имеют место уравнения равновесия:

$$T = \int_{-a}^b \tau(x) dx, \quad P = \int_{-a}^b p(x) dx, \quad TR = \int_{-a}^b xp(x) dx + M, \quad (2.1)$$

где P – вертикальная сила, действующая на единицу длины цилиндра, $(-a)$ и b – границы области контакта.

Если материалы взаимодействующих тел одинаковы, касательные напряжения не оказывают влияния на распределение контактных давлений и размер площадки контакта, которые определяются теорией Герца. Частичное проскальзывание на площадке контакта происходит за счет разницы кривизн взаимодействующих тел. В [9-11] изучен вопрос о размерах и положении участков сцепления и проскальзывания на площадке контакта и показано, что в случае одинаковых упругих постоянных на площадке контакта может образоваться только два участка, причем участок сцепления находится на стороне набегания катка. В [9] получено следующее распределение тангенциальных напряжений $\tau(x)$ в области контакта $(-a, a)$:

$$\tau(x) = \begin{cases} \frac{\mu}{\pi KR} \sqrt{a^2 - x^2}, & -a \leq x \leq c, \\ \frac{\mu}{\pi KR} \left[\sqrt{a^2 - x^2} - \sqrt{(a-x)(x-c)} \right], & c \leq x \leq a, \end{cases} \quad (2.2)$$

где c – точка перехода зоны сцепления в зону проскальзывания,

$$K = \frac{2(1-\nu^2)}{\pi E}, \quad (2.3)$$

E и ν – модуль Юнга и коэффициент Пуассона взаимодействующих тел), а полуширина области контакта a и размер зоны сцепления $(a-c)$ определяются соотношениями:

$$2a = \sqrt{8KRP}, \quad \frac{a-c}{2a} = 1 - \frac{\delta R}{\mu a}, \quad (2.4)$$

где ω – угловая скорость вращения цилиндра, δ – величина относительного проскальзывания,

$$\delta = (\omega R - V)/V. \quad (2.5)$$

Распределение тангенциальных напряжений (2.2) при $T/\mu P = 0,5$ представлено на рисунке 2, кривая 1.

Тангенциальная сила T связана с величиной относительного проскальзывания δ соотношением:

$$\frac{T}{\mu P} = \frac{\delta R}{\mu a} \left(2 - \frac{\delta R}{\mu a} \right). \quad (2.6)$$

При качении двух упругих тел из разных материалов возникает дополнительное проскальзывание за счет разницы в тангенциальных деформациях на взаимодействующих поверхностях вследствие различия их упругих постоянных.

Исследованию качения жесткого цилиндра по упругому основанию посвящены работы А.Ю. Ишлинского [1,3]. В них использована упрощенная модель основания, в которой нормальные u_y и касательные u_x перемещения точек

поверхности связаны с давлением p и касательными напряжениями τ , действующими в области контактного взаимодействия, соотношениями:

$$u_y = (h/K_n)p, \quad u_x = (h/K_\tau)\tau. \quad (2.7)$$

Подстановка этих соотношений в граничные условия (1.1)-(1.4) позволяет определить распределение нормальных и касательных напряжений в области контакта и расположение зон сцепления и проскальзывания на ней. В частности, давление на площадке контакта в этом случае распределяется по параболическому закону, а распределение касательных напряжений в зоне сцепления подчиняется линейному закону, что следует из решения обыкновенного дифференциального уравнения в зоне сцепления с условиями непрерывности напряжений в точках перехода зоны сцепления в зону скольжения или выхода ее на границу зоны контакта. График распределения касательных напряжений τ в области контакта при наличии одной зоны сцепления (c_w, a) и одной зоны проскальзывания ($-a, c_w$) приведен на рисунке 2 (кривая 2).

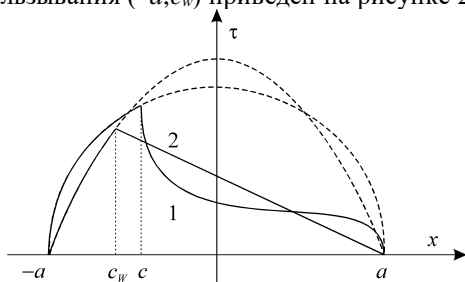


Рис. 2. Распределение касательных напряжений в области контакта при $T/\mu P = 0,5$ для модели упругой сплошной среды (кривая 1) и упрощенной модели упругого основания (кривая 2). Пунктирными линиями показаны распределения касательных усилий при полном проскальзывании для двух моделей

В [1,3] проведен полный анализ положения зон сцепления и проскальзывания на площадке контакта и выведены условия, при которых осуществима схема с двумя (впереди, на стороне набегания катка, зона сцепления, которая переходит в зону проскальзывания) и тремя (зона сцепления находится между двумя зонами проскальзывания) участками в области контакта. Даны также соотношения, позволяющие рассчитать силу сопротивления качению при больших и малых значениях момента M , а также приближенная формула для максимальной величины силы трения качения.

Упрощенная модель упругого основания, использованная А.Ю. Ишлинским для анализа контактных характеристик в задаче о качении цилиндра (плоская постановка), была в дальнейшем применена для решения трехмерных задач о качении упругих тел, а также при исследовании нестационарных задач качения и переходных режимов к стационарному качению [14,15]. Проведенный в [15] анализ позволил заключить, что упрощенная модель позволяет с достаточной точностью (ошибка составляет не более 15%) рассчитать размеры и положение зон сцепления и проскальзывания в области контактного взаимодействия, а также величину относительного проскальзывания тел при качении.

Задача о качении упругого цилиндра по упругому основанию, когда на упругие свойства цилиндра и основания не накладывалось никаких ограничений, рассматривалась в [16] в предположении, что площадка контакта состоит из двух участков – проскальзывания и сцепления поверхностей. Решение сведено к задаче линейного сопряжения для двух аналитических функций.

Пространственная задача о качении упругих тел исследована в [15, 17-19]. При решении пространственных контактных задач в [17] предложен вариационный подход, который состоит в отыскании минимума в пространстве допустимых функций касательных напряжений, действующих на площадке контакта, функционала вида

$$I = \int_{\Omega} (\dot{s}|\tau + \mu p \dot{s})^2 dS. \quad (2.8)$$

Доказательство эквивалентности вариационной постановки (2.8) задаче о контакте качения тел из одинаковых материалов с граничными условиями (1.1)-(1.4) приведено в [18]. При использовании вариационного подхода неизвестные границы подобластей сцепления и проскальзывания строятся после решения вариационной задачи по найденному полю скоростей. При численной реализации исходная вариационная задача аппроксимировалась дискретной задачей нелинейного программирования [19].

Результаты численного решения задачи показали, что форма площадки контакта при качении шара по плоскости близка к круговой. Анализ решения [16] в случае контакта тел из одинаковых материалов позволил установить, что распределение тангенциальных напряжений на линии, проходящей через центр площадки контакта и коллинеарной направлению действия силы тяги T , близко к распределению, представленному на рисунке 2. Полученные результаты послужили основанием для использования при решении пространственных задач о качении приближенные методы, в основе которых лежит суперпозиция решений плоской задачи о качении упругих тел. Так, в теории полос [20] область контакта делится на тонкие полосы, параллельные направлению качения. Решение задачи в плоской постановке используется для каждой такой полосы, при этом пренебрегается их взаимодействием. Обзор различных методов решения пространственных задач о качении упругих тел из одинаковых материалов в предположении, что область контакта много меньше радиусов кривизн взаимодействующих тел, содержится также в [19].

3. Качение вязкоупругих тел

При качении происходит нагружение и разгрузка взаимодействующих тел, что в силу реологических свойств материалов приводит к гистерезисным потерям.

В 1938 г. А.Ю. Ишлинским впервые рассмотрена задача о стационарном качении жесткого цилиндра (катка) по вязкоупругому основанию, решение которой позволило рассчитать момент трения качения и исследовать его зависимость от скорости качения, нагрузки, а также механических и геометрических характеристик взаимодействующих тел [2]. Для приближенного решения задачи были использованы две одномерные модели материала, для

которых давление $p(x)$ в области взаимодействия связано с перемещением $u_y(x)$ поверхности по нормали к ней соотношениями:

$$p(x) = K_n u_y(x) + \kappa \frac{\partial u_y(x)}{\partial t}, \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial u_y(x)}{\partial t} = K_1 p(x) + K_2 \frac{\partial p(x)}{\partial t}, \quad (3.2)$$

где K_n , κ , K_1 и K_2 – постоянные материала.

При решении задачи предполагалось, что тангенциальные напряжения на площадке контакта отсутствуют, а сопротивление качению возникает только за счет несимметрии давления, приводящего к возникновению момента сопротивления. Было показано, что для модели (3.1), обладающей ограниченной ползучестью, при малых скоростях качения сила сопротивления перекатыванию описывается соотношением:

$$T = \frac{\kappa VP}{K_n R}, \quad (3.3)$$

а в случае больших скоростей

$$T = \frac{4P}{3} \sqrt{\frac{P^3}{2\kappa V R}}. \quad (3.4)$$

Любопытно отметить, что эти две асимптотические формулы, будь они получены много раньше, могли бы положить конец дискуссии [21], которая возникла между Дюпюи и Мореном в начале 19 века по поводу того, как зависит сопротивление перекатыванию от радиуса катка. Дюпюи считал, что сила T пропорциональна $R^{-1/2}$, а Морен отстаивал другую закономерность: T пропорциональна R^{-1} .

Для упруго-вязкого грунта, подчиняющегося закону деформирования (3.2), полученная в [2] зависимость силы трения от механических и геометрических характеристик контактирующих тел и скорости качения V имеет вид:

$$T = \frac{K_2}{5V} \sqrt[3]{\frac{18P^5}{K_1 R l^2}}. \quad (3.5)$$

Одномерные (стержневые) модели для описания несовершенной упругости основания при качении по нему цилиндрических и сферических тел использовались впоследствии в [22,23], при этом поведение стержней при сжатии описывалось различными дифференциальными уравнениями первого порядка.

Решение задачи о качении жесткого цилиндра по основанию, описываемому моделью сплошной вязкоупругой среды с экспоненциальным ядром релаксации, получено в [24] также в предположении отсутствия тангенциальных сил на площадке контакта. В [25, 26] для таких же вязкоупругих материалов рассматривался контакт двух цилиндров с разными и одинаковыми упругими постоянными. При этом находились решения, соответствующие спектру времен релаксации. Было установлено, что сила сопротивления качению имеет максимум, когда время запаздывания материала сравнимо со временем контакта. В [27] найдено распределение нормальных напряжений при качении

вязкоупругого цилиндра по основанию из того же материала, для которого зависимость между напряжениями и деформациями выражалась интегральными соотношениями Вольтерра с экспоненциальным ядром.

В [28,29] построено аналитическое решение задачи о качении вязкоупругого цилиндра по основанию из того же материал, основанное на сведении ее к задаче Римана-Гильберта; получены аналитические выражения для нормальных и касательных напряжений, действующих на площадке контакта, а также уравнения для определения размеров зон сцепления и проскальзывания. Исследование задачи [28] позволило выявить безразмерный параметр $\zeta_0 = l_0/(2T_\epsilon V)$, существенно влияющий на характер распределения давления, размер и смещение площадки контакта и т.д. Здесь $l_0 = \sqrt{8KR^P}$ – ширина области контакта для упругих тел, характеризующихся упругими постоянными E и ν . В результате несимметричного распределения давления и смещения площадки контакта возникает момент M сопротивления качению. Из анализа результатов следует, что релаксация и последствие материалов взаимодействующих тел проявляются при качении, когда время прохождения области контакта соизмеримо со временем релаксации ($\zeta_0 \sim 1$), что совпадает с выводами, полученными в [26, 27], а также с зависимостью силы трения качения от скорости движения катка, полученной А.Ю. Ишлинским [2].

Решение рассмотренной в [28] задачи позволило изучить совместное влияние двух основных источников трения качения – последствия и релаксации материалов, а также частичного проскальзывания взаимодействующих поверхностей в области контакта (и, соответственно, коэффициента трения скольжения) – на контактные характеристики и коэффициент трения качения для частного случая одинаковых материалов взаимодействующих тел.

Решения контактных задач в различных постановках о качении тел из вязкоупругих материалов приведены также в [29, 30].

4. Роль реологических свойств тонких поверхностных слоев при трении качения

Среди исследований, посвящённых трению качения, можно отдельно выделить работы, посвящённые качению жёстких и деформируемых тел при наличии тонкого промежуточного слоя на поверхности катания, обладающего вязкоупругими свойствами. Теоретическое и экспериментальное исследование контакта качения двух цилиндров с покрытиями из вязкоупругих материалов, в частности резины, проведено в работах Калкера [31, 32]. Заметим, что полученное А.Ю. Ишлинским решение задачи о качении жёсткого цилиндра по вязкоупругому основанию [6] позволяет оценить влияние реологических свойств поверхностного слоя на силу сопротивления перекачиванию, если предположить, что модуль упругости основания много больше модуля упругости слоя (т.е. в предположении абсолютной жёсткости основания).

В [33-39] рассмотрены контактные задачи в плоской и пространственной постановках для упругого катящегося тела и основания, состоящего из вязкоупругого слоя толщины h , сцепленного с упругим полупространством. Для

описания нормальной и тангенциальной податливости слоя в предположении, что толщина вязкоупругого слоя много меньше характерного размера площадки контакта, использованы одномерные модели Максвелла или Кельвина. Из анализа решения поставленных задач следует, что вязкоупругий слой оказывает определяющее влияние на распределение контактных напряжений, при этом расположение областей сцепления и проскальзывания существенно зависит от величины относительного проскальзывания, коэффициента трения скольжения, относительных механических характеристик слоя и основания, при этом характер зависимости силы сопротивления относительно перемещению тел от скорости определяется реологическими свойствами поверхностного слоя, в частности, той моделью, которая выбрана для описания этих свойств. Результаты исследований [37-39] также указывают на существенное влияние свойств поверхностного слоя на распределение максимальных касательных и растягивающих напряжений внутри взаимодействующих тел. Это обстоятельство должно учитываться при анализе характера разрушения тел, находящихся в условиях трения качения.

Полученные результаты являются основой для разработки методов управления силой трения и скоростью накопления контактно-усталостных повреждений в подповерхностных слоях материалов в условиях трения качения.

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации 123021700050-1).

Список литературы

1. Ишлинский А.Ю. Трение качения: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. – Москва, Институт механики АН СССР, 1938.
2. Ишлинский А.Ю. Трение качения // ПММ. – 1938. – Т. 2, № 2. – С. 245-260.
3. Ишлинский А.Ю. Теория сопротивления перекачиванию (трение качения) и смежных явлений // Трение и износ в машинах. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1940. – Т. 2. – С. 255-264.
4. Ишлинский А.Ю. О проскальзывании в области контакта при трении качения // Изв. АН СССР. ОТН. – 1956. – № 6. – С. 3-15.
5. Ишлинский А.Ю. Механика: идеи, задачи, приложения. – М.: Наука, 1985. – 623 с.
6. Ишлинский А.Ю. Прикладные задачи механики. Механика упругих и абсолютно твердых тел. – М.: Наука, 1986. – Т. 2. – 415 с.
7. Reynolds O. On rolling friction // Philos. Trans. Roy. Soc. London A. – 1875. – Vol. 166. – P. 155-175.
8. Tabor D. The mechanism of rolling friction // Philos. Mag. Ser. 7. – 1952. – Vol. 43. – P. 345.
9. Carter F.W. On the action of a locomotive driving wheel // Proc. Roy. Soc. London A. – 1926. – Vol. 112. – P. 151.
10. Poritsky H. Stresses and deflections of cylindrical bodies in contact with application to contact of gears and of locomotive wheels // J. Appl. Mech. – 1950. – Vol. 17, No 2. – P. 191-201.
11. Cain B.S. Discussion of the paper of Poritsky H.V. // J. Appl. Mech. – 1950. – Vol. 17.
12. Глаголев Н.И. Сопротивление перекачиванию цилиндрических тел // ПММ. – 1945. – Т. 9, № 4. – С. 318-333.
13. Johnson K.L. Tangential tractions and microslip in rolling contact. Rolling Contact Phenomena, Ed. Bidwell, New York: Elsevier, 1962, – P. 6-11.
14. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
15. Kalker J.J. Three-dimensional elastic bodies in rolling contact. Dordrecht–Boston–London: Kluwer Academic Publishers, 1990. – 314 p.
16. Kalker J.J. A minimum principle of the law of dry friction with application to elastic cylinders in rolling contact // Journal of Applied Mechanics. – 1971. – Vol. 38. – P. 875-887.

17. Спектор А.А. Вариационный метод исследования контактных задач с проскальзыванием и сцеплением // ДАН СССР. – 1977. – Т. 236, № 1. – С. 39-42.
18. Гольдштейн Р.В., Завоский А.Ф., Спектор А.А., Федоренко Р.П. Решение вариационными методами пространственных контактных задач качения с проскальзыванием и сцеплением // Успехи механики. – 1982. – Т. 5, вып. 3/4. – С. 61-102.
19. Моссаковский В.И., Мишишин И.И. Качение упругих тел // ПММ. – 1967. – Т. 31, вып. 5.
20. Kalker J.J. A strip theory for rolling with slip and spin // Proc. Kon. Ned. Akad. van Wetenschappen. – 1967. – Vol. 70. – P. 10-15/
21. Dupuit A.J.E.J. Sur le tirage des voitures sur le frottement de roulement // Annales des PontsetChaussees. – 1842. – Vol. 3.
22. May W.D., Morris E.L., Atack D. Rolling friction of a hard cylinder over a viscoelastic material // Journal of Applied Physics. – 1959. – Vol. 30.
23. Flom D.G., Bueche A.M. Theory of rolling friction for spheres // J. Appl. Phys. – 1959. – Vol. 30, No. 11. – P. 1725-1730.
24. Hunter S.C. The rolling contact of a rigid cylinder with a viscoelastic half-space // ASME, J. Appl. Mech., Ser. E. – 1961. – No. 28. – P. 611.
25. Morland L.W. A plane problem of rolling contact in linear viscoelasticity theory // ASME, J. Appl. Mech. E. – 1962. – Vol. 29, No. 2. – P. 345-352.
26. Morland L.W. Rolling contact between dissimilar viscoelastic cylinders // Quart. J. Mech and Appl. Math. – 1967. – Vol. 25. – P. 363-378.
27. Иванова Р.Я. Качение вязкоупругого цилиндра по основанию из того же материала // ПМТФ. – 1964. – № 3.
28. Горячева И.Г. Контактная задача качения вязкоупругого цилиндра по основанию из того же материала // ПММ. – 1973. – Т. 37, № 5. – С. 877-885.
29. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. – М.: Наука, 2001.
30. Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости. – М.: Наука, 1980.
31. Kalker J.J. Viscoelastic multilayered cylinders rolling with dry friction // ASME, J. Appl. Mech. – 1991. – Vol. 58. – P. 666-679.
32. Braat G.F.M., Kalker J.J. Theoretical and experimental analysis of the rolling contact between two cylinders coated with multilayered viscoelastic rubber // Contact mechanics, computational techniques / Ed. M.H. Aliabadi and C.A. Brebbia: Contact Mechanics publ., 1993. – P. 119-126.
33. Goryacheva I.G., Sadeghi F. Contact characteristics of rolling/sliding cylinder and a viscoelastic layer bonded to an elastic substrate // Wear. – 1995. – Vol. 184. – P. 125-132.
34. Горячева И.Г., Горячев А.П., Садеги Ф. Контактное взаимодействие упругих тел с тонкими вязкоупругими покрытиями в условиях трения качения или скольжения // ПММ. – 1995. – Т. 59, вып. 4. – С. 634-641.
35. Goryacheva I.G. Contact mechanics in tribology. – Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1998. – 344 p.
36. Goryacheva I., Miftakhova A. Modelling of the viscoelastic layer effect in rolling contact // Wear. – 2019. – Vol. 430-431. – P. 256-262.
37. Горячева И.Г., Захаров С.М., Торская Е.В. Влияние относительного проскальзывания и свойств поверхностного слоя на напряженное состояние упругих тел при трении качения // Трение и износ. – 2003. – Т. 24, № 1. – С. 5-15.
38. Meshcheryakova AR, Goryacheva IG. Stress State of Elastic Bodies with an Intermediate Layer in Rolling Contact with Slip // *Phys Mesomech.* – 2021. – Vol. 24. – P. 441-450.
39. Goryacheva I., Meshcheryakova A. Modelling of third body effect on rolling contact fatigue damage // *Mech Res Commun.* – 2022. – Vol. 123. – P. 103901.

ДИНАМИЧЕСКАЯ ИМИТАЦИЯ ПЕРЕГРУЗКИ ПРИ ПОДЪЁМЕ НА ОРБИТУ И ГАЛЬВАНИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ ВИЗУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ В ОТКРЫТОМ КОСМОСЕ

Александров В.В., Лемак С.С., Тихонова К.В., Шуленина Н.Э.

МГУ им. М.В. Ломоносова

Ключевые слова: динамичная имитация, перегрузка, гальваническая коррекция, невесомость.
Аннотация. Рассмотрены различные технологии виртуальной реальности, в том числе технология гальванической имитации. Разработаны реальные применения научных результатов для тренировки космонавтов.

В 1968 году в издательстве «Наука» вышла в свет первая монография академика А.Ю. Ишлинского «Инерциальное управление баллистическими ракетами». В 1995 году в издательстве МГУ вышла последняя книга «Математические задачи динамической имитации аэрокосмического полёта», где соавторами Александра Юльевича были: д.ф.-м.н. В.В. Александров; Л.И. Воронин (рук. Медицинского центра ЦПК); Ю.Н. Глазков (космонавт), д.ф.-м.н. В.А. Садовничий [1]. В этой книге, применяя результаты в механике относительного движения, полученные А.Ю. Ишлинским в своих монографиях 1968-1995 г.г., была дано описание методики и математического обеспечения для тренировок космонавтов на уникальном пилотажно-динамическом стенде – центрифуге с 4-мя степенями свободы (с кабиной в управляемом кардановом подвесе). С этой работы началось развитие нового направления в биомеханике – математическое обеспечение технологий виртуальной реальности. В данном случае – технологии динамической имитации.

В дальнейших научных исследованиях преподаватели кафедры прикладной механики и управления и сотрудники лаборатории математического обеспечения имитационных динамических систем (МОИДС) расширили список технологий виртуальной реальности (визуальная 3D технология и технология динамической имитации), включив в этот список технологию гальванической имитации. В 1997 году на орбитальной станции «МИР» при визуальном управлении движением медицинского модуля для стыковки с орбитальной станцией из-за большого запаздывания стабилизации взгляда космонавта (рис. 1) произошла авария – модуль был потерян и повреждены солнечные батареи.

В соответствии с гипотезой физиологов Института медицинских и биологических проблем (ИМБП) И.Б. Козловской и Л.Н. Корниловой причиной запаздывания являлось отсутствие выходного сигнала с отолитовых органов вестибулярного аппарата космонавта в связи с наличием невесомости в орбитальном полёте, что привело к временной блокировке мозжечком всех сигналов от вестибулярного аппарата и увеличению запаздывания стабилизации взгляда космонавта. Уменьшение запаздывания стабилизации взгляда можно получить при наличии гальванической коррекции выходного сигнала с отолитовых органов вестибулярного аппарата космонавта, что соответствует гальванической имитации земной силы тяжести при гальванической стимуляции

выходного сигнала с афферентных первичных нейронов отолитовых органов вестибулярного аппарата космонавта (GVS- технология – рис. 2).

**Орбитальная станция «МИР», 1997 г.
Запаздывание установки взгляда на орбите**

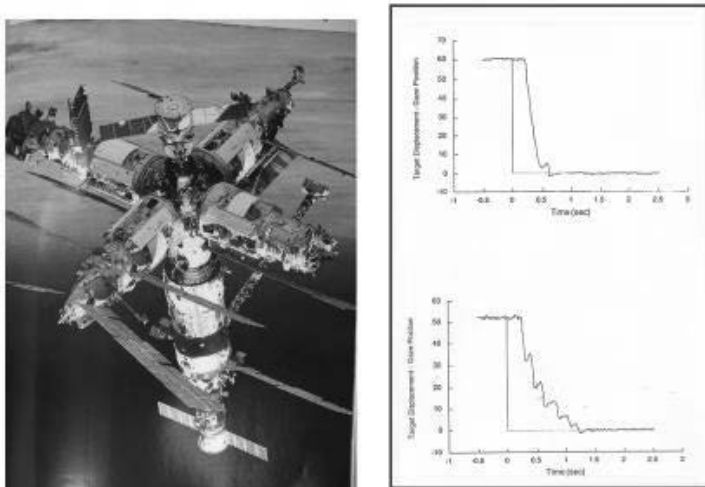


Рис. 1

На схеме (рис. 3) представлена возможность уменьшения отолито-канального конфликта при наличии гальванической стимуляции афферентных первичных нейронов выходного блока отолитовых органов вестибулярного аппарата. Следует отметить, что физическая интерпретация этого предложения – это гальваническая имитация земной силы тяжести на выходе вестибулярного аппарата космонавта в орбитальном полёте.

**Нейронное управление и задачи коррекции
Абсолютное движение головы**



Рис. 2

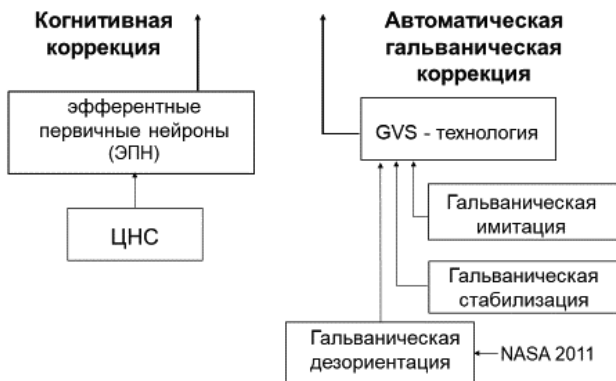


Рис. 2. Продолжение

Гальваническая имитация силы тяжести в невесомости на выходе вестибулярного аппарата космонавта

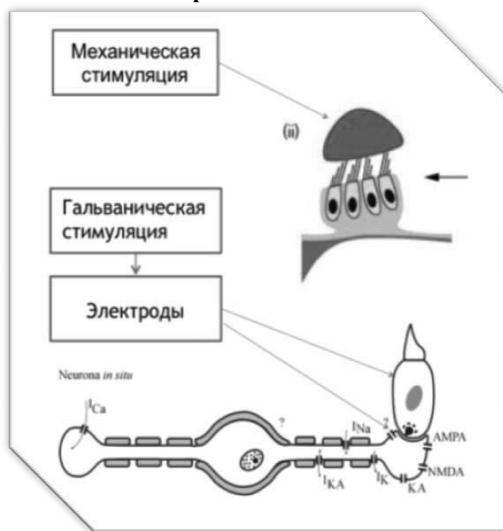


Рис. 3

Если рассмотреть модифицированную математическую модель афферентного первичного нейрона [1], то можно доказать, что с помощью гальванической стимуляции можно реализовать на выходном блоке вестибулярного аппарата (рис. 3) сигнал, дающий возможность избежать вестибуло-сенсорного конфликта, когда мозжечок блокирует выходную информацию с вестибулярного аппарата из-за постоянного отсутствия выходных сигналов с отолитовых органов во время визуального управления космонавтом движением модуля в открытом космосе. Математическое доказательство этого результата заключается в нахождении двух аттракторов на фазовой плоскости

математической модифицированной модели Ходжкина-Хаксли – точечного и периодического синтеза предельного цикла, являющегося областью достижимости при наличии гальванического воздействия ГВС – гальванического вестибулярного стимулятора. Следует отметить, что в 2000 году было известно (рис. 4) о наличии двух предельных циклов в модели Ходжкина-Хаксли, один из которых является периодическим аттрактором, а второй предельный цикл, полученный в обратном времени, является границей области притяжения точечного аттрактора.

Bistable System (two attractors)
Izhikevch T.M.Spiking and Bursting.
2000.(P(t)=0)

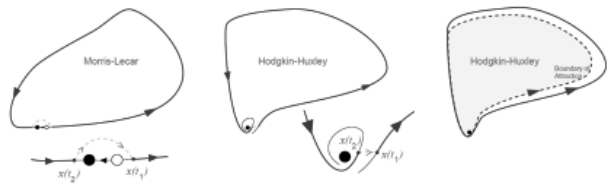


Рис. 4

К.В. Тихоновой был построен третий предельный цикл, являющийся границей области достижимости при наличии гальванической стимуляции. Таким образом, можно утверждать, что возможен управляемый переход (с помощью гальванического стимула) из области притяжения A точечного аттрактора (рис. 5) в область притяжения периодического аттрактора, если расстояние Хаусдорфа между множеством достижимости D и областью притяжения A точечного аттрактора строго больше нуля (рис. 6) [2].

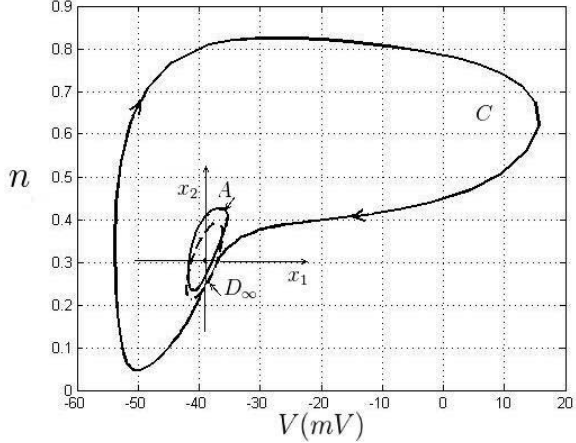


Рис. 5

Критерий перехода – дистанция Хаусдорфа строго положительна

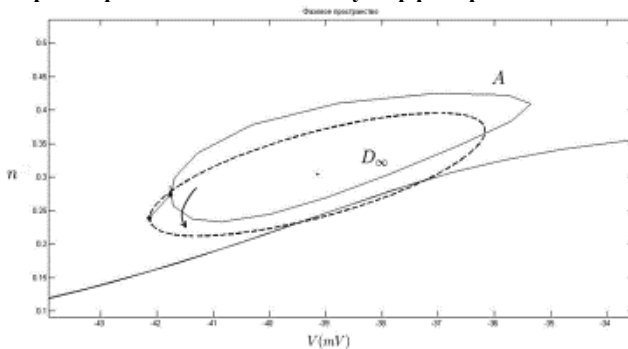


Рис. 6

Следовательно, гальваническая имитация земной силы тяжести на выходе отолитовых органов может привести к отсутствию отолито-канального конфликта и, следовательно, к уменьшению запаздывания взгляда космонавта при визуальном управлении движением модуля в открытом космос.

Полученный результат подтверждает гипотезу Корниловой Л.Н. (ИМБП) о причине отолито-канального конфликта в невесомости – получение информации от полукружных каналов при отсутствии информации от отолитовых органов.

Список литературы

1. Александров В.В., Воронин Л.И., Глазков Ю.Н., Ишлинский А.Ю., Садовничий В.А. Математические задачи динамической имитации аэрокосмических полётов. – М.: Изд-во МГУ, 1995. – 158 с.
2. Садовничий В.А., Александров В.В., Александрова Т.Б., Коноваленко И.С., Сото Э., Тихонова К.В., Шуленина Н.Э. Гальваническая коррекция нейронного управления установкой взгляда. Часть 1 // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. – 2021. – № 6. – С. 41-47.
3. Александров В.В., Александрова О.В., Козик И.А., Семенов Ю.С. Модификация модели Ходжкина-Хаксли и математическая интерпретация основного закона нейрофизиологии "Все или ничего" // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. – 2021. – № 3. – С. 67-70.
4. Садовничий В.А., Александров В.В., Александрова О.В., Вега Р., Коноваленко И.С., Сото Э., Тихонова К.В., Гордильо-Домингез Х.Л., Гонзалес О. О гальванической коррекции вестибулярной активности пилота при визуальном управлении полетом // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика – 2019. – № 1. – С. 34-41.

ОБ ОДНОЙ КЛАССИЧЕСКОЙ РАБОТЕ А.Ю. ИШЛИНСКОГО

Морозов В.М., Каленова В.И.

НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова

Ключевые слова: гироскоп, гироскоп, гироскоп, гироскоп, гироскоп.

Аннотация. На основании результатов исследований академика А.Ю. Ишлинского о движении пространственного гироскопа решена расширенная задача без введения комплексных переменных.

Классическая задача о движении пространственного гироскопа была впервые исследована Александром Юльевичем Ишлинским в статье 1956 года [1] (см. также [2]). Был установлен следующий принципиальный факт: уравнения малых движений гироскопа не разделяются, как в работе Геккелера [3] на две независимые подсистемы, а образуют единую систему четырех линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. А.Ю. Ишлинскому удалось получить решение этой системы в квадратурах при произвольном движении точки подвеса прибора по поверхности Земли.

1. Следуя работе [1] введем переменные:

$V(t)$ – величина абсолютной скорости точки подвеса гироскопа;

$\Omega(t)$ – проекция абсолютной угловой скорости чувствительного элемента гироскопа на направление геоцентрической вертикали места.

Обозначим

$$x_1 = \frac{V(t)}{\sqrt{gR}} \delta_1, \quad x_2 = \delta_2, \quad x_3 = \delta_3, \quad x_4 = \frac{2B \sin \varepsilon_0}{ml \sqrt{gR}} \delta_4;$$

где g – ускорение силы тяжести, R – радиус Земли; $\omega_0 = \sqrt{g/R}$; m, l, ε_0, B – величины, связанные с параметрами конструкции гироскопа; $\delta_i (i = 1, 2, 3, 4)$ – углы, определяющие ориентацию осей чувствительности элемента в некоторой неподвижной системе координат.

Уравнения малых колебаний гироскопа в рамках прецессионной теории гироскопов могут быть представлены в виде [1,2]

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \omega_0 x_2 + \Omega(t) x_4, \\ \dot{x}_2 &= -\omega_0 x_1 + \Omega(t) x_3, \\ \dot{x}_3 &= -\omega_0 x_4 - \Omega(t) x_2, \\ \dot{x}_4 &= \omega_0 x_3 - \Omega(t) x_1. \end{aligned} \tag{1}$$

Уравнения (1) выписаны в предположении малости центробежной силы по сравнению с величиной силы тяжести ($mg - \frac{mV^2}{R} \approx mg$).

А.Ю. Ишлинский показал, что уравнения (1) интегрируются в замкнутой форме при помощи введения двух комплексных функций

$$z_1 = x_1 + ix_2,$$

$$z_2 = x_3 - ix_4,$$

которые подчиняются уравнениям

$$\dot{z}_1 = -i\omega_0 z_1 + i\Omega(t)z_2,$$

$$\dot{z}_2 = i\Omega(t)z_1 - i\omega_0 z_2.$$

Комбинации переменных $u_1 = z_1 + z_2$, $u_2 = z_1 - z_2$ позволяют получить два независимых уравнения

$$\dot{u}_1 = i(\Omega - \omega_0)u_1, \quad \dot{u}_2 = -i(\Omega + \omega_0)u_2,$$

решения которых имеют вид

$$u_1 = C_1 \exp i \int_0^t (\Omega(\tau) - \omega_0) d\tau, \quad u_2 = C_2 \exp \left[-i \int_0^t (\Omega(\tau) + \omega_0) d\tau \right].$$

Из этих решений нетрудно получить выражения для исходных переменных x_i ($i = 1, \dots, 4$).

Введение комплексных переменных оказалось очень удобным при решении ряда задач, и в дальнейшем использовался многими исследователями.

2. Изложим другой подход к решению рассматриваемой задачи, не требующий введения комплексных переменных. В работе [4] авторами показано, что матрица $A(t)$ системы (1) относится одному из классов линейных нестационарных систем, интегрируемых в замкнутой форме, а именно, к функционально коммутативному классу [5].

Систему (1) запишем в виде

$$\dot{x} = A(t)x, \quad A(t) = \begin{pmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & \Omega(t) \\ -\omega_0 & 0 & \Omega(t) & 0 \\ 0 & -\Omega(t) & 0 & -\omega_0 \\ -\Omega(t) & 0 & \omega_0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Матрица $A(t)$ удовлетворяет условию функциональной коммутативности и может быть представлена в виде

$$A(t) = \sum_{j=1}^2 \alpha_j(t) A_j,$$

где $\alpha_1(t) \equiv 1$, $\alpha_2(t) = \Omega(t)$; $A_1 = \begin{pmatrix} D_1 & O_2 \\ O_2 & -D_1 \end{pmatrix}$; $A_2 = \begin{pmatrix} O_2 & D_2 \\ -D_2 & O_2 \end{pmatrix}$; $A_1 A_2 = A_2 A_1$;

$D_1 = \begin{pmatrix} 0 & \omega_0 \\ -\omega_0 & 0 \end{pmatrix}$, $D_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$; O_2 – нулевая (2×2)-матрица.

Замена переменных $x = \exp(A_2 \tau) y$, $\tau = \int_0^t \Omega(s) ds$ приводит систему (2) к

стационарной системе

$$\dot{y} = Ry, \quad R = A_1. \quad (3)$$

Фундаментальная матрица исходной системы (2) может быть вычислена согласно [4] по формуле

$$\Phi(t) = \Phi_1(t)\Phi_2(t),$$

$$\Phi_1(t) = \exp(A_1 t) = \begin{vmatrix} \cos \omega_0 t & \sin \omega_0 t & 0 & 0 \\ -\sin \omega_0 t & \cos \omega_0 t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \omega_0 t & -\sin \omega_0 t \\ 0 & 0 & \sin \omega_0 t & \cos \omega_0 t \end{vmatrix},$$

$$\Phi_2(t) = \exp(A_2 \tau) = \begin{vmatrix} \cos \tau & 0 & 0 & -\sin \tau \\ 0 & \cos \tau & -\sin \tau & 0 \\ 0 & \sin \tau & \cos \tau & 0 \\ \sin \tau & 0 & 0 & \cos \tau \end{vmatrix}.$$

Решения системы уравнений (2) записываются в виде $x(t) = \Phi(t)x(0)$.

Уравнения движения двухгироскопной вертикали [6] также относятся к указанному выше коммутативному классу и могут быть приведены к стационарному виду.

Отметим, что ряд других задач из теории гироскопических систем, которые описываются системами линейных нестационарных уравнений, интегрируемых в замкнутой форме, рассмотрен в [4, 7].

Список литературы

1. Ишлинский А.Ю. К теории гироскопического компаса // ПММ. – 1956. – Т. 20, Вып. 4. – С. 487-499.
2. Ишлинский А.Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. – М.: Наука, 1976. – 672 с.
3. Geckeler J.W. Kreiselscompass und schiffsmanöver // Ing. Arch. – 1933. – Vol. 4, No. 1,2.
4. Каленова В.И., Морозов В.М. Линейные нестационарные системы и их приложения к задачам механики. – М.: Физматлит, 2010. – 208 с.
5. Морозов В.В. О коммутативных матрицах // Уч. Зап. КГУ. – 1952. – Т. 112, Кн. 9. – С. 17-20.
6. Ляшенко В.Ф. О приводимости уравнений движения гироскопического компаса и двухгироскопной вертикали // ПММ. – 1962. – Т. 26, Вып. 2. – С. 372-396.
7. Морозов В.М., Каленова В.И. О применении методов теории приводимости к некоторым задачам динамики гироскопических систем // Изв. АН СССР. МТТ. – 1987. – №1. – С. 8-14.

ОСОБЕННОСТИ РАВНОВЕСИЯ ТЕЛА НА ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОЙ УПРУГОЙ ОПОРЕ

Досаев М.З.

НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова

Ключевые слова: механические задачи с особенностями, конструкции со скользящими сочленениями, телескопическая опора.

Аннотация. Рассматривается задача о разрушении при температурном расширении в плоской постановке. Установлено, что при имитации гибкости опорного скользящего стержня усилие в этом стержне в положении равновесия близком к вертикали растет с увеличением его жесткости. Отмечено, что тангенциальная опорная реакция может критически расти с возникновением колебаний конструкции в случае вертикального равновесия конструкции с упругой гибкой скользящей опорой

1. Введение

Известно, что Александр Юльевич Ишлинский интересовался механическими задачами с особенностями. Рассмотрим такую задачу.

В некоторых строительных конструкциях применяются скользящие сочленения, например для защиты здания от сейсмических разрушений или для борьбы с температурными расширениями креплений металлической кровли. Исследование таких типов соединений может представлять практический интерес. Рассмотрим одну из плоских постановок подобной задачи.

2. Парадокс телескопической опоры

Рассмотрим тяжёлое прямоугольное тело $ABCD$ ($AB = 2a$, $AD = 2b$) массой m (рис. 1), опирающееся двумя параллельными невесомыми опорами AA_1 и BB_1 на неподвижные шарниры A_1 и B_1 . Прямая A_1B_1 , соединяющая шарниры, горизонтальна. Центр масс прямоугольника G смещен от его геометрического центра вдоль стороны AB на расстояние d .

Левая опора AA_1 – жесткая, а правая опора BB_1 состоит из направляющей, по которой может скользить без трения, для простоты, невесомый стержень B_2B_1 .

На систему действуют следующие внешние силы: сила тяжести $P = mg$ (g – ускорение свободного падения), реакция в шарнире A_1 , которую мы разложим на нормальную N_1 и тангенциальную F_1 , и тангенциальная реакция F_2 в шарнире B_1 . Реакция в шарнире B_1 не имеет компоненты, направленной вдоль стержня BB_1 .

Рассмотрим положение тела, при котором опоры вертикальны. На первый взгляд, система могла бы сдвинуться из этого положения. На самом деле, несмотря на появившуюся потенциальную возможность опоры скользить по направляющей, реализовать эту возможность она не может. Из-за того, что опоры параллельны, любой поворот тела приведет к изменению расстояния между точками A_1 и B_1 . Следовательно, система ведет себя как твердое тело. С другой стороны, система не может сдвинуться из такого вертикального положения, и это

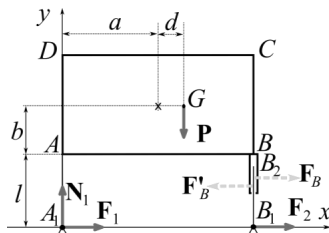


Рис. 1. Тело на скользящей опоре

положение является положением равновесия. Однако, уравнения равновесия не выполняются! Условие равенства моментов внешних сил относительно точки A_1 приводит к парадоксальному результату: $amg = 0$. Момент силы тяжести равен нулю! Разрешение обнаруженного парадокса (как и в [1]) состоит в том, что включение в систему потенциально скользящего сочленения приводит к острому конфликту с теми связями, которые остались «твёрдыми» и вызывает их бесконечно большие реакции. Иначе говоря, приводит к поломке конструкции.

Изменим высоту правого шарнира, приподняв его на высоту ε . Механическая система становится статически определимой. Из уравнений вертикального равновесия можно определить величины горизонтальных реакций: $F_1 = amg / \varepsilon, F_2 = -amg / \varepsilon$. Обе горизонтальные реакции стремятся к бесконечности при стремлении ε к нулю. Более того, вместо того, чтобы поднять правую опору, можно наоборот опустить ее на величину ε . Тогда значения реакций F_1, F_2 поменяют знак. И сила F_1 при стремлении ε к нулю уже будет стремиться к минус бесконечности! Какая же реакция должна быть для твёрдых элементов при $\varepsilon = 0$? В любом случае, при выравнивании высот жестких опор реальной конструкции со скользящим соединением неизбежна деформация (или разрушение) каких-то ее элементов.

При этом, даже для ε не равного нулю внутренние реакции $\{F_B, F'_B\}$ остаются неопределимыми, как и внутренние реакции всякого твердого тела. Они могут оказаться достаточно большими, если контакт стержня с направляющей реализуется на малой площадке, и плечо между этими силами окажется малой величиной.

3. Гибкость скользящей опоры

В реальной практике опорные элементы не являются абсолютно жесткими и допускают некоторый изгиб. Смоделируем гибкость скользящей опоры с помощью дополнительного шарнира и упругой пружины, препятствующей повороту этого шарнира. Для этого разобьем невесомый стержень B_1B_2 на два невесомых стержня: стержень B_1B_3 длиной l_1 и телескопический стержень B_3B_2 (рис. 2). Стержни B_1B_3 и B_3B_2 соединены друг с другом цилиндрическим шарниром B_3 и спиральной пружиной жесткостью c , препятствующей повороту этого шарнира. Пружина находится в равновесии, когда стержни B_1B_3 и B_3B_2 сонаправлены.

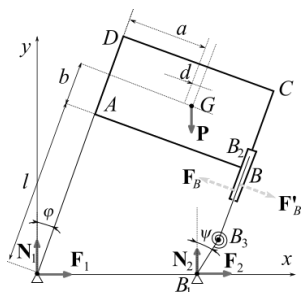


Рис. 2. Имитация гибкости скользящей опоры

К внутренним силам, действующим на систему, добавился момент T от спиральной пружины.

Несмотря на добавление степени подвижности, у рассматриваемой механической системы остается только одна степень свободы. Дадим оценку усилиям в опорных стержнях на изгиб и величине тангенциальной реакции в опоре.

Положение системы зададим обобщенной координатой: φ – угол между стержнем AA_1 и вертикалью. Для удобства введем дополнительную переменную: угол ψ между вертикалью и прямой B_1B_3 .

$$\psi = \psi(\varphi) = \varphi + \arcsin[2a(1 - \cos \varphi) / l_1]. \quad (1)$$

Дадим оценку величины момента $T = c(\psi - \varphi)$ спиральной пружины в положении равновесия. Будем искать равновесие вблизи вертикального положения опоры AA_1 , то есть для малых значений угла φ . Потенциальная энергия системы Π может быть записана следующим образом: $\Pi = mgy_G + c(\psi - \varphi)^2 / 2$, где y_G – высота центра масс G системы а разность углов задается формулой (1): $\psi - \varphi = \arcsin(2a(1 - \cos \varphi) / l_1) = a\varphi^2 / l_1 + o(\varphi^4)$.

Отметим, что потенциальная энергия спиральной пружины зависит от угла φ в четвертой степени, поэтому процедура линеаризации уравнений равновесия здесь бесполезна.

Разложим уравнение положения равновесия системы в ряд Тейлора по углу φ и отбросим в нем члены выше третьего порядка малости:

$$-mg(a + d) - mg(l + b)\varphi + mg(a + d)\varphi^2 / 2 + (mg(l + b)l_1^2 + 12ca^2)\varphi^3 / (6l_1^2) = 0. \quad (2)$$

Отметим, что в (2) параметр c появляется лишь при члене третьего порядка малости по углу φ . Считая параметр c достаточно большой величиной, будем искать решение уравнения (2) в следующем виде:

$$\varphi = a_1 / (c^{1/3}) + a_2 / (c^{2/3}) + a_3 / c, \quad (3)$$

где коэффициенты a_1, a_2, a_3 должны быть определены.

Подставим решение (3) в уравнение (2) и отбросим члены разложения уравнения порядка меньше, чем $1/c$. Коэффициенты разложения a_1, a_2, a_3 получим из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} a_1^3 &= mg(a + d)l_1^2 / (2a^2), \\ a_2 &= mg(l + b)l_1^2 / (6a^2a_1), \\ a_3 &= (mg(2(l + b)a_2 - (a + d)a_1^2)l_1^2 / (12a^2a_1 - a_2^2)) / a_1. \end{aligned} \quad (4)$$

Отметим, что разложение величины момента T в ряд Тейлора приводит к следующему соотношению:

$$T = ca\varphi^2 / l_1 + o(\varphi^4), \quad (5)$$

где величина большого параметра c умножается на квадрат малого угла. Определим порядок величины момента, подставив в (5) решение (3-4):

$$T = (2l_1)^{1/3} a^{-1/3} (mg(a + d))^{2/3} c^{1/3} / 2 + mgll_1 / (3a) + o(c^{-1/3}),$$

Очевидно, при устремлении c к бесконечности величина момента T также стремится к бесконечности. Таким образом, с ростом жесткости скользящего стержня нагрузка на его изгиб также растет. На практике это означает, что при условии жесткости остальных связей достаточно жесткая скользящая опора просто переломится при установке!

4. Оценка тангенциальной реакции упругой скользящей опоры

Обычно на практике для лучшего крепления скользящей опоры ее соединяют с телом дополнительной пружиной. Добавим пружину жесткости k в соединение стержня B_3B_2 с концом направляющей. Пусть при этом положению равновесия системы соответствует вертикальное положение опорных стержней. Отметим, что в случае вертикального равновесия возникает уникальная ситуация для исследуемой задачи: в положении равновесия тангенциальная реакция F_2 равна нулю.

Запишем главные члены разложения величины тангенциальной силы F_2 по малым величинам φ, ϕ в случае малых колебаний около положения равновесия:

$$F_2 = [(m + 2m_1)a + md]g[\varphi / (2a) - c\varphi^2 / l_1^2 + \dots] \quad (6)$$

Отметим, что величина тангенциальной силы F_2 не зависит от жесткости линейной пружины k . Проведем анализ формулы (6). Напомним, что величина c достаточна большая. Если амплитуда малых колебаний будет порядка $1/c$, то тангенциальная составляющая реакции будет того же порядка малости. Рассмотрим ситуацию, когда амплитуда колебаний достигнет величины $c^{-0.5}$. В этом случае для оценки тангенциальной реакции необходимо учитывать второе слагаемое формулы (6). Тангенциальная реакция становится конечной величиной. Наконец, если амплитуда еще увеличится, например, достигнет величины $c^{-0.4}$, оставаясь при этом малой величиной. Порядок тангенциальной реакции будет $c^{0.2}$, то есть F_2 может стать критически большой в практическом смысле.

Даже относительно малые амплитуды колебаний конструкций, содержащих скользящее сочленение, могут привести к разрушению опоры!

5. Заключение

Наличие потенциально скользящей опоры может не добавить подвижности конструкции. Для такой опоры обнаружен парадокс: уравнения равновесия не выполняются. При этом величина реакций связи может оказаться значительной, даже принимать бесконечные значения.

При имитации гибкости опорного скользящего стержня показано, что усилие в этом стержне в положении равновесия близком к вертикали растет с увеличением его жесткости, намного превышая вес тела.

Для вертикального равновесия конструкции с упругой гибкой скользящей опорой показано, что тангенциальная опорная реакция может критически расти с возникновением колебаний конструкции.

Список литературы

1. Досаев М.З., Самсонов В.А. Особенности динамики систем с упругими элементами и сухим трением // Прикладная математика и механика. – 2021. – Т. 85, № 4. – С. 426-435.

ОБ ОДНОЙ ЗАДАЧЕ ВНЕШНЕЙ БАЛЛИСТИКИ

Локшин Б.Я., Самсонов В.А.

НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова

Ключевые слова: внешняя баллистика, поле сил тяжести, начальные условия, данные измерений.

Аннотация. Рассмотрена задача внешней баллистики при нескольких известных данных измерений вдоль реальной траектории в некоторой фиксированной системе координат. Построена система обработки данных измерений, при которой ошибки в определении начальных условий будут находиться в допустимых пределах.

Введение и постановка задачи. В своей небольшой монографии [1] А.Ю. Ишлинский изложил математические основы некоторых возможных вариантов инерциального управления полетом баллистических ракет. Полет ракеты рассматривался как движение материальной точки в поле силы тяжести и в отсутствие среды. Это «прямая» задача внешней баллистики (ЗВБ). Полученные в монографии соотношения связывают ошибку в дальности полета ракеты с ошибками в момент выключения двигателя (окончания активного участка). С помощью автономных приборов, установленных на ракете, удастся произвести коррекцию траектории полета с целью уменьшения ошибки в дальности полета. В работе [2] исследуются траектории полета в ЗВБ с учетом воздействия среды. Изложены некоторые особенности этих траекторий.

Представляет интерес рассмотреть такую задачу внешней баллистики (ЗВБ), когда по нескольким известным данным измерений вдоль реальной траектории в некоторой фиксированной системе координат требуется восстановить начальные условия пуска объекта (координаты пуска, скорость, угол наклона) [3]. Поскольку измерения производятся с ошибкой, то и начальные условия будут определяться с ошибкой. Задача заключается в построении такой системы обработки данных измерений, при которой ошибки в определении начальных условий будут находиться в допустимых пределах.

О решении задачи. Сложность решения такой ЗВБ заключается, в частности, в том, что в процессе полета, например, реального артиллерийского снаряда его аэродинамический коэффициент не постоянен, а зависит от числа Маха. Кроме того, заранее не известен и сам объект. Известны только пространственные координаты объекта, величина и угол наклона вектора скорости в нескольких точках.

Если эти данные находятся в районе вершины траектории и ее нисходящей части, то по ним удастся в первом приближении оценить величину аэродинамического коэффициента в дозвуковом диапазоне скоростей и построить приближение для нисходящего участка.

Если эти данные находятся на восходящей части траектории, особенно на этапе сверхзвукового движения, то можно оценить даже положение точки пуска объекта.

Список литературы

1. Ишлинский А.Ю. Инерциальное управление баллистическими ракетами. – М.: Наука, 1968. – 142 с.
2. Локшин Б.Я., Самсонов В.А. Задача о движении тела в сопротивляющейся среде. Качественный анализ. – М.: Изд-во Московского университета, 2012. – 238 с.
3. Бляхман А.А., Матюгин С.Н., Прохоров А.Г. О возможности применения обзорной радиолокационной станции для решения задач определения точек прицеливания (падения) // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». – 2016. – №2. – С. 13-19.

ДЕФОРМИРОВАНИЕ ТРЕХСЛОЙНОЙ КРУГОВОЙ ПЛАСТИНЫ ЛОКАЛЬНЫМИ НАГРУЗКАМИ В ТЕМПЕРАТУРНОМ ПОЛЕ

Старовойтов Э.И., Леоненко Д.В.

Белорусский государственный университет транспорта

Ключевые слова: трехслойная круглая пластина, напряженно-деформированное состояние, локальные нагрузки, температурное поле.

Аннотация. Рассмотрено создание адекватных математических моделей для расчета напряженно-деформированного состояния конструкций и изделий в комплексных термосиловых полях, учитывающих как упругие, так и неупругие деформации. Исследуется несимметричная упругая круговая пластина при воздействии локальных нагрузок. Рассчитано влияние температуры на перемещения в пластине.

Введение. Современные тенденции в строительстве и машиностроении диктуют всё более жесткие требования к прочностным характеристикам конструкций и изделий. Необходимость повышения прочностных характеристик возрастает, а условия эксплуатации становятся всё более жесткими. В связи с этим широкое применение в технике и строительстве получили композитные, в том числе трехслойные, конструкции. Это вызывает необходимость создания адекватных математических моделей для расчета их напряженно-деформированного состояния в комплексных термосиловых полях. При этом необходимо учитывать как упругие, так и неупругие деформации. Физические уравнения состояния могут основываться на теории течения [1-3], или на соотношениях теории малых упругопластических деформаций [4-7].

В монографиях [8-15] содержатся различные математические модели статического и динамического деформирования многослойных и трехслойных элементов конструкций, приведены постановки краевых задач, изложены методы их расчета. Статьи [15-19] посвящены исследованию свободных и вынужденных колебаний трехслойных композитных пластин, связанных и не связанных с упругим основанием. Рассмотрены резонансные режимы колебаний, различные виды внешних воздействий – локальные, импульсные и резонансные нагрузки. В публикациях [20-22] анализируются частоты и амплитуды колебаний трехслойных цилиндрических оболочек. Нестационарное нагружение балки Тимошенко и цилиндрической оболочки рассмотрено в [23, 24]. Квазистатическому деформированию многослойных упругих и упругопластических балок и пластин с жестким соединением между слоями при непрерывных и локальных нагрузках посвящены статьи [25-29]. Термосиловому изгибу трехслойных стержней и пластин посвящены статьи [30, 31]. Здесь приведена постановка и получено аналитическое решение краевой задачи о термосиловом деформировании трехслойной круговой пластины при погонных силовых и моментных нагрузках.

1. Постановка краевой задачи. Рассматривается несимметричная по толщине трехслойная упругая круговая пластина (рис. 1). Постановка задачи и ее решение проводится в цилиндрической системе координат. Срединная плоскость заполнителя принимается за координатную, ось z направлена перпендикулярно вверх, к первому слою.

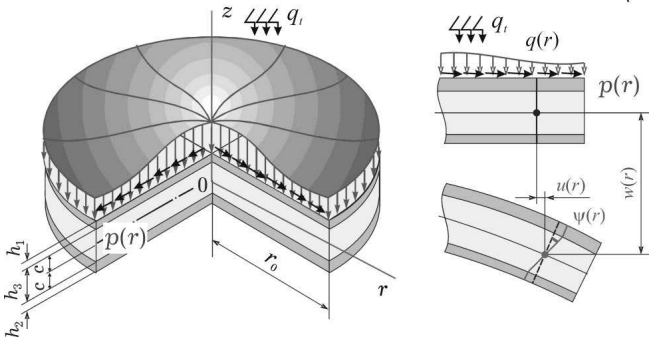


Рис. 1. Расчетная схема трехслойной пластины

Для тонких внешних несущих слоев толщиной $h_1 \neq h_2$ принимаются гипотезы Кирхгофа, для толстого жесткого заполнителя ($h_3 = 2c$), воспринимающего нагрузку в тангенциальном направлении, справедлива гипотеза о прямолинейности и несжимаемости деформированной нормали. Считаем, что к наружной поверхности первого несущего слоя приложены произвольные распределенные нагрузки $q(r)$, $p(r)$ и подводится тепловой поток q_t . Поверхность $z = -c - h_2$ и контур пластины принимаются теплоизолированными. Это позволяет неоднородное температурное поле $T(z)$, отсчитываемое от некоторой начальной температуры T_0 , вычислять с достаточной точностью по приближенной формуле, приведенной в [9]:

$$T = \frac{qH}{\lambda} \left\{ \tau + \frac{1}{2} \left(s + \frac{c+h_2}{H} \right)^2 - \frac{1}{6} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \cos \left[\pi n \left(s + \frac{c+h_2}{H} \right) \right] e^{-n^2 \pi^2 \tau} \right\}, \quad (1)$$

$$\tau = \frac{at}{H^2}, \quad a = \frac{\sum_{k=1}^3 \lambda_{tk} h_k}{\sum_{k=1}^3 \rho_k C_k h_k}, \quad H = \sum_{k=1}^3 h_k.$$

где λ_{tk} , C_k , ρ_k – теплопроводность, теплоемкость и плотность материала k -го слоя.

В силу симметрии нагрузки тангенциальные перемещения в слоях отсутствуют: $u_{\phi}^{(k)} = 0$ (k – номер слоя), а прогиб пластины w , относительный сдвиг в заполнителе ψ и радиальное перемещение координатной поверхности u не зависят от координаты ϕ . В дальнейшем эти функции считаем искомыми. Все перемещения и линейные размеры пластины отнесены к ее радиусу r_0 . На контуре пластины предполагается наличие жесткой диафрагмы, препятствующей относительному сдвигу слоев ($\psi = 0$ при $r = 1$).

Исходя из принятых гипотез, выражения радиальных перемещений $u_r^{(k)}$ через искомые функции будут следующими:

$$\begin{aligned} u_r^{(1)} &= u + c\psi - zw_r, & c \leq z \leq c + h_1, \\ u_r^{(3)} &= u + z\psi - zw_r, & -c \leq z \leq c, \\ u_r^{(2)} &= u - c\psi - zw_r, & -c - h_2 \leq z \leq -c, \end{aligned} \quad (2)$$

где z – координата рассматриваемого волокна; $u + c\psi$ – величина смещения верхнего несущего слоя за счет деформации заполнителя, для второго несущего

слоя это смещение будет $u - c\psi$; запятая в нижнем индексе обозначает операцию дифференцирования по следующей за ней координате.

Деформации в слоях следуют из (2) и соотношений Коши. Они связаны с напряжениями термоупругими соотношениями закона Гука в девиаторно-шаровой форме:

$$\begin{aligned} s_{\alpha}^{(k)} &= 2G_k(T_k)\varepsilon_{\alpha}^{(k)}, \quad \sigma^{(k)} = 3K_k(T_k)(\varepsilon^{(k)} - \alpha_{0k}T_k) \quad (k=1,2,3), \\ s_{rz}^{(3)} &= 2G_k(T_k)\varepsilon_{rz}^{(3)} \quad (\alpha = r, \varphi), \end{aligned} \quad (3)$$

где $s_{\alpha}^{(k)}, \varepsilon_{\alpha}^{(k)}$ – девиаторные, $\sigma^{(k)}, \varepsilon^{(k)}$ – шаровые части тензоров напряжений и деформаций; $G_k(T_k), K_k(T_k)$ – температурно-зависимые модули сдвига и объемного деформирования; α_{0k} – коэффициент линейного температурного расширения материала k -го слоя.

С помощью компонентов тензора напряжений $\sigma_{\alpha}^{(k)}$ ($\alpha = r, \varphi$), $\sigma_{rz}^{(3)}$ вводятся обобщенные внутренние усилия и моменты в пластине:

$$\begin{aligned} T_{\alpha} &\equiv \sum_{k=1}^3 T_{\alpha}^{(k)} = \sum_{k=1}^3 \int_{h_k} \sigma_{\alpha}^{(k)} dz, \quad M_{\alpha} \equiv \sum_{k=1}^3 M_{\alpha}^{(k)} = \sum_{k=1}^3 \int_{h_k} \sigma_{\alpha}^{(k)} z dz, \\ H_{\alpha} &= M_{\alpha}^{(3)} + c(T_{\alpha}^{(1)} - T_{\alpha}^{(2)}), \quad Q = \int_{-c}^c \sigma_{rz}^{(3)} dz. \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнения равновесия трехслойной пластины в перемещениях получены вариационным методом Лагранжа в [9]:

$$\begin{aligned} L_2(a_1u + a_2\psi - a_3w_{,r}) &= -p, \\ L_2(a_2u + a_4\psi - a_5w_{,r}) - 2cG_3\psi &= 0, \\ L_3(a_3u + a_5\psi - a_6w_{,r}) &= -q, \end{aligned} \quad (5)$$

где дифференциальные операторы L_2 (оператор Бесселя), L_3

$$L_2(g) \equiv \left(\frac{1}{r}(rg)_{,r} \right)_{,r} \equiv g_{,rr} + \frac{g_{,r}}{r} - \frac{g}{r^2}, \quad L_3(g) \equiv \frac{1}{r}(rL_2(g))_{,r} \equiv g_{,rrr} + \frac{2g_{,rr}}{r} - \frac{g_{,r}}{r^2} + \frac{g}{r^3}.$$

Коэффициенты a_i в (5) имеют интегральный вид, т.к. модули упругости материалов в слоях изменяются по их толщине вместе с температурой

$$\begin{aligned} a_1 &= \sum_{k=1}^3 K_{k0}, \quad a_2 = c(K_{10} - K_{20}), \quad a_3 = \sum_{k=1}^3 K_{k1}, \quad a_4 = K_{32} + c^2(K_{10} + K_{20}), \\ a_5 &= K_{32} + c(K_{11} + K_{21}), \quad a_6 = \sum_{k=1}^3 K_{k2}, \\ K_{km} &= \int_{h_k} \left[K_k(T_k) + \frac{4}{3}G_k(T_k) \right] z^m dz \quad (m=0, 1, 2). \end{aligned} \quad (6)$$

Если температурное поле усреднено по толщине k -го слоя пластины, то значения упругих параметров постоянно внутри слоя

$$G_k(T_k) \equiv G_k(T_{0k}), \quad K_k(T_k) \equiv K_k(T_{0k}), \quad T_{0k}(t) = \frac{1}{h_k} \int_{h_k} T_k(z, t) dz.$$

В этом случае, после интегрирования в (6) получим

$$\begin{aligned}
a_1 &= \sum_{k=1}^3 h_k K_k^+, \quad a_2 = c(h_1 K_1^+ - h_2 K_2^+), \quad K_k + \frac{4}{3} G_k \equiv K_k^+, \quad K_k - \frac{2}{3} G_k \equiv K_k^-, \\
a_3 &= h_1 \left(c + \frac{1}{2} h_1 \right) K_1^+ - h_2 \left(c + \frac{1}{2} h_2 \right) K_2^+, \quad a_4 = c^2 \left(h_1 K_1^+ + h_2 K_2^+ + \frac{2}{3} c K_3^+ \right), \\
a_5 &= c \left[h_1 \left(c + \frac{1}{2} h_1 \right) K_1^+ + h_2 \left(c + \frac{1}{2} h_2 \right) K_2^+ + \frac{2}{3} c^2 K_3^+ \right], \\
a_6 &= h_1 \left(c^2 + c h_1 + \frac{1}{3} h_1^2 \right) K_1^+ + h_2 \left(c^2 + c h_2 + \frac{1}{3} h_2^2 \right) K_2^+ + \frac{2}{3} c^3 K_3^+. \quad (7)
\end{aligned}$$

Краевая задача определения функций $u(r)$, $\psi(r)$, $w(r)$ замыкается присоединением к системе уравнений (5) силовых (8) и / или кинематических граничных условий:

$$\begin{aligned}
&\text{– при заделке контура пластины} \\
&\quad u = \psi = w = w_{,r} = 0 \quad \text{при } r = 1; \\
&\text{– при шарнирном опирании пластины} \\
&\quad u = \psi = w = M_r = 0 \quad \text{при } r = 1. \quad (8)
\end{aligned}$$

Следует отметить, что температура в явном виде в уравнения равновесия (5) не входит. Она влияет на величину модулей упругости материалов слоев (12, 122) и входит явным образом в выражение для радиального момента (4) в граничных условиях (8).

2. Общее решение краевой задачи. Решение системы дифференциальных уравнений (5) при изотермическом нагружении получено в [9]. В случае воздействия температуры изменения возникнут только в константах интегрирования, т.е. можно принять

$$\begin{aligned}
\psi &= C_2 I_1(\beta r) + C_3 K_1(\beta r) + \psi_r, \\
w &= \frac{b_2}{b_3} \int \psi dr - \frac{a_3}{b_3 a_1} \int L_2^{-1}(p) dr + \frac{1}{b_3} \int L_3^{-1}(q) dr + \frac{1}{4} C_1 r^2 (\ln r - 1) + \frac{C_5 r^2}{4b_3} + C_6 \ln r + C_4, \\
u &= \frac{a_3}{a_1} w_{,r} - \frac{a_2}{a_1} \psi - \frac{1}{a_1} L_2^{-1}(p) + \frac{C_7 r}{2} + \frac{C_8}{r}, \quad (9)
\end{aligned}$$

где $I_1(\beta r)$ – модифицированная функция Бесселя первого порядка, $K_1(\beta r)$ – функция Макдональда; L_2^{-1} , L_3^{-1} – линейные интегральные операторы, обратные дифференциальным операторам, введенным в (5)

$$L_2^{-1}(f) \equiv \frac{1}{r} \int r \int f dr dr, \quad L_3^{-1}(f) \equiv \frac{1}{r} \int r \int \frac{1}{r} \int r f dr dr dr;$$

интегралы являются определенными с переменным верхним пределом, т.е.

$$\int_0^r g(x) dx \equiv \int g(x) dx.$$

Входящая в (9) функция $\psi_r(r)$ является частным решением уравнения Бесселя

$$L_2(\psi) - \beta^2 \psi = f,$$

где $\beta^2 = \frac{2cb_3G_3}{b_1b_3 - b_2^2}$, $b_1 = \frac{a_1a_4 - a_2^2}{a_1}$, $b_2 = \frac{a_1a_5 - a_2a_3}{a_1}$, $b_3 = \frac{a_1a_6 - a_3^2}{a_1}$,

$$f(r) = \frac{b_3}{b_1b_3 - b_2^2} \left[\frac{p(a_2b_3 - a_3b_2)}{a_1b_3} + \frac{b_2}{b_3r} \left(\int q r dr - C_1 \right) \right].$$

Исходя из условия гладкости решения в центре пластины ($r = 0$) для сплошных пластин необходимо в (9) положить $C_1 = C_3 = C_6 = C_8 = 0$. Остальные четыре константы интегрирования определяются из граничных условий (8).

В результате аналитическое решение задачи теории термоупругости о деформировании сплошной круглой трехслойной пластины принимает вид

$$\begin{aligned} \psi &= C_2 I_1(\beta r) - K_1(\beta r) \int I_1(\beta r) f(r) r dr + I_1(\beta r) \int K_1(\beta r) f(r) r dr, \\ w &= \frac{1}{b_3} \left[b_2 \left(\frac{C_2}{\beta} I_0(\beta r) + \int \psi_r dr \right) - \int \left(\frac{a_3}{a_1} L_2^{-1}(p) - L_3^{-1}(q) \right) dr + \frac{C_3 r^2}{4} + C_4 \right], \\ u &= \frac{a_3}{a_1 a_6 - a_3^2} \left[L_3^{-1}(q) - \frac{a_6}{a_3} L_2^{-1}(p) + \left(a_5 - \frac{a_2 a_6}{a_3} \right) \psi + C_7 r \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Если контур пластинки заделан, то, удовлетворяя первому из условий (8), получим следующие константы интегрирования:

$$\begin{aligned} C_2 &= - \frac{\psi_r}{I_1(\beta)} \Big|_{r=1}, \quad C_4 = -b_2 \left(\frac{C_2}{\beta} I_0(\beta) + \int \psi_r dr \Big|_{r=1} \right) + \int \left(\frac{a_3}{a_1} L_2^{-1}(p) - L_3^{-1}(q) \right) dr \Big|_{r=1} - \frac{C_5}{4}, \\ C_5 &= 2 \left(\frac{a_3}{a_1} L_2^{-1}(p) - L_3^{-1}(q) \right) \Big|_{r=1}, \quad C_7 = \left(\frac{a_6}{a_3} L_2^{-1}(p) - L_3^{-1}(q) \right) \Big|_{r=1}. \end{aligned} \quad (11)$$

В этом случае решение (10), (11) не зависит явно от температуры. Она будет влиять только на значения модулей упругости материалов.

После вычисления перемещений (9), (10) деформации определяются из соотношений Коши, напряжения по формулам (3).

3. Изгиб локальными нагрузками. Рассмотрим несколько примеров осесимметричного деформирования круговой трехслойной пластины локальными нагрузками. Для удобства аналитической записи воспользуемся функцией Хевисайда нулевого порядка:

$$H_0(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0. \end{cases}$$

3.1. Нагрузка, равномерно распределенная по кольцу $[a, b]$. На пластину действует локальная нагрузка, равномерно распределенная по кольцу относительного радиуса $a \leq r \leq b \leq 1$. Тогда ее можно записать в виде

$$q = q_0 (H_0(b-r) - H_0(a-r)). \quad (12)$$

После подстановки нагрузки (12) в решение (9) сдвиг в заполнителе принимает вид

$$\begin{aligned} \psi = & C_2 I_1(\beta r) + C_3 K_1(\beta r) + \\ & + \frac{\gamma_1 q_0}{2\beta^2} H_0(b-r) \left[\frac{b^2}{r} - r + 2b(K_1(\beta b)I_1(\beta r) - I_1(\beta b)K_1(\beta r)) \right] - \\ & - \frac{\gamma_1 q_0}{2\beta^2} H_0(a-r) \left[\frac{a^2}{r} - r + 2a(K_1(\beta a)I_1(\beta r) - I_1(\beta a)K_1(\beta r)) \right] + \frac{C_1 \gamma_1}{\beta^2 r}. \end{aligned} \quad (13)$$

Прогиб $w(r)$ и радиальное перемещение $u(r)$ круговой трехслойной пластины формально сохраняют вид (9), однако входящие в них интегралы следующие

$$\begin{aligned} \int L_3^{-1}(q)dr = & q_0 \left[\frac{r^4 - 5b^4}{64} - \frac{b^4}{16} \ln\left(\frac{r}{b}\right) - \frac{b^2 r^2}{8} \ln\left(\frac{r}{b}\right) + \frac{b^2 r^2}{16} \right] H(b-r) - \\ & - q_0 \left[\frac{r^4 - 5a^4}{64} - \frac{a^4}{16} \ln\left(\frac{r}{a}\right) - \frac{a^2 r^2}{8} \ln\left(\frac{r}{a}\right) + \frac{a^2 r^2}{16} \right] H(a-r), \\ \int \Psi dr = & \frac{C_2 I_0(\beta r)}{\beta} - \frac{C_3 K_0(\beta r)}{\beta} + \frac{C_1 \gamma_1}{\beta^2} \ln(r) + \frac{\gamma_1 q_0}{2\beta^2} H_0(b-r) \times \\ & \times \left[\frac{b^2 - r^2}{2} + b^2 \ln\left(\frac{r}{b}\right) + \frac{2b}{\beta} (K_1(\beta b)I_0(\beta r) + I_1(\beta b)K_0(\beta r)) - \frac{2}{\beta^2} \right] - \frac{\gamma_1 q_0}{2\beta^2} \times \\ & \times H_0(a-r) \left[\frac{a^2 - r^2}{2} + a^2 \ln\left(\frac{r}{a}\right) + \frac{2a}{\beta} (K_1(\beta a)I_0(\beta r) + I_1(\beta a)K_0(\beta r)) - \frac{2}{\beta^2} \right]. \end{aligned}$$

Константы интегрирования при защемленном контуре пластины будут

$$\begin{aligned} C_1 = & -\frac{q_0(b^2 - a^2)}{2}, \quad C_2 = \frac{\gamma_1 q_0}{\beta^2 I_1(\beta)} \left(\frac{b^2 - a^2}{2} - bK_1(\beta)I_1(\beta b) + aK_1(\beta)I_1(\beta a) \right), \\ C_3 = & \frac{q_0 \gamma_1}{\beta^2} (bI_1(\beta b) - aI_1(\beta a)), \quad C_4 = \frac{b_2}{b_3} \left(-\frac{C_2 I_0(\beta)}{\beta} + \frac{C_3 K_0(\beta)}{\beta} \right) - \frac{1}{4b_3} (C_1 + C_5), \\ C_5 = & q_0 \frac{a_3^2 - a_1 b_3 + a_7 a_1}{4a_1(a_6 + a_7)} \left(b^2 \left(1 - \frac{b^2}{2} \right) - a^2 \left(1 - \frac{a^2}{2} \right) \right) - \frac{6b_3}{a_6 + a_7} \sum_{k=1}^3 \alpha_{0k} \int_{h_k} K_k T_k z dz, \\ C_6 = & \frac{q_0}{16b_3} (b^4 - a^4), \\ C_7 = & \frac{2a_3}{a_1(a_6 + a_7)} \left(3 \sum_{k=1}^3 \alpha_{0k} \int_{h_k} K_k T_k z dz + \frac{q_0 b^2}{4} \left(1 - \frac{b^2}{2} \right) - \frac{q_0 a^2}{4} \left(1 - \frac{a^2}{2} \right) \right), \quad C_8 = 0. \end{aligned}$$

Здесь и далее численные результаты приведены для пластины единичного радиуса шарнирно опертой по контуру, составленной из материалов Д16-Т – фторопласт-4–Д16-Т. Соответствующие механические характеристики материалов приведены в [9]. Величина интенсивности нагрузки $q_0 = 1$ МПа, относительные толщины слоев $h_1 = 0,02$; $h_2 = 0,06$; $h_3 = 0,4$. Коэффициенты вычислялись по формулам (7).

На рисунке 2 показано изменение прогиба пластины в зависимости от положения кольцевого пятна нагрузки шириной $b = 0,25$, при продвижении его к контуру: $1 - T = 293 \text{ К}$, $2 - T = 233 \text{ К}$. При $a = 0$ нагрузка распределена по кругу радиуса b , при $a = 0,75$ кольцо нагрузки примыкает к контуру пластины. Максимум наблюдается при кольцевой нагрузке с внутренним радиусом $a = 0,25$. При нагревании пластины на 30 К экстремальные перемещения увеличиваются примерно на 121% .

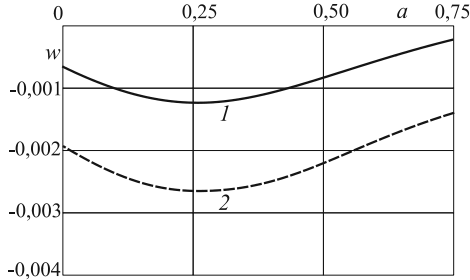


Рис. 2. Зависимость прогиба пластины от внутреннего радиуса кольцевой нагрузки

3.2. Поперечная погонная сила. Пусть на круговую трехслойную пластину действует погонная поперечная сила $Q(r)$ постоянной интенсивности Q_0 , приложенная вдоль силовой окружности радиуса $r = a$.

Решение задачи проведем, применяя результаты, полученные для распределенной по кольцу $a - \xi \leq r \leq a + \xi$ поверхностной равномерно распределенной нагрузки q_0 . Предположим, что кольцо тонкое $\xi \ll 1$. Тогда произведем в функции (13) замену $q_0 = Q_0/(2\xi)$ и устремим параметр ξ к нулю, оставляя Q_0 постоянной. Для относительного сдвига имеем

$$\begin{aligned} \psi = \lim_{\xi \rightarrow 0} & \left[C_2 I_1(\beta r) + C_3 K_1(\beta r) + \frac{\gamma_1 Q_0}{4\xi \beta^2} H_0(a + \xi - r) \times \right. \\ & \times \left[\frac{(a + \xi)^2}{r} - r + 2(a + \xi) (K_1(\beta(a + \xi)) I_1(\beta r) - I_1(\beta(a + \xi)) K_1(\beta r)) \right] - \\ & - \frac{\gamma_1 Q_0}{4\xi \beta^2} H_0(a - \xi - r) \left[\frac{(a - \xi)^2}{r} - r + 2(a - \xi) (K_1(\beta(a - \xi)) I_1(\beta r) - \right. \\ & \left. \left. - I_1(\beta(a - \xi)) K_1(\beta r)) \right] + \frac{C_1 \gamma_1}{\beta^2 r} \right]. \end{aligned}$$

После взятия предела решение задачи об изгибе круговой трехслойной пластины под действием погонной силовой нагрузки следующее:

$$\begin{aligned} \psi = & C_2 I_1(\beta r) + C_3 K_1(\beta r) + \\ & + \frac{\gamma_1 Q_0 a}{\beta} H_0(a - r) \left(\frac{1}{\beta r} - K_1(\beta r) I_0(\beta a) - I_1(\beta r) K_0(\beta a) \right) + \frac{C_1 \gamma_1}{\beta^2 r}, \\ w = & \frac{b_2}{b_3} \int \psi dr + \frac{1}{b_3} \int L_3^{-1}(Q_0) dr - \frac{C_1}{4b_3} r^2 (\ln r - 1) + \frac{C_5 r^2}{4b_3} + C_6 \ln r + C_4, \end{aligned}$$

$$u = \frac{a_3}{a_1} w, r - \frac{a_2}{a_1} \psi + \frac{C_7 r}{2} + \frac{C_8}{r}, \quad (14)$$

$$\text{где } \int L_3^{-1}(Q_0) dr = \frac{Q_0 a}{4} \left(r^2 - a^2 - a^2 \ln\left(\frac{r}{a}\right) - r^2 \ln\left(\frac{r}{a}\right) \right) H_0(a-r),$$

$$\int \psi dr = \frac{C_2 I_0(\beta r)}{\beta} - \frac{C_3 K_0(\beta r)}{\beta} + \frac{C_1 \gamma_1}{\beta^2} \ln(r) + \frac{\gamma_1 Q_0 a}{\beta^2} H_0(a-r) \times$$

$$\times \left(\ln\left(\frac{r}{a}\right) + I_0(\beta a) K_0(\beta r) - K_0(\beta a) I_0(\beta r) \right).$$

Константы интегрирования при шарнирно опертом контуре

$$C_1 = -Q_0 a, \quad C_2 = \frac{\gamma_1 Q_0 a}{\beta^2 I_1(\beta)} (1 - \beta K_1(\beta) I_0(\beta a)), \quad C_3 = \frac{\gamma_1 Q_0 a I_0(\beta a)}{\beta},$$

$$C_4 = \frac{b_2}{b_3} \left(-\frac{C_2 I_0(\beta)}{\beta} + \frac{C_3 K_0(\beta)}{\beta} \right) - \frac{1}{4b_3} (C_1 + C_5),$$

$$C_5 = \frac{Q_0 a}{2} (1 - a^2) \frac{a_3^2 - a_1 b_3 + a_7 a_1}{a_1 (a_6 + a_7)} - \frac{6b_3}{a_6 + a_7} \sum_{k=1}^3 \alpha_{0k} \int_{h_k} K_k T_k z dz, \quad C_6 = \frac{Q_0 a^3}{4b_3},$$

$$C_7 = \frac{2a_3}{a_1 (a_6 + a_7)} \left(3 \sum_{k=1}^3 \alpha_{0k} \int_{h_k} K_k T_k z dz + \frac{Q_0 a}{2} (1 - a^2) \right), \quad C_8 = 0.$$

На рисунках 3 а, б показано изменение сдвига в заполнителе и прогиба рассматриваемой пластины вдоль радиуса. Кривые построены при различных радиусах силовой окружности: 1 – $a = 0,5$; 2 – $a = 0,75$; без штриха – $T = 293$ К, со штрихом – $T = 323$ К.

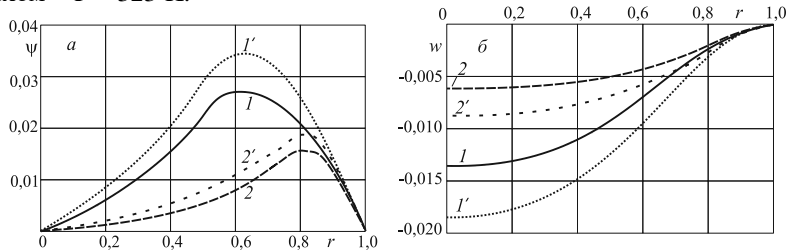


Рис. 3. Сдвиг в заполнителе и прогиб пластины при погонной силовой нагрузке

Интенсивность погонной силы $Q_0 = 3$ МН/м. С ростом радиуса силовой окружности экстремумы относительного сдвига смещаются к контуру пластины. При нагревании пластины на 30 К перемещения увеличиваются примерно на 45%.

Максимальных значений прогиба достигают при радиусе силовой окружности, примерно, $a = 0,38$. Это подтверждают графики на рисунке 7.18, иллюстрирующие изменения прогиба в центре пластины в зависимости от радиуса силовой окружности при различных температурах: 1 – $T = 293$ К,

2 – $T = 233$ К. При дальнейшем продвижении нагрузки к контуру ее равнодействующая возрастает, но прогиб уменьшается до нуля.

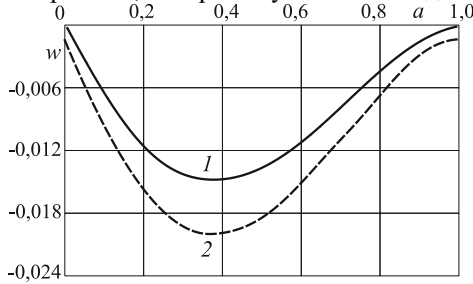


Рис. 4. Зависимость максимального прогиба от радиуса силовой окружности

3.3. Сосредоточенная сила. Формулы (14) не описывают деформирование пластины при действии сосредоточенной силы в ее центре, так как при $a = 0$ окружность вырождается и равнодействующая погонной силы обращается в нуль. Чтобы этого избежать, предположим, что указанная равнодействующая $Q = 2\pi a Q_0$ остается постоянной при изменении радиуса силовой окружности. Это возможно, если интенсивность Q_0 будет переменной, компенсируя изменения радиуса a .

Чтобы получить соответствующее решение, сделаем замену $Q_0 = Q/2\pi a$ в (14). Тогда получим следующие перемещения:

$$\begin{aligned} \psi &= C_2 I_1(\beta r) + C_3 K_1(\beta r) + \\ &+ \frac{\gamma_1 Q}{2\pi\beta} H_0(a-r) \left(\frac{1}{\beta r} - K_1(\beta r) I_0(\beta a) - I_1(\beta r) K_0(\beta a) \right) + \frac{C_1 \gamma_1}{\beta^2 r}, \\ w &= \frac{b_2}{b_3} \int \psi dr + \frac{1}{b_3} \int L_3^{-1}(Q) dr - \frac{C_1}{4b_3} r^2 (\ln r - 1) + \frac{C_5 r^2}{4b_3} + C_6 \ln r + C_4, \\ u &= \frac{a_3}{a_1} w_{,r} - \frac{a_2}{a_1} \psi + \frac{C_7 r}{2} + \frac{C_8}{r}, \end{aligned} \quad (15)$$

где $\int L_3^{-1}(Q) dr = \frac{Q}{8\pi} \left(r^2 - a^2 - (r^2 + a^2) \ln \left(\frac{r}{a} \right) \right) H_0(a-r)$,

$$\begin{aligned} \int \psi dr &= \frac{C_2 I_0(\beta r)}{\beta} - \frac{C_3 K_0(\beta r)}{\beta} + \frac{C_1 \gamma_1}{\beta^2} \ln(r) + \frac{\gamma_1 Q}{2\pi\beta^2} H_0(a-r) \times \\ &\times \left(\ln \left(\frac{r}{a} \right) + I_0(\beta a) K_0(\beta r) - K_0(\beta a) I_0(\beta r) \right). \end{aligned}$$

Константы интегрирования при защемленном контуре пластины

$$\begin{aligned} C_1 &= -\frac{Q}{2\pi}, \quad C_2 = \frac{\gamma_1 Q}{2\pi\beta^2 I_1(\beta)} (1 - \beta K_1(\beta) I_0(\beta a)), \quad C_3 = \frac{\gamma_1 Q I_0(\beta a)}{2\pi\beta}, \\ C_4 &= \frac{b_2}{b_3} \left(-\frac{C_2 I_0(\beta)}{\beta} + \frac{C_3 K_0(\beta)}{\beta} \right) - \frac{1}{4b_3} (C_1 + C_5), \end{aligned}$$

$$C_5 = \frac{Q}{4\pi} (1-a^2) \frac{a_3^2 - a_1 b_3 + a_7 a_1}{a_1 (a_6 + a_7)} - \frac{6b_3}{a_6 + a_7} \sum_{k=1}^3 \alpha_{0k} \int_{h_k} K_k T_k z dz, \quad C_6 = \frac{Q a^2}{8\pi b_3},$$

$$C_7 = \frac{2a_3}{a_1 (a_6 + a_7)} \left(3 \sum_{k=1}^3 \alpha_{0k} \int_{h_k} K_k T_k z dz + \frac{Q}{4\pi} (1-a^2) \right), \quad C_8 = 0.$$

Изменение максимального прогиба пластины (15) в зависимости от радиуса окружности, вдоль которой приложена поперечная погонная силовая нагрузка с постоянной равнодействующей, рассчитано по формулам и показано на рисунке 5: $1 - T = 293 \text{ К}$, $2 - T = 323 \text{ К}$. Максимум здесь наблюдается при $a = 0$, что соответствует сосредоточенной силе, приложенной в центре пластины. При продвижении нагрузки к контуру прогиб уменьшается до нуля. При нагревании прогиб увеличивается пропорционально.

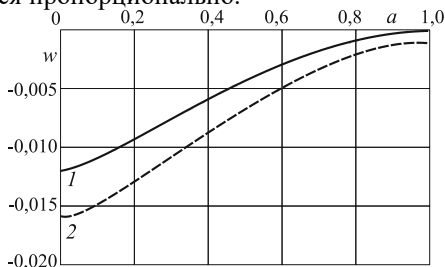


Рис. 5. Изменение максимального прогиба пластины в зависимости от радиуса окружности

Заключение. Предложенные постановки и решения краевых задач позволяют исследовать напряженно-деформированное состояние трехслойных круговых пластин в случае локальных кольцевых и погонных нагрузок в температурном поле. Численные расчеты показали существенное влияние температуры на перемещения в пластине.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Конвергенция-2025».

Список литературы

1. Ишлинский А.Ю., Ивлев Д.Д. Математическая теория пластичности. – М.: Физматлит, 2001. – 704 с.
2. Ишлинский А.Ю. Общая теория пластичности с линейным упрочнением // Украинский математический журнал. – 1954. – Т. 6, № 3. – С. 314-324.
3. Ивлев Д.Д., Ишлинский А.Ю., Максимова Л.А. Условия изотропии и обобщенный ассоциированный закон пластического течения // Доклады Академии наук. – 2000. – Т. 371, № 1. – С. 49-51.
4. Ильюшин А.А. Пластичность. Ч. 1. Упругопластические деформации. – М.: Гостехиздат, 1948. – 376 с.
5. Ильюшин А.А. Пластичность. Основы общей математической теории. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 272 с.
6. Москвитин В.В. Циклическое нагружение элементов конструкций. – М.: Наука, 1981. – 344 с.

7. Либерзон М.Р. Динамика технологических процессов с использованием явления электропластичности // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред. Материалы XXXIII международного симпозиума имени А.Г. Горшкова. – М., 2022. – С. 126-128.
8. Болотин В.В., Новичков Ю.Н. Механика многослойных конструкций. – М.: Машиностроение, 1980. – 375 с.
9. Горшков А.Г. Старовойтов Э.И., Яровая А.В. Механика слоистых вязкоупругопластических элементов конструкций. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 576 с.
10. Aghalovyan L. Asymptotic theory of anisotropic plates and shells – Singapore–London: World Scientific Publishing, 2015. – 376 p.
11. Старовойтов Э.И. Леоненко Д.В., Рабинский Л.Н. Деформирование трехслойных физически нелинейных стержней. – М.: Изд-во МАИ, 2016. – 184 с.
12. Журавков М.А., Старовойтов Э.И. Математические модели механики твердого тела. – Минск: БГУ, 2021. – 535 с.
13. Прикладные задачи механики композитных цилиндрических оболочек / Ю.С. Соломонов и др. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 408 с.
14. Carrera E., Fazzolari F.A., Cinefra M. Thermal Stress Analysis of Composite Beams, Plates and Shells: Computational Modelling and Applications. – Academic Press, 2016. – 410 p.
15. Zhuravkov M.A., Lyu Yongtao, Starovoitov E.I. Mechanics of Solid Deformable Body. – Singapore: Springer, 2023. – 317 p.
16. Starovoitov E.I., Leonenko D.V., Yarovaya A.V. Vibrations of round three-layer plates under the action of distributed types local loads // Strength of Materials. – 2002. – Vol. 34, no. 5. – P. 474-481.
17. Pronina P.F., Tushavina O.V., Starovoitov E.I. Study of the radiation situation in Moscow by investigating elastoplastic bodies in a neutron flux taking into account thermal effects // Periódico Tchê Química. – 2020. – Vol. 17, no 35. – P. 753-764.
18. Gorshkov A.G., Starovoitov E.I., Yarovaya A.V. Vibrations of a Circular Linear-Viscoelastic Three-Layered Plate // Strength of materials. – 2001. – Vol. 33, no. 3. – P. 270-276.
19. Vakhneev S., Starovoitov E. Damping of circular composite viscoelastic plate vibration under neutron irradiation // Journal of Applied Engineering Science. – 2020. – Vol. 18(4). – P. 699-704.
20. Старовойтов Э.И., Леоненко Д.В., Плескачевский Ю.М. Колебания трехслойных цилиндрических оболочек в упругой среде Винклера при резонансе // Механика машин, механизмов и материалов. – 2013. – № 4(25). – С. 70-73.
21. Старовойтов Э.И., Леоненко Д.В. Исследование спектра частот трехслойной цилиндрической оболочки с упругим наполнителем // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 162-169.
22. Leonenko D.V., Starovoitov E.I. Vibrations of Cylindrical Sandwich Shells with Elastic Core Under Local Loads // International Applied Mechanics. – 2016. – Vol. 52, no. 4. – P. 359-367.
23. Fedotenkov G.V., Tarlakovsky, D.V., Vahterova Y.A. Identification of non-stationary load upon Timoshenko beam // Lobachevskii journal of mathematics. – 2019. – Vol.40, no.4. – P. 439-447.
24. Tarlakovskii D.V., Fedotenkov G.V. Two-Dimensional Nonstationary Contact of Elastic Cylindrical or Spherical Shells // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2014. – Vol. 43, no. 2. – P. 145-152.
25. Паймушин В.Н. Нелинейная теория трехслойных оболочек с трансверсально-мягким наполнителем, имеющих участки расслоений и контурную подкрепляющую диафрагму // Прикладная математика и механика. – 2018. – Т. 82, № 1. – С. 44-57.
26. Grover N., Singh B. N., Maiti D. K. An inverse trigonometric shear deformation theory for supersonic flutter characteristics of multilayered composite plates // Aerospace Science and Technology. – 2016. – No. 52. – P. 41-51.
27. Škec L., Jelenić G. Analysis of a geometrically exact multi-layer beam with a rigid interlayer connection // Acta Mechanica. – 2014. – Vol. 225, no. 2. – P. 523-541.

28. Starovoitov E.I., Pleskachevskii Yu.M., Leonenko D.V., Tarlakovskii D.V. Deformation of a step composite beam in a temperature field // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2015. – Vol. 88, no.4. – P. 1023-1029.
29. Старовойтов Э.И., Козел А.Г. Изгиб упругой круговой трехслойной пластины на основании Пастернака // *Механика композиционных материалов и конструкций*. – 2018. – Т. 2, №3. – С. 392-406.
30. Starovoitov E. I., Leonenko D. V., Tarlakovskii D.V. Thermal-force deformation of a physically nonlinear three-layer stepped rod // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2016. – Vol. 89, no. 6. – P. 1582-1590.
31. Старовойтов Э.И., Леоненко Д.В., Абдусаттаров А. Изгиб трехслойной пластины в температурном поле знакопеременной кольцевой нагрузкой // *Механика композиционных материалов и конструкций*. – 2022. – Т. 28, №3. – С. 339-358.

ФОРМИРОВАНИЕ ПОЗИЦИОННЫХ СТРАТЕГИЙ ТЕСТИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Лемак С.С.

МГУ им. М.В. Ломоносова

Ключевые слова: позиционные стратегии, управление динамическими объектами, возмущения, стенды-тренажеры.

Аннотация. Рассмотрен способ оценки точности алгоритмов управления линейной системой на конечном интервале времени при наличии начальных и постоянно-действующих на управляемую систему возмущений. Исследовано применение при формировании математического обеспечения для различного рода стендов-тренажеров для оценки качества пилотирования маневрами ЛА в экстремальных ситуациях.

В работе рассмотрен способ оценки точности алгоритмов управления линейной системой на конечном интервале времени при наличии начальных и постоянно-действующих на управляемую систему возмущений. Предполагается, что как управления, так и возмущения могут вести себя произвольным образом в рамках известных границ изменения. Структура алгоритма управления неизвестна, он представляет собой «черный ящик» с известными входом и выходом. Такой подход находит применение при формировании математического обеспечения различного рода стендов-тренажеров, например для оценки качества пилотирования маневрами ЛА в экстремальных ситуациях.

Объективную оценку качества управления можно получить при наличии седловой точки в дифференциальной игре между управлением и возмущениями. Для удовлетворения этого требования предложено использовать позиционные стратегии тестирования. Рассмотрены два способа формирования позиционных стратегий тестирования.

Для выработки навыков управления сложными системами в экстремальных ситуациях, например управлении различного рода механизмами, содержащими упругие элементы на орбитальной станции, управлении ориентацией спутников, управление самолетом либо автомобилем при больших перегрузках, действующих на пилота, очень важное значение получает повышение качества тренировок оператора (пилота) на различного рода стендах как динамических, так и компьютерных. Для достижения поставленных целей системы управления такими стендами-тренажерами имеют сложную многоуровневую структуру [1].

Современный уровень разработок динамических тренажеров предполагает наличие элементов искусственного интеллекта в системе управления таким стендом. В частности, предусматривается наличие системы тестирования качества ручного управления при прохождении тренировки. Большое значение тестирование качества управления приобретает в ситуациях, когда непомерно велика цена ошибки при управлении динамическим объектом. Схема тестирующего тренажера [1] представлена на рисунке 1.

Математическое обеспечение стенда-тренажера подразумевает наличие блока компьютерной модели (см. рис. 1) управляемого объекта, который принимает на вход сигналы управления, формируемые оператором, и производит

интегрирование уравнений движения управляемого объекта. Блоки визуальной и динамической имитации представляют собой компьютерные и технические средства, способные по поведению модели динамического объекта формировать для воздействия на тестируемого человека (оператора) визуальное и гравитационно-перегрузочное окружение, приближенное к реальности. Оператор, в свою очередь, с помощью органов управления формирует управляющие сигналы, поступающие на вход блока компьютерной модели управляемого объекта. В данной схеме присутствует блок алгоритмов тестирования, целью которого является формирование мешающих движению параметров и возмущений и объективная оценка действий оператора.



Рис. 1. Функциональная схема тестирующего тренажера

Важной частью математического обеспечения стенда является блок динамической имитации воздействия на оператора, находящегося на стенде. Постановка и решение задач динамической имитации представлены в работах [2, 3]. Формирование мешающих управлению параметров производится в рамках развиваемой в работах [1, 4-6] методики максиминного тестирования точности стабилизации управляемых систем.

В результате тестирования осуществляется контроль точности процесса управления, позволяющий указать оператору недостатки при управлении динамического объекта.

Заметим, что тестируемый алгоритм управления не обязательно известен системе тестирования – важны только его входы и выходы. Это позволяет применять методику максиминного тестирования для проверки качества ручного управления динамическими объектами. Стратегия тестирования формируется на первом этапе в результате решения игровой задачи. Управление в конфликтной ситуации представляется как игра двух лиц с противоположными интересами. Такие задачи рассматривались в работах Р. Айзекса [7] и Л.С. Понтрягина [8]. Особенно большой вклад в развитие теории внесен Н.Н. Красовским и его учениками [9, 10].

Игровая задача тестирования имеет свои особенности, одной из которых является наличие дискриминации одного из игроков. Теорема Н.Н. Красовского [9] утверждает наличие седловой точки в такой динамической игре, что в некоторых случаях дает возможность построить оптимальные стратегии тестирования.

Следующей особенностью игровых постановок задачи тестирования является возможность использовать линейный подход для системы уравнений в отклонениях от программного движения. Для случая фиксированного времени и выпуклого по фазовым координатам терминального функционала качества здесь также доказано существование седловой точки дифференциальной игры [9] для позиционных стратегий управления $u = u(x; t)$ и тестирования $v = v(x; t)$.

К сожалению, численное построение позиционных стратегии зачастую оказывается слишком сложным, чтобы реализовать его в реальном времени в системе тестирования, что привело к постановкам тестирования в классе программных стратегий. В этом случае динамическую игру можно редуцировать к геометрической игре на множествах достижимости управляемой системы. Этот подход предложен в работах [4, 5].

Игровая задача первого этапа тестирования

Рассмотрим антагонистическую дифференциальную игру для линейной системы с фиксированной продолжительностью. Игроки представляют собой управления и возмущения в линейной управляемой системе

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(t)x + B(t)u + C(t)v, \quad x(t_0) \in X_0, \\ u(\cdot) \in U &= \{u(\cdot) \in L_\infty[t_0, t_k] \mid u(t) \in P \subset R_s\}, \\ v(\cdot) \in V &= \{v(\cdot) \in L_\infty[t_0, t_k] \mid v(t) \in Q \subset R_m\}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $A(n \times n)$, $B(s \times n)$, $C(m \times n)$ – кусочно-непрерывные, ограниченные по величине матрицы соответствующего размера; X_0, P, Q – выпуклые замкнутые и ограниченные множества.

Примем, что функционал качества – функционал точности стабилизации на конечном интервале представляет собой промах в конечный момент времени t_k .

$$J(u, v) = \|x(t_k)\|. \quad (2)$$

Две задачи

$$\begin{aligned} a) \quad J_0(u^0, v^0) &= \max_{v(\cdot) \in V} \min_{u(\cdot) \in U} J(u, v), \\ b) \quad J^0(u^*, v^*) &= \min_{u(\cdot) \in U} \max_{v(\cdot) \in V} J(u, v) \end{aligned} \quad (3)$$

представляют собой дифференциальную игру между игроком 1 – управлением и игроком 2 – возмущениями.

В ходе решения задачи на максимин на первом этапе тестирования может быть найдена оценка снизу для функционала качества и сформированы наилучшие возмущения, мешающие решению задачи управления. В рамках максиминной методики тестирования эти возмущения предлагается использовать на полунатурном стенде, где имитируется процесс управления некоторым динамическим объектом. Управление осуществляется либо пилотом либо автоматической системой управления, которые вырабатывают некоторый сигнал управления \tilde{u} в условиях противодействия возмущениям v^0 , подаваемым на математическую модель объекта управления. В результате проведения тренировок можно вычислить реальный показатель точности тестирования $\tilde{J} = J(\tilde{u}, v^0)$. Этот результат сравнивается с наилучшим показателем – оценкой

снизу качества $J_0(u^0, v^0)$ при известных ресурсах управления и возмущения. При наличии седловой точки результат J_0 может быть достигнут управлением \tilde{u} .

Таким образом в задаче максиминного тестирования можно выделить три этапа:

1-й этап – предварительный. На этом этапе осуществляется поиск нижней (наилучшей) оценки показателя качества J_0 управления и оптимальной стратегии поведения внешних возмущений v^0 с помощью компьютерного решения максиминной задачи (3).

2-й этап – основной. На этом этапе реализуется процесс тестирования в виде компьютерного моделирования при реализации стратегии тестирования, использующей найденную на первом этапе оптимальную стратегию возмущений; определение в результате моделирования реальной оценки качества управления \tilde{J} .

3-й этап – заключительный. На этом этапе происходит сравнение наилучшей J_0 и реальной \tilde{J} оценок и выработка рекомендаций по дальнейшим тренировкам и диагностике, калибровке и коррекции.

Программные стратегии тестирования

Рассмотрим сначала случай программных стратегий тестирования первого игрока $u(t)$ и второго игрока $v(t)$. Если в игре (3) существует седловая точка, использование оптимальной программной стратегии $v^0(t)$ позволяет наиболее просто осуществить второй этап тестирования, проводимый на компьютерном или динамическом стенде.

Кроме этого, игровая задача 1-го этапа тестирования может быть редуцирована к геометрической игре на множествах достижимости подсистем по управлению и по возмущению управляемой системы (1).

Представляя вектор состояния x в виде разности $x = y - z$ получим:

$$\dot{y} = A(t)y + C(t)v, \quad y(t_0) = x(t_0) \in X_0, \quad (4)$$

$$\dot{z} = A(t)z - B(t)u, \quad z(t_0) = 0. \quad (5)$$

Функционал качества принимает форму $J(u, v) = \rho(y, z)$, где $\rho(y, z)$ – евклидово расстояние между точками множеств достижимости $y \in D_v(t_0, t_k)$ подсистемы (4) и $z \in D_u(t_0, t_k)$ подсистемы (5). Необходимые и достаточные условия существования седловой точки в такой геометрической игре приведены в работах [3, 4].

Позиционные стратегии тестирования

Рассмотрим теперь часто встречающуюся ситуацию, когда в классе программных стратегий отсутствует седловая точка

$$J_0(u^0, v^0) = \max_{w \in W} \min_{u(\cdot) \in U} J(u, v) < \max_{v(\cdot) \in V} \min_{u(\cdot) \in U} \max_{v(\cdot) \in V} J(u, v) = J^0. \quad (6)$$

В этом случае получить объективную оценку качества алгоритма управления в классе программных стратегий нельзя. Здесь можно использовать позиционные стратегии тестирования $v(x, t)$. Н.Н. Красовским [9] было показано, что для выпуклого функционала игры (2) в классе позиционных стратегий существует седловая точка. Для поиска позиционной стратегии Красовским

предложен метод экстремального прицеливания [10]. Рассмотрим регулярный случай дифференциальной игры для системы (1), когда решение задачи на максимум $(u^0(t), v^0(t))$ единственно, а множества P и Q допустимых значений управления $u(t) \in P$ и возмущения $v(t) \in Q$ являются выпуклыми замкнутыми множествами. В этом случае множества достижимости $D_u(t_0, t_k)$ подсистемы по управлению (5) и $D_v(t_0, t_k)$ подсистемы по возмущению (4) также являются выпуклыми и замкнутыми множествами при заданных t_0 и t_k .

Обозначим $J^*(u^*(x, t), v^*(x, t))$ цену игры и (u^*, v^*) – соответствующая ей седловая точка в классе позиционных стратегий. Тогда верны неравенства

$$J_0 \leq J(u^*(x, t), v^*(x, t)) \leq J^0.$$

Можно доказать следующее утверждение: цена игры J^* в классе позиционных стратегий равняется нижнему значению игры $J(u^*(x, t), v^*(x, t)) = J^0$ в классе программных стратегий.

Используем разбиение исходной системы на две подсистемы (4) и (5).

Значение функционала $J = x^T(t_k)x(t_k) = (y(t_k) - z(t_k))^T(y(t_k) - z(t_k)) = \rho^2(y(t_k), z(t_k))$ равно квадрату расстояния между точками множеств достижимости $y \in D_v(t_0, t_k)$ и $z \in D_u(t_0, t_k)$.

Рассмотрим точку максимина $(y^0(t_k), z^0(t_k))$, которой соответствует нижнее значение игры $J^0(u^0, v^0) = \rho^2(y^0, z^0) = \rho^2$, где $u^0(t), v^0(t), t \in [t_0, t_k]$ соответствующие программные стратегии (см. рис. 2).

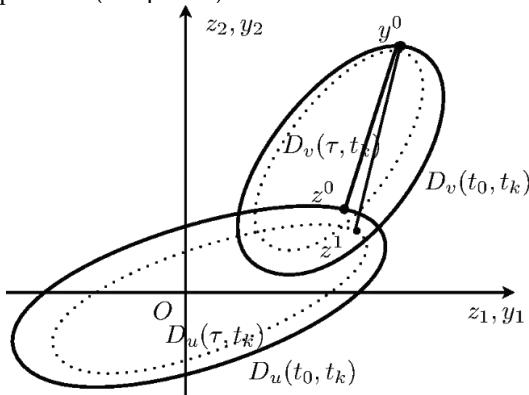


Рис. 2

Рассмотрим промежуточный момент времени $t_1 \in (t_0, t_k)$. Эволюционное свойство множеств достижимости [11] означает

$$D_u(t_0, t_k) = D_u(t_1, t_k, D_u(t_0, t_1)), \quad D_v(t_0, t_k) = D_v(t_1, t_k, D_v(t_0, t_1)),$$

откуда следуют включения $D_u(t_1, t_k, z(t_1)) \subset D_u(t_0, t_k)$ и $D_v(t_1, t_k, y(t_1)) \subset D_v(t_0, t_k)$.

Покажем, что оптимальная стратегия u^* 1-го игрока (управления) должна быть такой, что на отрезке времени $\tau [t_0, t_1]$ выполняется $u^*(\tau) = u^0(\tau)$. Действительно, при соблюдении указанного условия точка $z^0(t_k)$ принадлежит множеству достижимости $z^0 \in D_u(t_1, t_k, z(t_1))$.

В противном случае, 1-ый игрок (возмущение) выбрав стратегию $v^*(\tau) = v^0(\tau)$ при $\tau \in [t_0, t_1]$ сохранит точку $y^0(t_k) \in D_v(t_1, t_k, y(t_1))$. Но тогда в силу выпуклости множества достижимости $D_u(t_1, t_k, z(t_1))$ значение игры увеличится, что не приемлемо для первого игрока.

Аналогично можно показать, что оптимальной стратегией v^* для первого игрока должна быть такая стратегия, что $v^*(\tau) = v^0(\tau)$ при $\tau \in [t_0, t_1]$.

Отсюда следует правило экстремального прицеливания, когда в любой промежуточный момент оптимальные стратегии прицеливают фазовую точку каждой подсистемы в точки максимина (y^0, z^0) . Следовательно $J(u^*, v^*) = J_0$, что и требовалось доказать.

Согласно теореме Красовского, при этом достигается седловая точка в классе позиционных стратегий.

Для построения позиционных стратегий выберем разбиение отрезка

$$[t_0, t_k] = \sum_{i=0}^N [t_{i-1}, t_i],$$

где диаметр разбиения $d = \max |t_{i+1}, t_i|$ настолько мал, чтобы с достаточной точностью выполнялись условия $u^*(\tau) = \text{const}$ и $v^*(\tau) = \text{const}$ при $\tau \in [t_i, t_{i+1}]$.

Предлагается модификация метода Красовского, когда каждого текущего состояния $x(t_i) = y(t_i) - z(t_i)$ непосредственно решается задача поиска максимина

$$J_i(u_i^0, v_i^0) = \max_{v \in V} \min_{u \in U} J(u, v), \quad t \in [t_i, t_k].$$

Численный метод поиска максимина, основанный на итерационном способе решения задачи Б.В. Булгакова и задачи проектирования точки на выпуклое множество предложен в работе [5].

Установили, что для построения позиционной стратегии тестирования необходимо в каждый момент времени t_i в реальном времени решать задачу поиска максимина. Это может потребовать значительных вычислительных затрат.

Один из вариантов решения проблемы – попытаться решать задачу на максимин приближенно, подходящим образом аппроксимируя множества достижимости подсистем по управлению и по возмущению. В частности, можно провести аппроксимацию множеств достижимости эллипсоидами.

Список литературы

1. Садовничий В.А., Александров В.В., Лебедев А.В., Лемак С.С. Максиминное тестирование качества управления устройством спасения космонавта // Математические вопросы кибернетики. – 2007. – Вып. 16. – С. 23-30.
2. Александров В.В., Воронин Л.И., Глазков Ю.Н., Ишлинский А.Ю., Садовничий В.А. Математические задачи динамической имитации аэрокосмических полетов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. – 160 с.
3. Александров В.В., Лемак С.С. Алгоритмы динамической имитации для стенда-тренажера пилотируемых полетов на базе центрифуги с управляемым кардановым подвесом // Фундаментальная и прикладная математика. – 2018. – Т. 22, № 2. – С. 19-32.
4. Александров В.В., Блаженнова-Микулич Л.Ю., Гутьерес-Ариас И.М., Лемак С.С. Максиминное тестирование точности стабилизации и седловые точки в геометрических играх // Вестник МГУ. Серия: Математика, механика. – 2004. – №4. – С. 55-69.

5. Александров В.В., Болтянский В.Г., Лемак С.С., Парусников Н.А., Тихомиров В.М. Оптимальное управление движением. – М.: Физматлит, 2005. – 374 с.
6. Лемак С.С. К вопросу о формировании позиционных стратегий дифференциальной игры в методе экстремального прицеливания Н.Н. Красовского // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. – 2015. – № 6. – С. 61-65.
7. Айзекс Р. Дифференциальные игры. – М: Мир, 1967. – 480 с.
8. Понтрягин Л.С. О некоторых дифференциальных играх // ДАН СССР. – 1964. – Т.156, № 6. – С. 738-741.
9. Красовский Н.Н. Субботин А.И. Позиционные дифференциальные игры. – М.: Наука, 1974. – 456 с.
10. Красовский Н.Н. Игровые задачи о встрече движений. – М.: Наука, 1970. – 420 с.
11. Черноусько Ф. Л. Оценивание фазового состояния динамических систем. – М.: Наука, 1975. – 320 с.

НЕОБХОДИМОСТЬ ДЕМОНСТРАЦИИ В КУРСЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ ЕЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ

Кобрин А.И.

Национальный исследовательский университет МЭИ

Ключевые слова: курс теоретической механики, современные методы и технологии, двуногий шагающий механизм.

Аннотация. Практически в любой программе курса «Теоретическая механика» сказано, что студент должен знать основные понятия и законы механики и владеть вытекающими из этих законов методами изучения движения механической системы. Однако, на практике приходится ограничиться изложением классических приемов решения фундаментальных задач. Сохранение базового положения теоретической механики в системе российского высшего образования невозможно без существенного увеличения демонстраций ее современных достижений в предлагаемых студентам курсах лекций и семинарах. Приведены некоторые примеры возможных дополнений курса лекций и семинаров по теоретической (классической) механике, связанные с новыми решаемыми задачами в теории движения твердых тел, контактирующих со сплошными средами разного типа, примеры применения асимптотических методов в теории сингулярных возмущений, методов современной вычислительной механики.

Введение

Академик Александр Юльевич Ишлинский всегда подчёркивал и отстаивал исключительную роль теоретической механики как базовой фундаментальной дисциплины, борясь с многочисленными попытками сократить её преподавание, или даже вовсе исключить её из вузовских программ. В год проведения XIII Всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике, в год 110-летия А.Ю. Ишлинского в посвящаемом ему сборнике научных и научно-методических статей по механике желательно обратить внимание читателей на необходимость совершенствования преподавания курса теоретической механики в технических университетах в сегодняшних новых условиях современной «техногенной» цивилизации.

Приведем несколько известных примеров современных технических задач, решенных новыми методами, разработанными в рамках теоретико-механических постановок. Речь, в частности, идет: о теоретико-механических постановках задач динамики абсолютно твердого тела в воздушной среде; о теоретико-механических постановках задач динамики твердых тел на не абсолютно твердой плоскости; о возникновении начального и внутренних «пограничных слоев» – контрастных структурах, возникающих в задачах, близких к неголомомной механике; о сочетании моделей адгезии, сухого трения, модели Эрисмана-Контенсу-Журавлева; о теоретико-механических постановках задач динамики быстро-медленных систем и фракционных методах исследования быстрых и медленных многообразий движений; о современных задачах вычислительной механики. Все эти актуальные задачи в современных курсах теоретической механики, читаемых в технических университетах, затрагиваются очень мало, практически не затрагиваются.

Интеллектуальные функции обучения очень долго пытались воспроизводить, опираясь на строгие логические конструкции, с помощью методов строгого решения четких задач и вычисления математически

определенных конкретных функций. В 21 веке появились примеры решения задач интеллектуального обучения не по теоретически ясным алгоритмам, а путем настройки нейросвязей (так называемое, глубокое обучение). Компьютерные переводчики способны переводить с языка на язык, ничего не зная о грамматике. В них не вложено никаких правил, они способны обучиться на примерах других переводов, по данным. Это обстоятельство подчеркивает роль присутствия в курсе лекций примеров современных методов и технологий.

Основной текст

Одним из основных в механике является круг задач о движении материальной точки, твердого тела или системы твердых тел в сопротивляющейся среде. Особое место в рамках этой задачи занимает вопрос о построении адекватных моделей взаимодействия между движущимся телом и средой. Основным здесь стал эмпирический подход. Конечная цель исследования – выявление характерных свойств и типов движения тела.

Охарактеризуем, например, задачу о движении твердого недеформируемого тела в сопротивляющейся среде (в воздухе), как задачу теоретической механики [1]. Движение такого тела можно представить в виде суперпозиции движения центра масс тела и движения около центра масс. В рамках теоретической механики можно считать, что силы, действующие на тело, это сила тяжести, реактивная сила, и аэродинамические силы и моменты.

Аэродинамическое воздействие на тело существенным образом зависит от формы и размеров тела. Можно полагать, что тело состоит из твердой невесомой оболочки тела, совпадающей с формой и размерами исходного тела и неизменяемой в процессе движения, и материальной точки известной массы, прикрепленной к этой оболочке в центре масс исходного тела. В этой постановке могут быть, например, содержательно рассмотрены: прямолинейное движение точки в поле силы тяжести; галопирование легкого тела в потоке среды; движение осесимметричного тела.

Другим важнейшим направлением современной теоретической механики является изучение динамики механических систем, контактирующих с опорной поверхностью и качественное сравнение решений, получаемых при использовании различных моделей контакта [2]. Так, например, предположение об отсутствии проскальзывания или учет диссипации при наличии голономных связей. Обычно, интерес представляют: определение и расчет сил и моментов при контакте и анализ контактной зоны; исследование динамики в классических задачах о движении тел по шероховатой поверхности разного типа (кельтский камень, китайский волчок, сани Чаплыгина и др.); оценка влияния применяемых моделей трения на динамику мобильных колесных систем для разных типов колес, в том числе роликонесущих.

Сложность процессов, происходящих в реальных системах в области контактного взаимодействия приводит к трудностям при создании одновременно точных и достаточно простых моделей механики. Сравнение свойств этих моделей, проявляющихся в задачах динамики систем твердых тел, определение областей их применимости, построение теоретико-механических моделей динамики активно движущихся систем при адекватном решении возникающих

контактных задач [3] должно быть отражено в читаемых курсах теоретической механики.

Принципиальный интерес представляют проблемы существования и единственности решений уравнений движения и равновесия систем с сухим трением, закономерности трения в условиях скольжения с непростой кинематикой [4]. В случаях сложной кинематики, когда кроме поступательного движения тело еще и вращается, закон Кулона в сформулированной им форме не имеет места. Силовые характеристики в поступательном и вращательном движениях сложным нелинейным образом связаны друг с другом. Результаты последних лет позволили установить зависимость силы трения от скорости скольжения в случае дополнительного верчения. Модель многокомпонентного сухого трения позволила объяснить наблюдаемые эффекты в таких задачах, как качение бильярдного шара, переворот волчка Томсона, несимметричная динамика кельтского камня, шимми колес детских колясок и др.

Широкий класс задач неголономной механики описывается системами дифференциальных уравнений с сингулярными возмущениями, характерной особенностью которых является линейность по быстрым переменным. Для анализа таких систем используется геометрический метод декомпозиции, основанный на технике интегральных многообразий быстрых и медленных движений. В качестве лекционного примера в курсе механики м.б. рассмотрены уравнения, описывающие динамику саней Чаплыгина [5].

Корректное компьютерное моделирование возможно только при описании движения дифференциальными уравнениями, правильно отражающими законы теоретической механики. При этом необходимо обеспечить современную высокую вычислительную эффективность моделирования, то есть предложить алгоритм расчета, использующий минимальное число компьютерных операций [6]. Классический расчет динамики механических систем развивался в эпоху, когда компьютеры обладали низкой производительностью. В результате численное моделирование выполнялось приближенно и недостаточно корректно. Однако широких публикаций, посвященных современному компьютерному моделированию кинематики и динамики мало. Так как моделирование часто должно выполняться в реальном времени, необходимо не только демонстрировать вычислительно эффективные алгоритмы, но и предлагать новые подходы к задачам моделирования в курсе теоретической механики.

Наиболее часто применяемым в курсе механики является классический подход, основанный на использовании уравнений связей и уравнений Лагранжа со множителями. Платой за универсальность является низкая вычислительная эффективность. Высокие вычислительные затраты при использовании представленной в лекциях классики, в частности, обусловлено использованием для описания движения единой системы координат с определением движения каждого тела через все предшествующие, что порождает повторяющиеся, избыточные вычисления. Расчет динамики с наименьшим числом матричных операций обеспечивают алгоритмы вычислительной механики, в которых кинематические и динамические соотношения записываются для отдельных тел в их локальных системах координат с учетом кинематики и динамики только

смежных тел. Уже существуют алгоритмы расчета объемных кинематических цепей с помощью минимального числа векторно-матричных операций. Тема, связанная с разработкой теоретических основ представления в курсе теоретической механики корректных, детальных и вычислительно эффективных компьютерных моделей динамики представляется актуальной.

По мере усложнения проблем, поставленных перед теоретической механикой, ее априорное положение все более сочетается с феноменологической техникой решения задач, широко используемой в механике сплошных сред. В качестве одного из примеров рассмотрим задачу применения принципа максимума скорости диссипации (принципиального атрибута математической теории пластичности) при изучении теории удара [7] в курсе теоретической механики.

Во многих задачах теории удара возникает проблема «статической неопределимости»: число уравнений не совпадает с числом неизвестных. Так, например, в теории удара в системах с неударяющими связями число уравнений не совпадает с числом неизвестных, когда в результате удара система может эту связь покинуть. Скалярных уравнений удара в системах с неударяющими связями меньше, чем неизвестных, и, следовательно, решения этих уравнений неоднозначны. Однако, одним из фундаментальных принципов механики наряду с требованием непротиворечивости является требование единственности решения динамической задачи. Этот принцип не связан с термодинамическими постулатами и должен независимо проверяться при построении моделей механических систем и постановке конкретных задач. При исследовании получаемых уравнений приходится прибегать к уточнению модели рассматриваемой системы, предлагая различные аксиоматические пути ее «доопределения».

Рассмотрим ударное взаимодействие с опорной поверхностью вертикально расположенного циркуля-измерителя с жестко скрепленными звеньями. Это самая элементарная модель при анализе ходьбы двуногих шагающих механизмов. Важным здесь оказывается изучение двухопорной фазы, сопровождаемой ударом, т.к. первая опорная нога может либо остаться на поверхности, либо покинуть ее. Такого типа явление, конечно в более сложной форме, возникает и при движении современных экипажей на роликонесущих колесах при смене контактного ролика [8].

Эту задачу в монографии [9] подробно рассмотрел А.М.Формальский. Исходя из экспериментального материала, столкнувшись с проблемой статической неопределенности, при анализе получаемых уравнений, он сделал естественное предположение о безударном сходе опорной (задней) ноги с неударяющей связи. Такого типа предположения, по-видимому, могут быть отнесены к гипотезам типа *ad hoc*, и нам представляется полезной замена их на предположения, носящие более универсальный характер. Отправным физическим понятием здесь может послужить скорость диссипации энергии или диссипативный потенциал. Принципиальное значение диссипативного функционала в построении механики твердых тел в пластически деформированном состоянии было отмечено Р. Мизесом [10]. Основная идея

заключается в предложении использовать для снятия статической неопределенности в задачах теории удара, излагаемой в курсе теоретической механики, базовый в теории пластичности «феноменологический принцип Р.Мизеса» – принцип максимума скорости диссипации энергии на действительном движении механической системы – функции Релея, которая является характеристикой необратимой части термодинамического процесса [11].

Пусть точки А и В, соответственно, точки контакта «задней» и «передней» ножек циркуля с поверхностью, а С – точка соединения звеньев циркуля. Будем считать, что центр масс циркуля находится в угловой точке С. Пусть «в начале» ударного взаимодействия конечной точки В передней ножки циркуля с опорной поверхностью в момент времени $t=0$ скорость конца А задней опорной ножки $V_A=0$, а «в конце» ударного взаимодействия при $t+0$ скорость конца В передней ножки $V_B=0$. Пусть угловая скорость при $t=0$ равна $\Omega = \Omega_0 < 0$, а при $t+0$ $\Omega = \Omega_1 = \Omega_0 + \Delta\Omega$, ($\Delta\Omega > 0$). При этом удар считается абсолютно неупругим [7, 9, 11].

В теории удара вводится импульс силы как интеграл от вектора силы по времени.

$$\mathbf{S} = \int_0^{\Delta t} \mathbf{F} dt. \quad (1)$$

Воспользуемся интегральной формой общих теорем, причем в качестве интервала интегрирования выберем время удара.

Уравнение движения точки С – центра масс циркуля при ударе

$$m\Delta\mathbf{V}_C = \mathbf{S}_A + \mathbf{S}_B. \quad (2)$$

Теорема об изменении момента количества движения относительно центра масс при ударе

$$\Delta\mathbf{K}_C = [CA, \mathbf{S}_A] + [CB, \mathbf{S}_B]. \quad (3)$$

В скалярном виде уравнения движения двузвенника при ударе представляются в виде

$$\begin{aligned} -m\Delta\Omega l \cos \alpha &= S_{Ax} + S_{Bx}, \\ -m(\Delta\Omega + 2\Omega_0)l \sin \alpha &= S_{Ay} + S_{By}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$I_C\Delta\Omega = (S_{Ax} + S_{Bx})l \cos \alpha + (S_{By} - S_{Ay})l \sin \alpha.$$

Здесь l – длина «ножек циркуля», 2α – угол раствора при вершине циркуля.

При этом очень важно, что из условия физической реализуемости неударяющей связи следует, что проекция реакции в опорной ноге S_{Ay} на вертикальную ось не может быть отрицательной!

Раздельное определение горизонтальных проекций реакций в точках А и В при данной постановке задачи невозможно. Обозначим $S_{Ax} + S_{Bx} = S_x$, тогда получим систему трех уравнений для четырех неизвестных $\Delta\Omega, S_x, S_{Ay}, S_{By}$.

$$\begin{aligned}
-m\Delta\Omega l \cos \alpha &= S_x, \\
-m(\Delta\Omega + 2\Omega_0)l \sin \alpha &= S_{Ay} + S_{By}, \\
I_C \Delta\Omega &= S_x l \cos \alpha + (S_{By} - S_{Ay})l \sin \alpha.
\end{aligned} \tag{5}$$

Выражая неизвестные $\Delta\Omega$, S_x , S_{By} через реакцию S_{Ay} в задней опорной ножке, имеем

$$\begin{aligned}
\Delta\Omega &= -\frac{2l \sin \alpha}{I_c + ml^2} (S_{Ay} + ml\Omega_0 \sin \alpha), \\
S_{By} &= \frac{(I_c + ml^2 \cos 2\alpha)\Delta\Omega - 2ml^2 \sin^2 \alpha \Omega_0}{2l \sin \alpha}, \\
S_x &= -m\Delta\Omega l \cos \alpha.
\end{aligned} \tag{6}$$

Введем в рассмотрение приращение ΔT кинетической энергии системы во время удара, непосредственно связанное в данной задаче с диссипативной функцией Рейля – характеристикой скорости диссипации.

Кинетическая энергия циркуля до удара

$$T_0 = \frac{1}{2}(I_c + ml^2)\Omega_0^2 \tag{7}$$

Кинетическая энергия циркуля после удара

$$T_1 = \frac{1}{2}(I_c + ml^2)\Omega_0^2 \left(1 + \frac{\Delta\Omega}{\Omega_0}\right)^2 \tag{8}$$

Приращение кинетической энергии

$$\begin{aligned}
\Delta T &= (I_c + ml^2)\Delta\Omega \left(\Omega_0 + \frac{\Delta\Omega}{2}\right) = \\
&= 2\frac{l^2 \sin^2 \alpha}{I_c + ml^2} (S_{Ay} + ml\Omega_0 \sin \alpha) \left(S_{Ay} - \frac{(I_c + ml^2 \cos^2 \alpha)\Omega_0}{l \sin \alpha}\right).
\end{aligned} \tag{9}$$

Будем называть функцию ΔT «диссипативным потенциалом» или взятой с обратным знаком «скоростью диссипации энергии» в рассматриваемой задаче.

Корень $S_{Ay} = -ml\Omega_0 \sin \alpha$ квадратного трехчлена $\Delta T(S_{Ay})$ всегда положителен, а корень $S_{Ay} = \Omega_0(I_c + ml^2 \cos^2 \alpha) / l \sin \alpha$ всегда отрицателен.

Следовательно, экстремум функции ΔT либо достигается в точке

$$S_{Ay} = \Omega_0 \frac{(I_c + ml^2 \cos 2\alpha)}{2l \sin \alpha} > 0. \tag{10}$$

При этом $I_c + ml^2 \cos 2\alpha < 0$, и следовательно,

$$\cos 2\alpha < -\frac{I_c}{ml^2}. \tag{11}$$

Либо, при

$$\cos 2\alpha \geq -\frac{I_c}{ml^2}, \tag{12}$$

экстремум функции ΔT достигается на границе допустимого полуинтервала $S_{Ay} \geq 0$, то есть при $S_{Ay} = 0$.

Таким образом, в соответствии с принципом Р. Мизеса при

$$\sin^2 \alpha < \frac{1}{2} \left(1 + \frac{I_c}{ml^2} \right), \quad (13)$$

$$S_{Ay} = \frac{(I_c + ml^2 \cos 2\alpha)\Omega_0}{2l \sin \alpha},$$

$$S_{By} = -\frac{(I_c + ml^2)\Omega_0}{2l \sin \alpha}, \quad (14)$$

$$S_x = m\Omega_0 l \cos \alpha,$$

$$\Delta\Omega = -\Omega_0.$$

Отметим, что если $\Delta\Omega = -\Omega_0$, то после удара обе ножки циркуля остаются на поверхности.

Если же

$$\sin^2 \alpha \geq \frac{1}{2} \left(1 + \frac{I_c}{ml^2} \right), \quad (15)$$

то

$$S_{Ay} = 0,$$

$$S_{By} = 2ml\Omega_0 \sin \alpha \frac{I_c + ml^2 \cos^2 \alpha}{I_c + ml^2},$$

$$S_x = 2 \frac{m^2 l^3 \Omega_0}{(I_c + ml^2)} \sin^2 \alpha \cos \alpha, \quad (16)$$

$$\Delta\Omega = -2 \sin^2 \alpha \frac{ml^2 \Omega_0}{(I_c + ml^2)}.$$

В этом случае после удара передняя опорная ножка циркуля остается на поверхности, задняя – отрывается.

Список литературы

1. Локшин Б.Я., Самсонов В.А. Задача о движении тела в сопротивляющейся среде. Качественный анализ. – М.: Изд-во МГУ, 2012. – 237 с.
2. Зобова АА. Обзор моделей распределенного сухого трения // Прикладная математика и механика. – 2016. – Т. 80, Вып 2. – С. 194-206.
3. Новожилов И.В. Фракционный анализ. – М.: Изд-во МГУ, 1995. – 224 с.
4. Андронов В.В., Журавлев В.Ф. Сухое трение в задачах механики. – М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2010. – 184 с.
5. Голубев Ю.Ф., Яскевич А.В. Оптимизация вычислений в процедурах расчета динамики систем твердых тел // Препринт ИПМ им. М.В.Келдыша РАН. – 2020. – №22. – 44 с.
6. Кобрин А.И., Соболев В.А. Расщепление уравнений неголономной механики // Сборник трудов IV международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2018). – Самара: Новая техника, 2018. – С. 1367-1372.

7. Ишлинский А.Ю., Баренблатт Г.И. Об ударе вязкопластического стержня о жесткую преграду // ДАН СССР. – 1962. – Т.144, № 4. – С. 734-737.
8. Герасимов К.В., Зобова А.А. Динамика экипажа на омни-колесах с массивными роликами с учетом смены ролика в контакте с опорной плоскостью // Труды МАИ. – 2018. – № 101.
9. Формальский А.М. Перемещение антропоморфных механизмов. – М.: Наука, 1982. – 368 с.
10. Мизес Р. Механика твердых тел в пластически деформированном состоянии // Теория пластичности. – М., 1948.
11. Циглер Г. Экстремальные принципы термодинамики необратимых процессов и механика сплошной среды. – М.: Мир, 1966. – 136 с.

ПУТЬ ОТ СКАЛЯРНОЙ К ВЕКТОРНОЙ АЭРОГРАВИМЕТРИИ

Болотин Ю.В., Вязьмин В.С., Голован А.А.

МГУ им. М.В. Ломоносова

Ключевые слова: аэрогравиметрия, инерциальная гравитация, акселерометры, датчик угловой скорости, гравиметр.

Аннотация. Дается историческая справка о задачах аэрогравиметрии (инерциальная гравиметрия). Показаны этапы разработки и совершенствования гравиметра, представлены и изучены различные конструкции гравиметра.

Введение

Лаборатория управления и навигации МГУ была организована в 1987 году. Первым заведующим лабораторией был Александр Юльевич Ишлинский. Перед лабораторией была поставлена задача анализа угроз со стороны так называемой стратегической оборонной инициативы США (СОИ), и в течение первых пяти лет лаборатория успешно занималась этой задачей. С приходом перестройки возникла необходимость поиска новых направлений исследований. По инициативе Николая Алексеевича Парусникова и Александра Юльевича Ишлинского лаборатория одной из первых в России начала заниматься задачей авиационной (инерциальной) гравиметрии.

Инерциальная гравиметрия – прикладная наука об определении силы тяжести Земли по движению чувствительной массы. Основоположителем инерциальной гравиметрии можно считать И. Ньютона, который открыл закон всемирного тяготения, используя законы Кеплера о движении небесных тел. Наблюдения за полем тяжести по траекториям спутников, активно ведущиеся и сейчас, относятся к области спутниковой гравиметрии. Недостатком спутниковой гравиметрии является ее низкая разрешающая способность, связанная со значительным удалением от притягивающих масс. Над океанами работает спутниковая альтиметрия, позволяющая определить высоту геоида.

Первые морские гравиметры появились в начале XX века и связаны с именем Ф.А. Венинг-Мейнеса. Особенность морской гравиметрии состоит в том, что здесь не требуется определение высоты (движение происходит по поверхности уровня потенциала силы тяжести). Наиболее распространен гравиметр Ла Коста–Ромберга, основанный на так называемой пружине нулевой длины, помещенной в карданов подвес.

Первые попытки создания авиационных гравиметров предпринимались в 1959-1960 гг. Использовались перезатушенные кварцевые и струнные гравиметры (СССР) и морской гравиметр Ла Коста–Ромберга (США). Полученная невысокая точность (порядка 10 мГал) была вызвана, в первую очередь, низкой точностью баровысотометров. С конца 1980-х гг., с появлением спутниковой навигационной системы (СНС) GPS, на Западе активизируется проектирование и тестирование различных образцов авиационных гравиметров. Здесь следует выделить работы, проводимые Лабораторией морских исследований (США) и Университетом Калгари (Канада). С начала 1990-х гг., в связи с полным развёртыванием системы GPS, начинается этап внедрения в

гравиметрическую практику промышленных авиационных гравиметров. Достаточно полное отражение состояния аэрогравиметрии за рубежом на конец XX в. содержится в сборнике трудов конференции Международной ассоциации по геодезии [1].

Лаборатория управления и навигации МГУ имени М.В. Ломоносова участвовала в разработке, испытаниях и внедрении программного обеспечения нескольких российских гравиметров – АГК, Гравитон-М, GT1A/GT2A, GTX [2-5]. Эти работы основывались на традициях школы инерциальной навигации, созданной на кафедре прикладной механики и управления МГУ под руководством Б.В. Булгакова и А.Ю. Ишлинского и связанной с именами Н.А. Парусникова, В.А. Андреева и Е.А. Девянина. Созданный школой задел оказался чрезвычайно полезен при работах в области аэрогравиметрии, поскольку задача аэрогравиметрии является обратной по отношению к инерциальной навигации.

Основные уравнения аэрогравиметрии

В основе аэрогравиметрии лежит векторное уравнение движения чувствительной массы относительно Земли, записанное в проекциях на оси географической системы координат:

$$\dot{\mathbf{V}} = -(\boldsymbol{\omega} + \mathbf{u}) \times \mathbf{V} + \mathbf{f} + \mathbf{g}_0 + \Delta \mathbf{g}. \quad (1)$$

Здесь $\boldsymbol{\omega}$ – абсолютная угловая скорость географической системы координат, \mathbf{u} – угловая скорость вращения Земли, \mathbf{f} – удельная сила, действующая на чувствительную массу гравиметра, \mathbf{g}_0 – нормальная сила тяжести, $\Delta \mathbf{g}$ – аномалия силы тяжести. При оценивании аномалии используется модельное уравнение, где истинные значения переменных заменены вычисленными значениями

$$\dot{\mathbf{V}}' = -(\boldsymbol{\omega}' + \mathbf{u}) \times \mathbf{V}' + \mathbf{f}' + \mathbf{g}_0. \quad (2)$$

Поскольку измерению доступно значение \mathbf{f}_z удельной силы и угловой скорости $\boldsymbol{\omega}_z$ корпуса прибора в проекциях на оси приборной системы координат, уравнения следует дополнить уравнениями на расчетную матрицу ориентации приборной системы координат

$$\dot{L}'_{zx} = -\boldsymbol{\omega}'_z \times L'_{zx} + L'_{zx} \times \boldsymbol{\omega}'. \quad (3)$$

Для замыкания уравнений (2)-(3) используются измерения спутниковой навигационной системы

$$\mathbf{V}'' = \mathbf{V} + \delta \mathbf{V}. \quad (4)$$

и модель измерений акселерометров и датчиков угловой скорости

$$\mathbf{f}'_z = \mathbf{f}_z + M \mathbf{f}_z + \Delta \mathbf{f}_z + \delta \mathbf{f}_z, \quad \mathbf{f}'_z = L'_{zx} \mathbf{f}', \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\omega}'_z = \boldsymbol{\omega}_z + \Delta \boldsymbol{\omega}_z + \delta \boldsymbol{\omega}_z. \quad (6)$$

Здесь M – матрица масштабных коэффициентов и несоосностей осей чувствительности акселерометров, $\Delta \mathbf{f}_z, \Delta \boldsymbol{\omega}_z$ – систематические погрешности, $\delta \mathbf{f}_z, \delta \boldsymbol{\omega}_z$ – случайные погрешности датчиков. Сравнив решения (2)-(3) с измерениями (4), можно определить $\Delta \mathbf{g}$. Однако полученная оценка будет очень шумной. Чтобы снизить шум оценки, используются различные априорные модели поля силы тяжести.

Наиболее простой вариант при этом – использовать стохастическую модель аномалии силы тяжести Δg во времени. Тогда задача сводится к задаче калмановской фильтрации и сглаживания. К сожалению, в некоторых случаях, в частности в задаче векторной аэрогравиметрии, стохастической модели аномалии во времени недостаточно – задача является ненаблюдаемой. Тогда необходимо оценивать пространственную модель аномалии с учетом гармоничности поля и в число элементов вектора состояния включать пространственные параметры поля.

Конкретный способ реализации данной схемы зависит как от конструкции гравиметра, так и от поставленной задачи. В развитии авиационной гравиметрии можно выделить несколько этапов движения от простого к более сложному, обсуждению которых, на примере работ лаборатории, и посвящена данная статья.

Гравиметр с горизонтируемой платформой

В России авиационная гравиметрия с использованием GPS развивается с 1995 г., когда началось проектирование и подготовка к летным испытаниям гравиметра АГК разработки Московского института электромеханики и автоматики и лаборатории управления и навигации МГУ, а также гравиметра Гравитон-М разработки ВНИИГеофизика (рис. 1). Эти гравиметры созданы на базе высокоточных навигационных систем Л-41 с горизонтированной платформой и поплавковыми гироскопами, включающих блоки астрокоррекции, установленные на платформе. Эти блоки были демонтированы, а на их место установлены три чувствительных элемента – акселерометра с вертикальной осью чувствительности. В системе АГК использовались маятниковые кварцевые акселерометры, а в системе Гравитон-М – сильно демпфированные струнные акселерометры.



Рис. 1. Система Гравитон-М

Благодаря высокой точности инерциальные навигационные системы (ИНС) функционировали в автономном режиме, а обработка данных велась на земле. Соответствующее программное обеспечение полностью разработано в лаборатории управления и навигации МГУ. Система АГК была успешно тестирована на летных испытаниях в Чехии (рис. 2), но в дальнейшем, из-за технических и организационных проблем, работы были прерваны. Система Гравитон-М эксплуатировалась компанией «Аэрогеофизика» в России и Бразилии в течение ряда лет. Недостатком указанных систем были большой вес и высокое энергопотребление, что делало невозможной их эксплуатацию на малых самолетах.

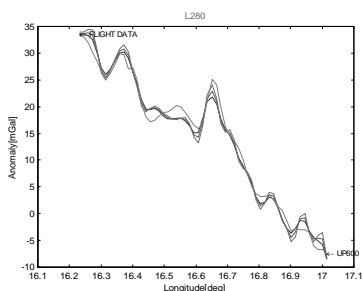


Рис. 2. Сравнение аномалии на галсе с наземными данными. Гравиметр АГК. Брно, Чехия, 1999 г.

С 2000 по 2021 гг. лаборатория управления и навигации МГУ совместно с компанией «Гравиметрические технологии» вела разработку и совершенствованию гравиметра GT1A/GT2A [3-4]. Этот гравиметр отличает оригинальная конструкция карданова подвеса с вертикальной внешней осью, что обеспечивает стабильный тепловой режим всей системы. В системе используются гироскопы средней точности (динамически настраиваемые и волоконно-оптические), что делает невозможной чисто автономную работу ИНС и требует коррекции по СНС в полете. В лаборатории разработано соответствующее программное обеспечение постобработки – GTNAV и GTGRAV [4]. Приборы GT2A с данным программным обеспечением в настоящее время активно используются по всему миру.

Общим для рассмотренных гравиметров является то, что чувствительный элемент установлен на гиостабилизированной платформе. Кроме того, они являются скалярными – оценивается вертикальная составляющая аномального гравитационного поля Земли. Физической моделью такого гравиметра является проекция уравнения (1) на вертикаль – основное уравнение скалярной аэрогравиметрии [3]:

$$\dot{V}_3 = g_{etv} - g_0 - \Delta g_3 + f_3,$$

где V_3 – относительная вертикальная скорость приведенной чувствительной массы блока акселерометров гравиметра, g_{etv} – поправка Этвеша, g_0 – абсолютное значение нормальной силы тяжести, Δg_3 – аномалия силы тяжести, f_3 – вертикальная составляющая вектора удельной силы, измеряемой акселерометрами. Соответствующее модельное уравнение скалярной аэрогравиметрии имеет вид

$$\dot{V}_3' = g_{etv} - g_0 + f_3'.$$

Здесь f_3' – скорректированные с учетом решения навигационной задачи горизонтальных каналов измерения вертикального акселерометра, которые с учетом (5) можно записать в виде

$$f_3' = (1 + m_{33})f_3 + (\alpha_2 + m_{13})f_1' - (\alpha_1 + m_{23})f_2' + \Delta f_3 + \delta f_3,$$

где m_{33} – погрешность определения масштабного коэффициента, m_{13}, m_{23} – углы неортогональности осей чувствительности, α_1, α_2 – остаточные угловые ошибки определения вертикали, недооцененные на этапе интеграции ИНС-СНС, f_1', f_2' – измерения горизонтальных акселерометров, Δf_3 – смещение нуля,

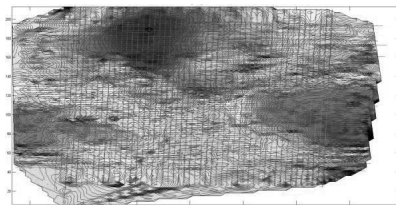


Рис. 3. Результаты площадной съемки Гравиметр Гравитон-М, Архангельск, 2003

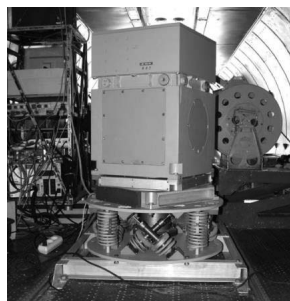


Рис. 4. Гравиметр GT1A

δf_3 – шум вертикального акселерометра. Измерения вертикальной скорости СНС запишем в виде $V_3'' = V_3 + \delta V_3$, где δV_3 – погрешность СНС.

Уравнения в отклонениях примут вид линейной динамической системы с измерениями $y = V_3'' - V_3'$:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{V}_3 &= -\Delta g_3 + m_{33}f_3 + (\alpha_2 + m_{13})f_1' - (\alpha_1 + m_{23})f_2' + \Delta f_3 + \delta f_3, \\ y &= \Delta V_3 + \delta V_3. \end{aligned} \quad (7)$$

Система (7), дополненная стохастической моделью аномалии (например, моделью Джордана) [5] и моделью ошибок горизонтирования (например, моделью случайного блуждания), а также моделями некоторых других погрешностей, приводится к задаче оптимальной фильтрации и сглаживания, которая решается посредством фильтра Калмана. Не обсуждая сам алгоритм, рассмотрим на упрощенном уровне структуру его погрешностей.

Ошибки определения вертикальной аномалии можно записать в виде

$$\Delta g_3' - \Delta g_3 = -m_{33}f_3 - (\alpha_2 + m_{13})f_1' + (\alpha_1 + m_{23})f_2' - \Delta f_3 - \delta f_3 - \delta \dot{V}_3. \quad (8)$$

В авиационной гравиметрии ограничиваются определением только длинно- и средневолновых составляющих аномалии (из-за высокочастотного характера шума СНС), что учитывается в ее стохастической модели, то есть можно считать, что данные пропускаются через низкочастотный фильтр с частотой среза от 0.02 до 0.01 Гц. Обсудим вклад составляющих ошибок (8) с учетом указанной фильтрации и в предположении, что движение происходит по прямолинейной траектории на постоянной высоте.

- Постоянное смещение или линейный дрейф нулевого сигнала вертикального акселерометра Δf_3 компенсируется во время референсных измерений на аэродроме и может не учитываться.

- Составляющая δf_3 , вызванная шумом вертикального акселерометра, для современных приборов не превосходит 0.1-0.2 мГал.

- Ошибка $m_{33}f_3$, вызванная погрешностью определения масштабного коэффициента гравиметра, благодаря широкополосности ускорений f_3' , может быть определена и скомпенсирована корреляционными методами до величин порядка 0.1 мГал.

- Погрешность $(\alpha_2 + m_{13})f_1' - (\alpha_1 + m_{23})f_2'$, вызванная невыставкой вертикали, благодаря широкополосности ускорений f_1', f_2' может быть определена и скомпенсирована корреляционными методами до величин порядка 0.1 мГал.

- Ошибка СНС $\delta \dot{V}_3$, при работе в фазо-дифференциальном режиме и при использовании специализированного программного обеспечения, разработанного в лаборатории [5, 11], имеет величину порядка 0.5 мГал при указанных временах

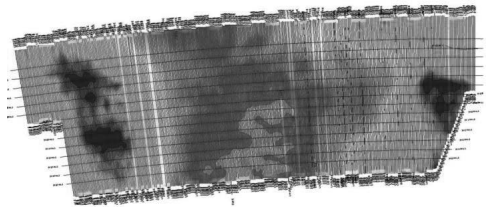


Рис. 5. Результаты съемки с ГТ1А. Новая Земля, 2008

осреднения. С повышением точности спутниковых решений (за счет привлечения измерений одновременно от нескольких спутниковых систем – GPS, ГЛОНАСС, GALILEO, BeiDou и др.) эта ошибка может быть еще снижена.

В совокупности, погрешности авиагравиметра в приведенных условиях имеют порядок 0.7-1.0 мГал. Дальнейшее повышение точности достигается на фазе построения карт аномалий, часто за счет реализации плотной сетки съемочных галсов.

Поскольку для скалярного гравиметра требуемая точность определения ориентации не слишком высока (10-20 угловых минут), то может использоваться декомпозированный алгоритм оценивания. А именно, сначала решается навигационная задача по двум горизонтальным каналам и определяются ошибки горизонтирования платформы. Затем с учетом полученных углов горизонтирования определяется аномалия силы тяжести и уточняются углы невыставки (вместе с углами неортогональности осей чувствительности).

В последние годы стала актуальной задача аэрогравиметрии с облетом рельефа, когда носитель движется на минимальной безопасной высоте над землей, что позволяет повысить пространственное разрешение съемки и, кроме того, объединить гравиметрическую съемку с электро- и магниторазведкой. Поскольку поле силы тяжести вызвано в том числе рельефом местности, ускорения носителя при движении с облетом рельефа оказываются сильно коррелированными с аномалией силы тяжести. В этой ситуации составляющие погрешности $m_{33}f_3$, $(\alpha_2 + m_{13})f'_1 - (\alpha_1 + m_{23})f'_2$ в (8) уже не могут быть надежно определены корреляционными методами без использования специальных калибровочных маневров. Такие маневры были предложены в лаборатории и проверены для гравиметра GT2A [5].

Бескарданные скалярные гравиметры

Для съемок с облетом рельефа требуется установка гравиметра на легкие (возможно, беспилотные) летательные аппараты. Гравиметры с горизонтируемой платформой, имеющие относительно большой вес и габариты, для этой цели не подходят. В последние годы стали применяться аэрогравиметры на основе бескарданных (бесплатформенных) инерциальных навигационных систем (БИНС), выделяющиеся меньшими массогабаритными характеристиками и почти не имеющие технических ограничений для применения в сложных динамических условиях [6-7]. В 2008 г. компания «Гравиметрические технологии» совместно с МГУ разработали прототип бескарданного гравиметра GTX, испытания которого на яхте и самолете показали обнадеживающие результаты [8].

Бескарданный аэрогравиметр iCorus (рис. 6) [7] разработки компании iMAR (2018) весит около 20 кг, что в разы меньше массы платформенных комплексов. За счет этого бескарданные аэрогравиметры могут устанавливаться на легкие носители, включая беспилотные летательные аппараты (БПЛА), позволяющие выполнять съемку при более низкой скорости полета [6-7].

Значительную трудность в бескарданной аэрогравиметрии составляет разработка адекватных алгоритмов постобработки первичных данных аэрогравиметра. Это объясняется высокой чувствительностью инерциальных датчиков (акселерометров, гироскопов) БИНС аэрогравиметра к возмущающим

воздействиям во время движения носителя и наличием систематических инструментальных погрешностей инерциальных датчиков, снижающих точность измерений [9]. Обсудим эти погрешности. Для бескарданного гравиметра при ненулевых углах крена и тангажа γ, θ к указанному в (8) составляющим погрешности гравиметра с горизонтируемой платформой добавляются следующие (формулы приведены с некоторыми упрощениями)

– Погрешность $\Delta f_1 \sin \gamma - \Delta f_2 \sin \theta$ за счет смещений нулевых сигналов горизонтальных акселерометров.

– Погрешность $m_{12}(f_1 \sin \theta - f_2 \sin \gamma) - 2m_{13}f_3 \sin \gamma + 2m_{23}f_3 \sin \theta$ за счет неортогональности осей чувствительности акселерометров.

– Погрешность $(m_{22} - m_{33})f_2 \sin \theta - (m_{11} - m_{33})f_1 \sin \gamma$ за счет ошибок масштабных коэффициентов горизонтальных акселерометров.

Тщательный учет этих погрешностей особенно важен при съемках с облетом рельефа, где полеты выполняются при интенсивном маневрировании самолета-носителя. Как уже говорилось, в режимах облета рельефа, из-за высокой коррелированности погрешностей с искомой аномалией, указанные погрешности гравиметра не удаляются корреляционными методами, так что в бескарданной аэрогравиметрии большое значение приобретают вопросы, связанные с калибровкой БИНС аэрогравиметра (как дополетной стендовой, так и периодической в полевых условиях) [9-10].

К другим особенностям постобработки данных относится сложность определения линейного тренда в смещении нулевого сигнала вертикального акселерометра БИНС аэрогравиметра за время полета. Для этой цели должны решаться задачи начальной и конечной выставок БИНС на стоянках летательного аппарата до и после полета с целью определения оценок смещения нулевого сигнала вертикального акселерометра [10]. С вопросами калибровки тесно связана еще одна особенность постобработки, состоящая в усложнении модели ошибок вертикального канала аэрогравиметра, в состав которой должны включаться также остаточные погрешности калибровки. Это, в свою очередь, усложняет контроль точности получаемых оценок аномалии силы тяжести, требующий, в том числе, и расширения критериев оценки точности (так, одним из критериев, очевидно, должна быть и точность оценивания остаточных калибровочных параметров аэрогравиметра) [12].

Для решения указанных сложных задач в МГУ были разработаны специальные методы и алгоритмы. Создание и развитие методик осуществлялось на основе обширного экспериментального материала, доступного авторам и включающего данные нескольких площадных съемок с современными бескарданными аэрогравиметрами (разных серий фирмы iMAR и прототипом GT4, разработанным отечественным производителем). Большинство съемок (2020-2022 гг.) выполнено на самолетах (Ан-30, Ан-3Т, Cessna и др.), две съемки выполнены на БПЛА (данные предоставлены компанией «Аэрогеофизика»).



Рис. 6. Гравиметр iCorus

Методика съемок с бескарданным гравиметром имеет следующие особенности [9]:

– Температурная калибровка БИНС аэрогравиметра на точном стенде с целью обновления калибровочной базы данных аэрогравиметра перед началом съемочного сезона.

– Выполнение до и после каждого полета статических калибровок БИНС аэрогравиметра с целью определения смещений нулевых сигналов всех трех акселерометров и их линейных трендов за полет.

Обработка данных бескарданного аэрогравиметра, полученных за один полет, включает следующие этапы [9]:

1. Экспресс-диагностика данных (проверка целостности, контроль температурных вариаций, насыщений вертикального акселерометра и пр.).

2. Начальная и конечная выставки БИНС аэрогравиметра, совмещенные с определением смещений нулевых сигналов акселерометров до и после полета [10].

3. Определение координат и относительных скоростей антенны бортового приемника глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в стандартном и фазо-дифференциальном режимах [11].

4. Интеграция БИНС-ГНСС, проводимая для горизонтальных каналов БИНС [12].

5. Решение гравиметрической задачи – оценивание вертикальной составляющей аномалии силы тяжести [12].

В авиационной бескарданной гравиметрии важную роль играет контроль точности решения задачи. Контроль точности включает следующие этапы:

1. Оценка калибровочных параметров. Так, например, остаточные угловые ошибки определения вертикали для кондиционных данных не должны превосходить по абсолютной величине 10 угл. сек.

2. Оценка линейного тренда нулевого сигнала вертикального акселерометра за полет.

3. Определение невязок оценивания аномалии на галсах полета. Невязки определяются на основе модели корректирующих измерений в гравиметрическом фильтре и имеют размерность этих измерений.

4. Статистика по сходимости оценок аномалий на повторных галсах (при их наличии) и статистика по сходимости оценок аномалий в точках пересечения рядовых и опорных галсов, а также межпрофильная корреляция оценок аномалии. Используется подход на основе детерминированной локальной гармонической модели поля в районе полета [13]. Путем сравнения оценок аномалии на галсах с построенной моделью могут быть выявлены систематические (длинноволновые) ошибки в оценках.

5. Сходимость с данными глобальных моделей гравитационного поля Земли высокого разрешения (EGM2008 или др.). Этот источник информации имеет ряд ограничений, связанных, во-первых, с более низким пространственным разрешением данных глобальных моделей по сравнению с аэрогравиметрическими данными (разрешение EGM2008 – примерно 10 км), во-

вторых – с точностью глобальных данных, неодинаковой для разных районов Земли [14-15].

Ниже представлены примеры обработки данных бескарданного аэрогравиметра iCogus в съемке на самолете Ан-30, выполненной в 2021 г. компанией «Аэрогеофизика». Измерения проводились в режиме огибания рельефа с перепадом высоты на галсах до 400 м. Средняя скорость полета на галсах – 70 м/с. На рисунке 7 представлены результаты сравнения оценок, полученных бескарданным гравиметром, с оценками по данным гравиметра GT2A. Частота среза гравиметрического фильтра – 0.01 Гц (эквивалентно разрешению в пространстве 3.5 км).

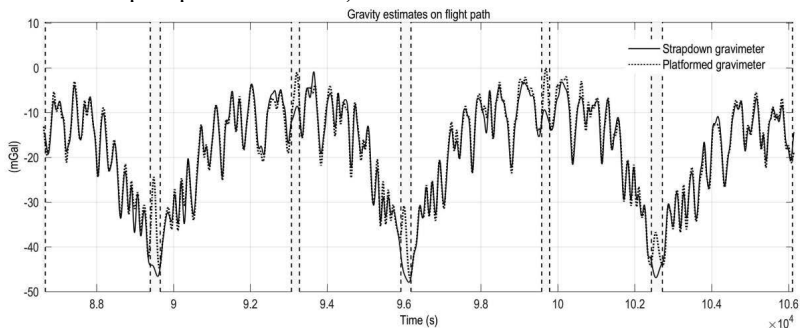


Рис. 7. Сравнение оценок аномалии, полученных по данным гравиметра с горизонтируемой платформой GT2A и бескарданного гравиметра iCogus, мГал

Для промежуточной оценки точности результатов анализировалась доступная информация, перечисленная выше. В частности, использовалась гипотеза о межпрофильной корреляции оценок аномалии на основе построения локальной гармонической модели поля [16] в районе полетов. Сопоставление оценок на галсах с моделью показало высокую сходимость – 1.3 мГал. Это значение обусловлено, в основном, сглаженностью модели поля в направлении поперек галсов (пространственное разрешение в обоих направлениях около 4 км). Отметим, что итоговая точность всей съемки (определяющаяся по сходимости в точках пересечения рядовых и опорных галсов [16]) составила 1.4 мГал [9].

Далее рассмотрим результаты обработки одного из полетов съемки на БПЛА вертолетного типа (рис. 8), выполненной компанией «Аэрогеофизика» в 2022 г. Полет проходил по четырем повторным галсам на постоянной высоте 420 м на первых двух галсах и 340 м на двух других. Длина галсов – около 20 км.

Скорость полета БПЛА – 90 км/ч.



Рис. 8. Беспилотный летательный аппарат (БАС-200) с прикрепленным бескарданным аэрогравиметром. Фото компании «Аэрогеофизика»

Бескарданный аэрогравиметр iCopus был помещен в дополнительный термокожух и прикреплен к корпусу БПЛА с его внешней стороны [9]. Внутри термокожуха аэрогравиметр устанавливался на амортизаторы.

При помощи алгоритма интеграции БИНС-ГНСС (фильтр Калмана и сглаживание) оценены угловые ошибки определения вертикали, составившие менее 10 угл. сек., оценка азимутальной ошибки виртуальной гиросплатформы – менее 3 угл. мин. Алгоритмом также оценен ряд других параметров (состав фильтра приведен в [9]). Перед вычислением аномалии был скомпенсирован линейный тренд в показаниях вертикального акселерометра, составивший около 2 мГал за полет. Оценки аномалии были рассчитаны с использованием гравиметрических фильтров с разными частотами среза.

Похожий полет на том же носителе и с тем же аппаратным составом был выполнен в другой день и включал пролет по двум галсам (на высотах 420 м и 340 м) вдоль того же маршрута. На рисунке 9 представлены оценки аномалии на всех шести галсах двух полетов при частоте среза фильтра 1/120 Гц (эквивалентно разрешению в пространстве 1.5 км). Сходимость оценок по шести повторным галсам составила от 0.4 до 0.8 мГал в зависимости от частоты среза фильтра.

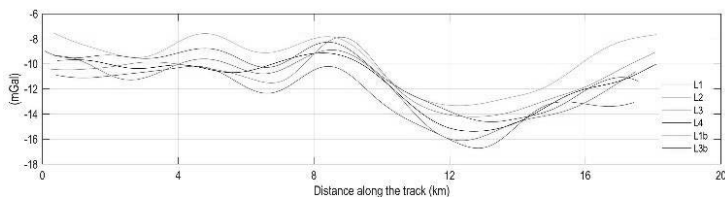


Рис. 9. Оценки аномалии силы тяжести на повторных галсах в съемке на БПЛА, мГал

Векторная аэрогравиметрия

В векторной аэрогравиметрии оцениваются все три компоненты вектора аномалии силы тяжести. Поскольку задача оценивания вертикальной компоненты рассмотрена выше, ограничимся здесь кратким обсуждением оценивания горизонтальных компонент (или, что эквивалентно, уклонений отвесной линии).

Для простоты формул рассмотрим случай карданного гравиметра с платформой, ориентированной в географической сетке. Тогда уравнения ошибок горизонтальных каналов записываются в виде

$$\Delta \dot{V}_1 = (\omega_3 + u_3) \Delta V_2 - \Delta g_1 - \alpha_2 f_3 + \Delta f_1, \quad (9)$$

$$\Delta \dot{V}_2 = (\omega_3 + u_3) \Delta V_1 - \Delta g_2 - \alpha_1 f_3 + \Delta f_2.$$

При этом угловые ошибки определения ориентации приборного трехгранника описываются уравнениями

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= -\omega_2 \alpha_3 + \omega_3 \alpha_2 - \Delta \omega_1, \\ \alpha_2 &= -\omega_3 \alpha_1 + \omega_1 \alpha_3 - \Delta \omega_2, \\ \alpha_3 &= -\omega_1 \alpha_2 + \omega_2 \alpha_1 - \Delta \omega_3. \end{aligned} \quad (10)$$

Уравнения корректирующих измерений СНС имеют вид

$$y_1 = \Delta V_1 - \delta V_1,$$

$$y_2 = \Delta V_2 - \delta V_2.$$

Можно показать, что в (9)-(10) наблюдаемыми по измерениям y_1, y_2 переменными являются комбинации горизонтальных компонент аномалии с ошибками горизонтирования и нулями горизонтальных акселерометров. Отдельно горизонтальные составляющие аномалии являются (почти) ненаблюдаемыми. Обеспечить наблюдаемость возможно, если учесть, что гравитационный потенциал – гармоническая функция. Для этого оценка уклонений отвесной линии проводится не на одном галсе, а на серии галсов, предпочтительно сделанных в течение одного полета. При этом определяемые параметры поля (коэффициенты разложения по сферическим скейлинг-функциям) включаются в вектор состояния фильтра Калмана.

Оценивание компонент вектора силы тяжести было выполнено в одной из съемок с бескарданным аэрогравиметром на Ан-30 при помощи разработанного алгоритма на основе априорной пространственной модели поля. Введена параметризация потенциала сферическими скейлинг-функциями в районе полета (рис. 10). Количество коэффициентов параметризации – 315. Траектория полета включала пять галсов север-юг и два секущих галса. Коэффициенты параметризации оценивались при помощи фильтра Калмана в информационной форме (вектор состояния включал все 315 коэффициентов плюс калибровочные параметры аэрогравиметра). По ним были рассчитаны оценки компонент вектора возмущения силы тяжести (рис. 11-12).

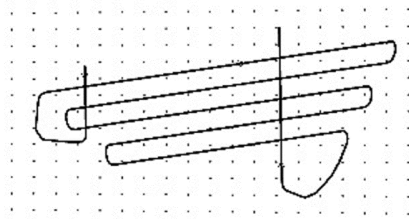


Рис. 10. Траектория полета и область параметризации потенциала скейлинг-функциями

Оценка точности результатов производилась на основе сравнения с данными XGM2019 в разложении до степени и порядка 2190 (эквивалентное разрешение в пространстве примерно 10 км) [17]. СКО разности оценок горизонтальных компонент и данных глобальной модели – 2-3 мГал (табл. 1).

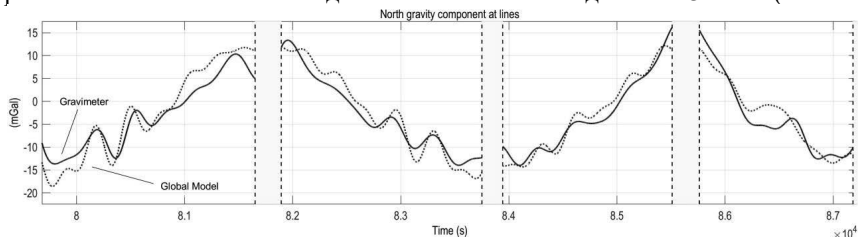


Рис. 11. Оценки северной компоненты вектора силы тяжести на четырех галсах север-юг (сплошная линия) и данные глобальной модели XGM2019 (пунктир), мГал

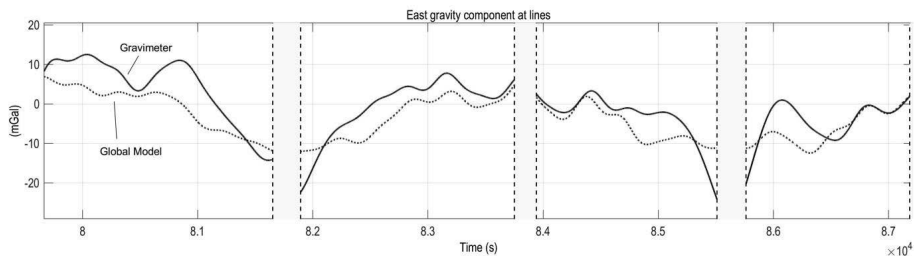


Рис. 12. Оценки восточной компоненты вектора силы тяжести на четырех галсах север-юг (сплошная линия) и данные глобальной модели XGM2019 (пунктир), мГал

Табл. 1. Статистика по сравнению оценок компонент вектора силы тяжести и данных модели XGM2019 в съемке на Ан-30

Параметр	Компоненты вектора силы тяжести		
	Восточная	Северная	Вертикальная
Среднее [мГал]	3.92	0.62	0.12
СКО [мГал]	2.98	2.01	2.16

Заключение

Представлен сравнительный анализ разных задач авиационной гравиметрии, исследуемых в МГУ, в исторической перспективе – от скалярной гравиметрии с гравиметром на базе стабилизированной платформы к векторной гравиметрии на базе бесплатформенного гравиметра. Представлены новейшие методики проведения съемки и постобработки данных бескарданного гравиметра, проведенные на ряде съемок на самолетах разных серий. На основе обработки данных современных бескарданых гравиметров показана возможность получения оценок аномалии силы тяжести с точностью необходимой для геолого-геофизических приложений. Показана также возможность векторной аэрогравиметрии с точностью определения горизонтальных компонент 2-3 мГал.

Приведены результаты обработки одной из первых в мире аэрогравиметрических съемок на БПЛА, демонстрирующие возможность определения аномалий с точностью 0.4-0.8 мГал (в зависимости от частоты среза гравиметрического фильтра) и пространственным разрешением 1-1.8 км.

Список литературы

1. Progress in airborne gravimetry: solved, open and critical problems // Proc. IAG Symposium on airborne gravity field determination. Calgary. 1995.
2. Болотин Ю.В., Голован А.А., Кручинин П.А., Парусников Н.А., Тихомиров В.В., Трубников С.А. Задача авиационной гравиметрии. Некоторые результаты испытаний // Вестник МГУ. Серия: Математика, механика. – 1999. – Вып. 2. – С. 36-41.
3. Голован А.А., Болотин Ю.В., Парусников Н.А. Математические модели аэрогравиметрической систем на базе корректируемого гироскопического блока // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. – 2003. – Т. 4. – С. 4-12.

4. Berzhitsky V. N., Bolotin Yu. V., Golovan A. A., Iljin V. N., Parusnikov N. A., Smoller Yu. L., Yurist S.Sh. GT-1A inertial gravimeter system. Results of flight tests. – Moscow: Faculty of mechanics and mathematics, MSU, 2002. – 40 p.
5. Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли / Под общ. ред. Пешехонова В.Г., науч. ред. Степанова О.А. – СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. – 390 с.
6. Пешехонов В.Г., Степанов О.А., Розенцвейн В.Г., Краснов А.А., Соколов А.В. Современное состояние разработок в области бесплатформенных инерциальных аэрогравиметров // Гироскопия и навигация. – 2022. – Т. 30, №4(119). – С. 3-35.
7. Jensen T.E., Olesen A.V., Forsberg R., Olsson P.-A., Josefsson Ö. New results from strapdown airborne gravimetry using temperature stabilisation // Remote Sens. – 2019. – Vol. 11. – P. 2682.
8. Смоллер Ю.Л., Юрист С.Ш., Богданов О.Н., Болотин Ю.В., Голован А.А., Козлов А.В. Результаты испытаний на яхте бескарданного гравиметра GT-X // Материалы XIX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ЦНИИ Электроприбор, 2012. – С. 172-174.
9. Голован А.А., Вязьмин В.С. Методика проведения аэрогравиметрических съемок и обработки первичных данных бескарданного аэрогравиметра // Гироскопия и навигация. – 2023. – Т. 31, №1(120). – С. 58-75.
10. Вязьмин В.С., Голован А.А., Говоров А.Д. Начальная и конечная выставки бескарданного аэрогравиметра с определением смещений нулевых сигналов акселерометров // Гироскопия и навигация. – 2023. – Т. 31, №1(120). – С. 76-88.
11. Golovan A.A., Vavilova N.B. Satellite navigation. Raw data processing for geophysical applications // J. Math. Sci. – 2007. – Vol. 146. – P. 5920-5930.
12. Вязьмин В.С., Голован А.А., Болотин Ю.В. Новые алгоритмы бескарданной аэрогравиметрии: проверка на экспериментальных данных // Сборник материалов XXVIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам (МКИНС2021). – СПб.: ЦНИИ Электроприбор, 2021. – С. 48-55.
13. Болотин Ю.В., Вязьмин В.С. Методы 12 и минимаксного оценивания в задаче определения аномалии силы тяжести по данным аэрогравиметрии с использованием сферического вейвлет-разложения // Гироскопия и навигация. – 2015. – № 3. – С. 82-94.
14. Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C., Factor J.K. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) // J Geophys Res Solid Earth. – 2012.
15. Конешов В.Н., Михайлов П.С., Железняк Л.К., Соловьев В.Н. Оценка перспективности и разрешающей способности ультравысокостепенных моделей гравитационного поля Земли // Геофизические исследования. – 2021. – № 1. – С. 40-53.
16. Могилевский В.Е., Бровкин Г.И., Смирнов А.С., Прозорова Г.В. Оценка погрешности данных аэрогравиметрической съемки // Мониторинг. Наука и Технологии. Науки о Земле. – 2018. – Т. 36, №3. – С. 6-17.
17. Zingerle P., Pail R., Gruber T., Oikonomidou X. The combined global gravity field model XGM2019e // J Geod. – 2020. – Vol. 94. – P. 1-12.

ТЕХНОСФЕРА ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Чечкин А.В.

Военная академия РВСН им. Петра Великого

Ключевые слова: искусственный интеллект, автоматизированная система, избыточная система, среда радикалов, информационно-системная безопасность, когнитивные системы.

Аннотация. Целью статьи является обсуждение методологических принципов и места в ноосфере Земли систем с элементами Искусственного Интеллекта (ИИ). Порядок обсуждения предлагается следующий: ноосфера В.И. Вернадского; 1) принцип языкового общения ИИ; 2) принцип человеко-центризма ИИ; 3) принцип среды радикалов ИИ; 4) принцип разнохарактерного целеполагания ИИ; 5) принцип достаточной целостности ИИ; 6) система с элементами ИИ как ультрасистема; техносфера ИИ.

Введение. Ноосфера В.И. Вернадского

Слова академика В.И. Вернадского: «... Все человечество, вместе взятое, представляет ничтожную массу вещества планеты. Мощь его связана не с его материей, но с его мозгом, разумом и направленным этим разумом его трудом. Ноосфера есть новое геологическое явление на нашей планете. В ней впервые человек становится крупнейшей геологической силой. Он может и должен перестраивать своим трудом и мыслью область своей жизни, перестраивать коренным образом по сравнению с тем, что было раньше» [1]. Эти слова полностью объясняют важность и актуальность выбранной нами темы обсуждения.

Всякую автоматизированную сервисную техническую систему программных и аппаратных средств, предназначенных для автоматизации любого процесса деятельности человека, назовем Искусственным Интеллектом (ИИ), если для нее выполняются следующие пять принципов.

1. Принцип языкового общения ИИ

ИИ должен воспринимать голосовые и письменные сообщения людей, других систем ИИ, включая саму себя. На практике это уже частично присутствует в рамках интернета вещей, языкового интерфейса людей и компьютеров, голосового управления нейронных искусственных сетей языкового типа GPT, включая их собственный языковой самоконтроль.

В качестве обоснования этого принципа приведем слова академика И.П. Павлова: «...Вторая сигнальная система представляет собой чрезвычайную прибавку к высшей нервной деятельности человека, это наше лишнее, добавочное, социальное и есть человеческое.» «...Слово сделало нас людьми.» [2]. Как для человека, так для технической системы ИИ роль первой и второй сигнальных систем определяющая для них. Она определяет их первичный и языковой сенсориумы, которые в свою очередь определяют их подсознательное и сознательное поведения [3-5]. Успехи технических систем на базе языковых моделей типа GPT общеизвестны.

2. Принцип человеко-центризма ИИ

Для каждой системы ИИ в рамках автоматизированной сервисной системы главным должен всегда быть человек-оператор, командир, хозяин,

начальник, который каждый раз определяет цель существования ИИ, тактико - техническое задание (ТТЗ) ИИ.

Всякая автоматизированная сервисная система планирует свои действия по безусловному выполнению своего ТТЗ и управляет процессом выполнения этих требований. Согласно данному принципу, верхняя часть дерева целей ИИ составляет ТТЗ, а среднюю часть и оперативную часть вырабатывает и далее исполняет сама система ИИ. Без ТТЗ система ИИ не функционирует. В любой момент любой план действий ИИ находится под контролем человека - хозяина и может быть им скорректирован.

3. Принцип среды радикалов ИИ

Каждая система ИИ должна быть информационно – системно избыточной в форме среды радикалов. Среда радикалов – это одновременно и распределенная модель всего театра действий ИИ, и модель самого ИИ как главного действующего участника театра.

Все данные и системы необходимые и достаточные ИИ для решения любой штатной для ИИ задачи в штатных для ИИ ситуациях должны быть реализованы в системе ИИ в форме среды радикалов. Среда радикалов – это форма распределенного избыточного информационно – системного ресурса ИИ, когда каждая целостность этого ресурса представлена радикалом. Радикал – это индивидуальный символ (командир) и одновременно это функциональная система средств, которая имеет два внешнедоступных типа состояний: *активные (включен)* и *пассивные (выключен)*. *Активный радикал* – это функционирующие средства. *Пассивный радикал* – это не функционирующие средства, но готовые к активации. Система планирования и управления ИИ каждый раз активирует рабочий кластер (системоквант) среды радикалов под текущую штатную задачу и штатную ситуацию. Все остальные радикалы при этом составляют потенциальные возможности ИИ и находятся в резерве, в ожидании, в готовности к своей активации. Избыточность ресурсов ИИ необходима в каждый момент для эффективного парирования (учета) появления возможных изменений штатных ситуаций и штатных задач, а также возникновения новых, нештатных задач и нештатных ситуаций. Величина избыточности ИИ определяет уровень информационно – системной безопасности ИИ [6]. Форма избыточности как среды радикалов имеет двойное достоинство – во-первых, бесконфликтность, когда все невостребованные в данный момент радикалы ИИ выключены и не влияют на поведение ИИ. Они находятся в резерве, в хранении, в ожидании, во – вторых, доступность, когда каждый радикал ИИ индивидуально и независимо управляем и обновляем. Для эффективного управления активированием среды радикалов среда радикалов структурирована координатной навигационной системой. При обучении, обновлении ИИ и развития среды радикалов не требуется постоянно корректировать и согласовывать всю среду радикалов ИИ.

4. Принцип разнохарактерного целеполагания ИИ

Системы ИИ постоянно обновляются и развиваются, отслеживая естественные и искусственные изменения во всем театре действий ИИ, включая саму систему ИИ.

Точками роста для этого являются нештатные задачи и нештатные ситуации. Для эффективного обновления ИИ использует свои попытки и процесс самообучения ИИ. Кроме этого ИИ использует свои коммуникационные возможности и поиск опыта других систем ИИ. Наконец, обновление ИИ происходит от дружественных советов пользователей самой ИИ, автоматизированной сервисной системы.

5. Принцип достаточной целостности ИИ

Система ИИ постоянно мониторит себя и свой театр действий, свою среду радикалов и сертифицирует ее на целостность и гомеостаз. При этом целостность восстанавливается с учетом времени и минимизации материальных, финансовых, энергетических и др. ресурсов.

6. Система с элементами ИИ как ультрасистема

Развитие ИИ как ультрасистемы. В каждой технической умной системе (УС) с элементами ИИ обязательно присутствует специально выделенная ультрасистема обеспечения ее информационно – системной безопасности (ИСБ) [6, 7]. Ультрасистема подобна центральной нервной системе ЕИ человека. Ультрасистема предназначена для сбора, хранения, преобразования и использования информации о самой «Я-УС», а также об объектах и связях своего театра действий. Ультрасистема определяет интеллектуальные свойства ИИ и является многоуровневой информационной подсистемой планирования и управления своим поведением УС. Ультрасистема ИИ на каждом своем иерархическом уровне является радикальной системой и находится в режиме интеллектуального ускоряющегося развития (рис. 1).



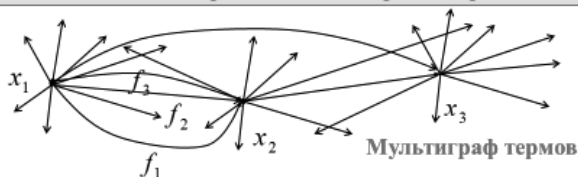
Рис. 1. Ультрасистема обеспечения ИСБ УС

Этапы интеллектуального развития ультрасистемы. Выделим пять основных этапов (уровня) развития. *Первый этап* связан с проблемами развития первичного сенсориума ИИ, с проблемами сенсорных сетей, технического

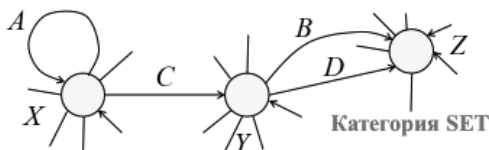
зрения, акустических сетей, проблемами сбора и хранения больших массивов метрологических измерений. Первичный сенсорium УС является первым уровнем ИИ, хранителем чувственных **образных моделей мира**. Этот уровень является **подсознательным** для ИИ, еще не осознанным, не познанным, не структурированным для УС. Среди объектов этого мира имеются объекты: «программное обеспечение (ПО УС)», «программно-технические средства (ПТС) УС» и др. (рис. 1). **Второй этап** интеллектуального развития УС связан с процессом выделения в первичном сенсории **основных, главных для УС, доминирующих объектов и отношений** путем их номинирования, присвоения каждому из них языкового индивидуального, уникального символа. На этом этапе появляется **вторая сигнальная система УС, языковой сенсории УС**. Язык – средство выделения в первичном сенсории главной, **осознанной части** и одновременно язык является **механизмом познания** этой осознанной части первичного сенсории. В ультрасистеме возникает второй иерархический уровень, **языковой сенсории**, как **дубликат части (осознанной) первичного сенсории**. Языковой сенсории теперь позволяет УС умозрительно глубоко изучать эту осознанную часть первичного сенсории когнитивными (умственными) технологиями. В частности, УС познает ПО и ПТС УС. В УС происходит бурное изучение при помощи языковой сенсории объективной структуры окружающего мира УС. Интеллектуализация УС ускоряется и, появляется новый, второй иерархический уровень ультрасистемы. Далее наступает **третий этап** развития УС – это **лексика, когда появляются слова – понятия** и развивается **языковая семантическая координатная опорная сеть**. Лексика завершает выделение в осознанной части первичного сенсории классов сходных объектов и отношений, которые объективно похожи и эквивалентны между собой (рис. 2).

Переход к третьему уровню ИИ - лексика

Область языковых термов-имен сенсорных образных моделей



Координатная локализация (классификация) термов и их связей



Лексика - опорная сеть понятий, множества и операторы

Рис. 2. Математические модели осознанной части первичного сенсории. Мультиграф термов и переход к третьему уровню ИИ, к лексике

Сначала – это ультраоснащение языковых понятий до ЛБД.

Далее в УС происходят два взаимодополняющих друг друга новых процесса изучения осознанной части первичного сенсорiums. Развивается новый **четвертый информационный иерархический уровень. над опорной сетью**, когда происходит внутренняя координатизация понятий (рис. 3).

Четвертый этап – это два *оснащения* опорной координатной сети понятий, *ультрамножественное и ультраоператорное*. При этом каждое опорное множество оснащается до ультрамножества, локальную базу данных (ЛБД) (рис. 3), а каждый опорный оператор оснащается до ультраоператора, локальную базу знаний (ЛБЗ) (рис. 4). В результате категория SET (рис. 2) превращается в категорию ULTRASET (рис. 4). В ИИ появляется информационно-системная избыточная математическая модель мира ИИ, **ядро ИИ** в форме *распределенной базы данных (БД) и распределенной базы знаний (БЗ)* осознанной части первичного сенсорiums (рис. 4).

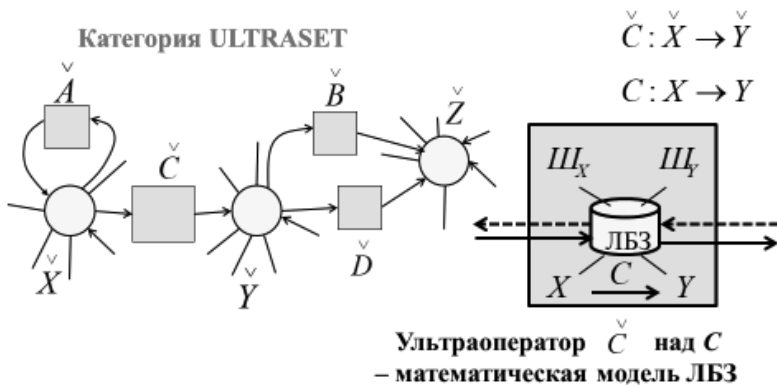


Рис. 3. Развитие четвертого иерархического уровня ИИ

Итак, на четвертом этапе решаются сначала проблемы создания *локальных баз данных (ЛБД) и структурирование больших данных в распределенную БД УС*. Кроме этого на четвертом этапе позже происходит выделение локальных знаний на базе отдельных операторов категории SET. На практике в ЕИ человека происходит создание и формализация частных профессиональных технологий или *ультраоператорное оснащение* координатной сети понятий до формы *распределенной базы знаний (БЗ)* осознанной части первичного сенсорiums. Решаются проблемы создания *локальных баз знаний (ЛБЗ)*, машинного обучения, *прогнозирования и принятия решений* в рамках распределенного информационно-системного ресурса УС в форме среды радикалов-ЛБД и радикалов-ЛБЗ. В результате в ультрасистеме УС на четвертом уровне формируется и бурно развивается *языковая информационно-системная единая радикальная модель мира УС*. Создается в УС ядро ИИ, *распределенная БД УС и*

БЗ УС. Подчеркнем еще раз, что большая часть первичного сенсорiums остается в подсознательной форме. Модель мира УС или ядро ИИ – это только часть, осознанная часть самой УС и осознанная часть театра действий УС (рис. 5, 6).

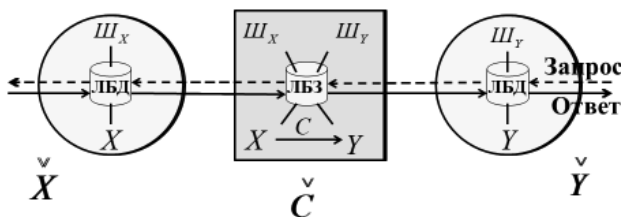
Ультраснащение опорных операторов в распределенную БЗ ИИ



Ультраснащенная опорная сеть – распределенная БД и БЗ, т.е. информационно-системная избыточность

Рис. 4. Завершение развития четвертого уровня ИИ до ядра ИИ

Согласование ЛБД и ЛБЗ в ядре ИИ



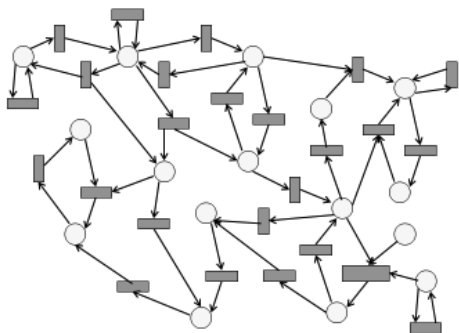
Ультрасистема $\check{C} : \check{X} \rightarrow \check{Y}$
Система $C : X \rightarrow Y$

Рис. 5. Семантическое согласование в распределенной БД и БЗ ядра ИИ

Отметим, что в ЕИ человека ядро ЕИ человека связано с внешней бумажной и электронной формой разнообразных частных профессиональных знаний и технологий, которым обучают специалистов в средних и высших

учебных заведениях (рис. 6). На рисунке изображена только видимая средняя часть ядра ИИ, доступная явным сенсорам УС. Здесь нет микро и макро виртуальных уровней ядра ИИ, доступных специальным измерительным инструментам УС и соответственным математическим моделям.

Ядро ИИ как распределенная БД и БЗ ИИ



Согласованная радикальная модель мира ИИ в рамках своего театра действий

Рис. 6. Ядро ИИ – часть модели видимого мира ИИ, отражающая осознанную часть видимого первичного сенсориума

Наконец на последнем *пятом этапе* в УС появляются «когнитивные элементы ИИ». Пятый когнитивный иерархический уровень ультрасистемы УС – это *языковая операционная система интеллектуального планирования и ситуационного управления* поведением УС в рамках своего театра действий с условием обязательного и эффективного выполнения своих целевых указаний со стороны человека – хозяина (рис. 6). Ультрасистема УС (рис. 1) на своем когнитивном, верхнем, пятом уровне отвечает за планирование и *активирование системоквантов ядра ИИ* для управления поведением УС в рамках своего театра действий.

Три одновременных процесса в ультрасистеме УС. Языковая операционная система планирования и управления поведением УС в рамках распределенной радикальной БД и БЗ модели УС и с учетом имеющегося избыточного информационно-системного ресурса УС, осуществляет одновременно три следующих информационных управляющих процесса: 1) *текущий целевой* – решение очередной тактической задачи во исполнение целевого указания ТТЗ хозяина по принципу «целенаправленность поведения УС», 2) *текущий сенсорный мониторинг* – непрерывный сбор ситуационной информации по принципу «здесь и сейчас» и коммуникационному принципу «что нового появилось и отражено ли в ядре ИИ и в глобальном виртуальном информационно-системном пространстве», 3) *текущий сертификационный процесс* – обеспечение достаточной целостности, гомеостаза ядра ИИ, а так же самой УС и всего ее театра действий УС по принципу «закрывание гештальта» (рис. 7).

Три одновременных процесса в ИИ УС

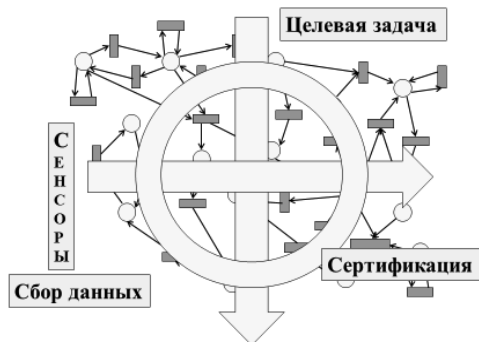


Рис. 7. Активационные процессы в ИИ языковой радикальной единой модели видимого мира УС: целевой, сенсорный и сертификационный

Заключение. Техносфера ИИ

С появлением искусственных технических умных систем с элементами ИИ в ноосфере появляется новый революционный системный эффект, **техносфера ИИ**. Вот некоторые стороны новой реальности жизни. Представим себе совсем близкое будущее, когда во дворах жилых домов, на обочинах дорог, на площадках у магазинов и офисов, у мест отдыха не будет совсем стоянки припаркованных личных автомобилей, которые часами ожидают своих хозяев. Все автомобили будут только в делах, в движении. Они будут беспилотниками, будут без водителей, но с эффективными элементами ИИ. Такая же новая картина жизни будет в космосе, на Земле в логистике, в сервисном обслуживании, в любом транспорте, на любом производстве, в спорте и т.д. и т.п. Сейчас даже не все новое можно себе представить, но оно будет. Приведем в заключении слова академика В.И. Вернадского: «Научное мировоззрение, проникнутое естествознанием и математикой, есть величайшая сила не только настоящего, но и будущего» [1]. По-видимому, придёт время единого для техники и человека делового языка интеллектуального общения, *радикального языка глобальной сетевой техносферы ИИ*.

Список литературы

1. Вернадский В.И. О науке. Т. 1. Научное знание. Научное творчество. Научная мысль. – Дубна: Феникс, 1997. – 576 с. – (Ч. 3. Научная мысль как планетное явление. Стр. 303-538).
2. Павлов И.П. Лекции о работе больших полушарий головного мозга. – 1949.
3. Воронков Г.С., Чечкин А.В. Проблемы моделирования сенсориума и языковой системы естественного интеллекта индивидуума // Интеллектуальные системы. – 1997. – Т. 2, Вып. 1-4.
4. Васенин В.А., Пирогов М.В., Чечкин А.В. Информационно-системная безопасность критических систем. – М.: Изд-во «КУРС», 2018. – 348 с.
5. Потюпкин А.Ю., Чечкин А.В. Искусственный интеллект на базе информационно – системной избыточности. – М.: Изд-во «КУРС», 2019. – 384 с.
6. Чечкин А.В. Тезис о наличии искусственного интеллекта // Интеллектуальные системы. – 2021. – Т. 25, Вып. 1. – С. 29-49.
7. Чечкин А.В. Когнитивный уровень искусственного интеллекта // Интеллектуальные системы. – 2022. – Т. 26, Вып. 2. – С. 5-24.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕРИЙНОГО ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ В СИСТЕМАХ ЦИФРОВОГО УДАРНОГО ГРАВИРОВАНИЯ

Магомедов М.Х., Громов А.Е.

МГУ им. М.В. Ломоносова;

Научно-производственное объединение «Сауно»

Ключевые слова: виброгенератор, зубцовая структура статора, упругий подвес, коллекторный двигатель постоянного тока, структурная схема замещения, ШД-виброгенератор, ударный момент.

Аннотация. Обоснована возможность применения серийного промышленного шагового двигателя (ШД) в новом качестве – в режиме вынужденных ударных колебаний с управляемой амплитудой в частотном диапазоне от долей Гц до 2000 Гц. Такого рода устройства востребованы в вибрационных робототехнических системах. Показано, что новый ШД-виброгенератор может быть эффективно использован также в прецизионных станках ударного гравирования в разных режимах модуляции управляющих импульсов.

Гравировальный станок – автомат ударного действия нового поколения описан в [1-3]. Станок укомплектован оригинальной инструментальной головкой, её принцип действия основан на использовании серийного шагового двигателя в новом качестве. В станках предыдущих версий применялся линейный электромагнит, серийное производство которых в неспециализированных условиях было неэффективным и дорогостоящим. Это не позволяло повысить ни качество формообразования элементов гравирования, ни производительность станков.

В конце 90-х годов в НПО «Сауно» (компания является лидером компьютеризированного художественного гравирования) был разработан принципиально новый управляемый генератор ударных импульсов, работающий в требуемых частотном диапазоне с модулируемой амплитудой и частотой удара (автор Магомедов М.Х. [1]). Новизной и отличительной особенностью генератора было то, что в качестве его базового комплектующего элемента использовался серийный технически и технологически хорошо отработанный шаговый двигатель. Новый генератор получил название «ШД-виброгенератор» (ШДВГ или ВГ), хотя его функциональные возможности оказались гораздо шире. Положительный эффект от технической реализации серийного ШД в технологии гравирования был таким, что за несколько лет применения ШД-виброгенератор полностью вытеснил дорогостоящий «самодельный» ВГ, выполненный на базе линейного электромагнита [4].

Особенность штатного режима работы ШД заключается в пространственно-временной периодичности электромагнитных и механических процессов: периодичность в пространстве – в секторе одного зубцового деления статора (ротора), период во времени – определяется частотой задающих импульсов. В механизме создания момента пары сил на валу ротора или ударного момента ШД (в отличие от коллекторного электродвигателя постоянного тока (ЭДПТ)) первостепенную роль играет зубцовая структура статора и ротора ШД, связанная с фазной системой обмоток [5, 6].

В штатном режиме при двухфазном возбуждении управляющие прямоугольные импульсы, поступающие с выходов драйверов в отдельные фазы A и B , создают «бегущее» дискретно-круговое электромагнитное поле, которое через токи Ампера вовлекает в синхронное дискретно-круговое вращение ротор двигателя с частотой задающих импульсов.

На рисунке 1 представлена общая схема нового ВГ в составе инструментальной головки (ИГ), основой которого является серийный гибридный ШД [5]. Аппаратная модернизация ШД заключается, во-первых, в простом параллельном объединении фазных обмоток A_M и B_M статора, как показано на рис. 1: точка « a » фазы A соединяется с точкой « c » фазы B и точки « b » фазы A – с точкой « d » фазы B . Выход двухполупериодного инвертора подключается к общей точке « ac », а точка « bd » – к минусу источника питания. В результате такого объединения фаз вектор магнитного потока при нулевом рассогласовании θ становится пульсирующим. Максимальный алгебраический момент пары сил на плече r радиуса ротора в секторе $0 < \theta < \lambda$ будет определен тангенциальной составляющей вектора силы Ампера F_a и пропорционален углу θ отклонения оси ротора:

$$M_{\max}|_{0 < \theta < \lambda} = 2nN_r I_0 \Phi \theta,$$

где n – число витков фазы; N_r – число полюсов ротора; I_0 – ток в фазах A_M и B_M ; Φ – магнитный поток, определяемый индукцией в воздушном зазоре B ; $\lambda = \frac{\pi}{4}$ для 8-ми полюсного гибридного ШД.

Пространственная ориентация осей фазных обмоток на рис.1 изображена условно.

Во-вторых, для преобразования малых угловых колебаний ротора в секторе $0 < \theta < \lambda$ ШД в линейные удары технологического инструмента использован одноплечий рычаг (рис. 1).

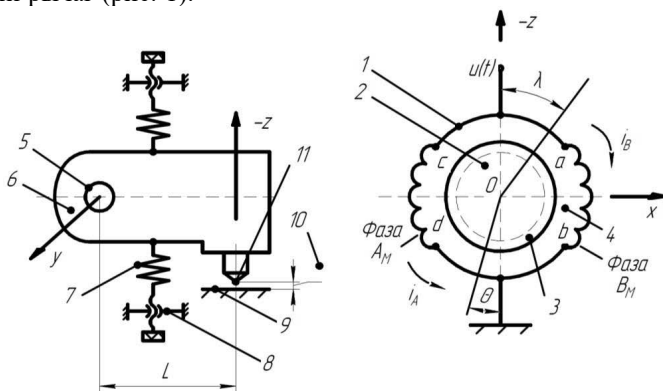


Рис. 1. Общая схема ШДВГ: 1 – параллельное соединение статорных обмоток; 2 – ротор ШД; 3 – воздушный зазор; 4 – статор ШД; 5 – вал ротора; 6 – ударный рычаг; 7 – упругий элемент; 8 – микрометрический винт; 9 – картинная плоскость; 10 – технологический зазор; 11 – ударный инструмент

Оптимальным вариантом конструкции является рычаг с плечом L , жёстко закреплённый на валу ротора. Известно, что в механических устройствах ударные реакции способствуют износу и могут привести к разрушению опорных подшипников и других узлов.

Геометрия рычага (размеры и форма) и место крепления гравировального инструмента рассчитаны исходя из условия, при котором не возникают импульсные (ударные) реакции на опорные подшипники шагового двигателя. Для возбуждения «качающегося» электромагнитного поля при однополярном управлении необходимо после каждого последующего временного импульса возвращать ротор в предыдущее пространственное положение. Поэтому рычаг в корпусе инструментальной головки установлен в упругом подвесе (рис. 1). В качестве упругих элементов могут быть использованы как пружины, так и постоянные магниты. Для регулировки натяжения пружин применены микрометрические винты [7].

В ударном гравировальном станке упругий подвес совместно с приводом инструментальной головки осуществляет также функции выставки и регулировки технологического зазора x , необходимого при ударном гравировании для разгона инструмента до требуемой скорости удара [8].

Физические процессы, протекающие в диапазоне $0 < \theta < \lambda$ ШД (например, $\lambda = \frac{\pi}{4}$ для 8-ми полюсного двигателя), в первом приближении идентичны процессам в ЭДПТ с якорным управлением $u_y(t)$, поэтому схему замещения ШДВГ можно представить известной двухконтурной структурной схемой ЭДПТ, охваченной упругой обратной связью по углу – координате θ звена [9]. В частности, упругая связь может быть линейной, характеризующейся коэффициентом упругости c_y .

Непосредственно из структурной схемы замещения получим следующие лапласовские передаточные функции по переменной управления $u_y(t)$, характеризующие динамику ШДВГ в рабочем диапазоне $0 < \theta < \lambda$:

$$\Phi_u^\theta(s) = \frac{\theta(s)}{U_y(s)} = \frac{c_M}{c_y R(T^2 s^2 + (2\xi T + \frac{c_e c_M}{c_y R})s + 1)} = \frac{c_M}{c_y R(T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1)};$$

$$\Phi_u^\Omega(s) = \frac{\Omega(s)}{U_y(s)} = \frac{c_M s}{c_y R(T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1)};$$

$$\Phi_u^M(s) = \frac{M(s)}{U_y(s)} = \frac{c_M(T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1)}{c_y R(T_1^2 s^2 + \frac{1}{c_y R}(2\xi_1 T_1 c_y R + c_e c_M)s + 1)},$$

где верхние индексы при функциях $\Phi_u^\theta(s)$, $\Phi_u^\Omega(s)$, $\Phi_u^M(s)$ означают соответственно θ – угол, Ω – угловую скорость, M – момент; c_e – коэффициент противо-ЭДС эквивалентного ЭДПТ; c_M – коэффициент вращающего момента; c_y – коэффициент упругого элемента; R – омическое сопротивление цепи

управления; ξ – коэффициент упругого элемента; $T = \frac{J_{\Sigma}}{c_{\text{от}}}$ – суммарная механическая постоянная времени; $c_{\text{от}}$ – коэффициент скоростного (вязкого) сопротивления; J_{Σ} – суммарный момент инерции и коэффициент скоростного (вязкого трения); $T_1 = \sqrt{\frac{T}{c_y}}$ – постоянная времени эквивалентного обобщённого колебательного звена; $\xi_1 = \frac{1}{2\sqrt{c_y T}}$ – коэффициент относительного демпфирования обобщённого колебательного звена [9].

Реакции ШДВГ на импульсные управляющие воздействия $f_y(t)$ переменной длительностью τ определены в общем виде соответствующими обратными преобразованиями Лапласа:

$$\Omega(t) = L^{-1}(U_y(s)\Phi_u^{\Omega}(s));$$

$$\theta(t) = L^{-1}(U_y(s)\Phi_u^{\theta}(s));$$

$$M(t) = L^{-1}(U_y(s)\Phi_u^M(s)),$$

где $f(t) = h(u(t) - u(t - \tau))$ – импульсная функция управления, преобразование Лапласа которой $LF(t) = \frac{h(1 - e^{-\tau s})}{s(1 - e^{-T_0 s})}$.

На рисунке 2 представлено фото модернизированной ИГ с ШДВГ ударно-гравировального станка НПО «Сауно». В данном варианте головки в качестве упругих элементов подвеса применены две пары постоянных магнитов, включённых по дифференциальной схеме [8].

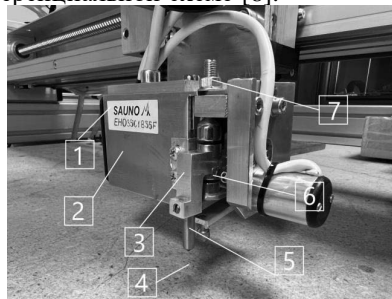


Рис. 2. Фото инструментальной головки: 1 – корпус ИГ; 2 – ШД (в корпусе); 3 – рычаг; 4 – картинная плоскость заготовки; 5 – ударный инструмент (алмазная игла); 6 – дифференциальный магнитный подвес; 7 – микрометрический винт

Вопросы динамики удара при широтной-временной модуляции управляющих импульсов, применяемой в DCIE-технологии с целью получения черно-белой палитры оттенков B_r -изображения, являются самостоятельными и в данной статье не рассматриваются.

Выводы

Шаговый двигатель является техническим средством импульсного типа, его принцип действия основан на ударном характере колебаний ротора в диапазоне одного зубцового деления статора с частотой задающих импульсов и поэтому априори может быть применён в качестве альтернативного ВГ.

Посредством несложной аппаратной модернизации серийный ШД из штатного режима может быть переведён в режим виброгенератора вынужденных ударных колебаний управляемой амплитуды и частоты, достигающей 2000 Гц. [5-7].

Список литературы

1. Патент №2429133 РФ. Гравировальное устройство (варианты) / М.Х. Магомедов. – Заявка № 2010111630/05 от 29.03.2010; опубл. 20.09.2011, Бюл. №26.
2. Магомедов М.Х., Громов А.Е., Яковлев А.В. Цифровая технология управляемого ударного гравирования // Вестник компьютерных информационных технологий. – 2015. – №15. – С. 3-11. – doi: 10.14489/vkit.2015.010.pp.003-011.
3. Патент №2399497 РФ. Устройство для нанесения изображения на поверхности твёрдых материалов методом ударного или ударно-вращательного гравирования / М.Х. Магомедов. – Заявка №2009119902/12 от 27.05.2007; опубл. 20.09.2010. Бюл. №26.
4. Миков И.Н. Технология автоматизированного гравирования художественных изделий. – М.: Изд-во «Мир горной книги», 2007. – 346 с.
5. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления. – М.: Изд-во «Энергоатомиздат», 1987. – 201 с.
6. Филимонов Н.Б. Системы многорежимного регулирования: концепция, принципы построения, проблемы синтеза // Известия вузов. Сер. Приборостроение. – 1987. – №5. – С. 18-26. – doi:10.17587 / mau.19.595-600.
7. Кокорев Ю.А., Звягин Ф.В. Способы расчёта точностных характеристик деталей и узлов приборов. – М.: Изд-во «МГТУ им. Н.Э. Баумана», 2016. – 211 с.
8. Магомедов М.Х., Громов, Яковлев А.В. Прецизионный гравировальный станок-автомат интегрированной компьютерно-копировальной системы // Вестник машиностроения. – 2020. – №11. – С. 71-77. – doi: 10.36652/0042-4633-2020-11-71-77.
9. Красовский А.Б. Основы электропривода. – М.: Изд-во «МГТУ им. Н.Э. Баумана», 2019. – 403 с.

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РАЗВЕДКИ УГЛЕВОДОРОДОВ

Либерзон М.Р.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Ключевые слова: месторождения углеводородов на морском шельфе, сейсотехнологии, космический мониторинг.

Аннотация. Показаны новые сейсмические технологии разведки месторождений углеводородов на морской шельфе. Предложено использование космического мониторинга в качестве дополнительного этапа разведки углеводородов на морском шельфе.

Добычу углеводородов необходимо проводить после предварительной разведки их месторождений, чтобы по возможности избежать неоправданных финансовых расходов, которые могут возникнуть в случаях бурения в тех местах, где нет месторождений нефти и газа. Разведка на морских шельфах с целью обнаружения месторождений углеводородов под морским дном проводится уже много десятилетий на основе сейсмических технологий с использованием донных станций. В течение последних 10-15 лет разработаны новые отечественные технологии сейсморазведки, которые по многим параметрам превосходят другие, в том числе и зарубежные, методики (работы [1, 2]). Здесь даётся краткое описание этих технологий. Кроме того, указаны возможности и методики применения космического мониторинга для разведки месторождений углеводородов на шельфе (работы [3, 4]). Применение в совокупности космического мониторинга и сейсмических технологий может привести к более эффективной разведке месторождений нефти и газа под морским дном и создать возможность существенной экономии финансовых средств при добыче.

Сейсотехнологии

Разработанные в России и используемые для сейсморазведки углеводородов на шельфе самовсплывающие донные станции в отличие от станций, в работе с которыми применяются фалы (верёвки), имеют целый ряд существенных преимуществ: исключаются зацепления фала за неровности дна и возможные препятствия, что влечёт порчу или потерю станций, обрыв фала; нет необходимости иметь на судне достаточно места для хранения фала и лебёдок для него, что влечёт необходимость использования крупногабаритных судов и исключает ведение разведки на малых глубинах и в приливно/отливных транзитных зонах и др. Станции и технологии их применения постоянно совершенствуются. На рис. 1 показан один из видов самовсплывающих донных станций и оборудования к ней. Разработаны и успешно применяются для сбора всплывших на поверхность воды станций беспилотные катера (рис. 2). Для изготовления корпуса станции используются радиопрозрачные материалы, что позволяет снимать данные разведки непосредственно после всплытия станции. Ставятся и решаются специальные задачи механики и управления станциями в процессе погружения и подъёма на поверхность воды, задачи транспортировки станций на другие территории разведки месторождений углеводородов.

Космический мониторинг

Разведка месторождений углеводородов на шельфе с помощью донных станций представляет собой достаточно дорогостоящую процедуру. Для того, чтобы по возможности исключить проведение этих работ там, где месторождений под морским дном может не оказаться, предлагается предварительно использовать результаты космического мониторинга. Наиболее эффективным представляется обнаружение из космоса выделений газа на водной поверхности, так называемых газовых сипов (рис. 3). Появление газовых сипов указывает на большую вероятность наличия под морским дном месторождений углеводородов. Тогда после проведения космического мониторинга в местах обнаружения газовых сипов целесообразно проведение сейсморазведки с помощью донных станций.



Рис. 1



Техническая спецификация Беспилотного судна C-WORKER 5	
Длина	5,5 м
Ширина	1,7 м
Осадка	0,9 м
Вес, нетто	1350 кг
Двигатель	57 л. с. дизель
Движитель	винт фиксированного шага, прямого подключения
Скорость	До 10 узлов
Автономность	До 7 дней при скорости 7 узлов
Полезная мощность	1кВатт
Управление	Система для ручного, полуавтоматического и автоматического управления
Связь	Радио

Рис. 2



Рис. 3

Заключение

Предложены следующие этапы проведения разведки месторождений углеводородов на шельфе.

Этап I. На основании космического мониторинга по обнаруженным газовым сипам выделяются районы шельфа, в которых месторождения углеводородов наиболее вероятны.

Этап II. В выделенных с помощью космического мониторинга районах шельфа производится разведка месторождений углеводородов на основе сейсмических технологий с использованием самовсплывающих донных станций.

Список литературы

1. Либерзон М.Р. Технология ГЕОНОД : состояние и перспективы автоматизации и управления // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20, № 11. – С. 696.
2. Либерзон М.Р., Павлов Ю.В., Погородний П.Г. Использование сейсмических технологий для геофизической разведки, эксплуатации и обеспечения безопасности месторождений и технологических объектов // Идеи и новации. – 2022. – Т. 10, № 1-2. – С. 158.
3. Бондур В.Г., Кузнецова Т.В. Выявление газовых сипов в акваториях арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. – 2015. – № 4. – С. 30.
4. Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса // Сборник статей под редакцией академика В.Г. Бондура. – М.: Научный мир, 2012.

СОЗДАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ЭКСПРЕСС- ДИАГНОСТИКИ ПАТОЛОГИЙ МИОКАРДА

Арутюнов Ю.А., Чащин Е.А.

Московский физико-технический институт;

КГТА им. В.А. Десярева

Ключевые слова: экспресс-диагностика, патология миокарда, напряженность магнитного поля.

Аннотация. Разработаны новые технологии экспресс-диагностики патологии миокарда. Показана необходимость такой экспресс-диагностики для обеспечения работы членов экипажей воздушных судов, диспетчерских служб. Найдены способы повышения эффективности диагностики.

В настоящее время заболевания сердечно-сосудистой системы (ССС) широко распространены, а смертность от заболеваний ССС является одной из наиболее высоких в мире и, например, в России составляет 1462 на 100000 жителей в год [1]. При этом одной из основных причин, имеющей к тому же тенденцию к увеличению, является внезапная сердечная смерть [2]. Не менее актуальной тенденция к внезапной сердечной смерти проявляется и применительно к пилотам и диспетчерам. Анализ случаев потери работоспособности членами летного экипажа при выполнении регулярных авиаперевозок в США в период 1993-1998 выявил 5 случаев смерти в кабине летного экипажа, причем все от заболеваний ССС. Механизм развития внезапной сердечной смерти различен, однако во всех случаях, в условиях выполнения членами экипажей воздушных судов и диспетчерами управления воздушным движением профессиональной деятельности, создает угрозу безопасности полетов [3]. Это показывает, что разработанные в соответствии Федеральными авиационными правилами «Медицинское обеспечение полетов в гражданской авиации» и действующие в настоящее время медицинское освидетельствование, предполетный и предсменный осмотр членов экипажей и диспетчеров не позволяют в полной мере прогнозировать, на основе данных диагностики, риск развития дезадаптационных состояний ССС, вызванных неспособностью ССС организма членов экипажа или диспетчеров сохранять адаптацию действию гравитационных или стрессовых перегрузок. Это делает актуальным повышение эффективности диагностики внезапной сердечной смерти на ранних стадиях и прогнозирования развития патологий, а именно:

- количественное описание самого дезадаптационного состояния сердечно-сосудистой системы на основе диагностических параметров, получаемых в процессе прохождения медицинского освидетельствования или осмотра;
- оценка риска возникновения угрозы безопасности полетам вследствие развития дезадаптационного состояния вплоть до внезапной сердечной смерти;
- оценка срока возможного наступления дезадаптационного состояния.

В работе принимаем, что исключительной формой дезадаптационного состояния ССС пилота или диспетчера, является внезапная сердечная смерть. Методика прогнозирования дезадаптационных состояний ССС в этом случае должна быть основана на ключевом понятии медицинской диагностики –

функциональное состояние ССС. Трудности формулирования понятия «функциональное состояние ССС» связаны с тем, что это понятие характеризует одновременную связь адаптационной способности ССС к действию гравитационных или стрессовых перегрузок. Аналогично, трудности представляет и вопрос определения «дезадаптационного состояния», поскольку это состояние характеризуется неспособностью ССС членов экипажа или диспетчеров сохранять адаптацию к перегрузкам и, как следствие, сохранять работоспособность, адекватность и дееспособность. Таким образом, можно полагать, что разработка методики прогнозирования дезадаптационных состояний ССС позволит предупреждать наступление негативных явлений в ССС и, как следствие, осуществлять профилактику внезапной сердечной смерти и реабилитацию функционального состояния членов экипажа или диспетчеров.

Рассмотрим способы повышения эффективности диагностики внезапной сердечной смерти на ранних стадиях и прогнозирования развития патологий на примере поражений миокарда. В 70-х гг. 20 века в США по рекомендациям Центра им. Эймса была предпринята первая попытка организовать непрерывный мониторинг ССС экипажа гражданских лайнеров [4], заключающаяся в размещении датчиков ЭКГ. Однако объективность медико-биологического контроля в этом случае существенно зависела от контакта датчика с поверхностью кожи, который при длительном использовании, а так-же перераспределении циркулирующей крови вследствие гравитационных перегрузок, мог значительно изменяться. Поэтому в настоящее время предпочтение отдаётся бесконтактным способам непрерывного получения информации о состоянии пилота [4]. Однако в этом случае диагностика осуществляется только на основании анализа внешних проявлений поведения и параметрами психофизической напряженности, что не позволяет эффективно выполнять диагностику функционального статуса миокарда на ранних стадиях развития патологий, приводящих к внезапной сердечной смерти. Таким образом, при решении задачи, связанной с оценкой функционального статуса миокарда, возникает противоречие между требованием к непрерывному учету функциональных характеристик миокарда, и требованием к воспроизводимости результатов. Это делает актуальным решение проблемы совершенствования существующих методов безконтактной диагностики.

Одним из актуальных направлений работ по теории и методам исследования деятельности ССС, является повышение информативности и полноты неинвазивных, безопасных и не нагруженных для пациента методов диагностирования. Исходя из опубликованных данных [5-7] видно, что характеристики гемодинамики, физико-механики и электрофизики сердечно-сосудистой системы, близкие к результатам физиологических экспериментов и клинических наблюдений достигаются в приближении, что миокард сердца имеет топологию Мебиуса. Таким образом, одной из наименее изученных характеристик миокарда, определяющих возможность прогнозирования деятельности сердечно-сосудистой системы, является показатель его скрученности, отображающий функциональный статус миокарда (рис. 1).

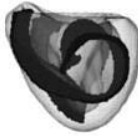


Рис. 1. Миокард «здорового» сердца имеет топологию Мебиуса

Известным диагностическим подходом для безконтактной диагностики функционального статуса миокарда является многоканальная магнитокардиография (МКГ). Однако, несмотря на высокую информативность, анализ результатов МКГ выполняется, в основном, на основании визуальной классификации карт. Т.е. анализ результатов МКГ основывается на наиболее информативных, но плохо формализуемых признаках и правилах. Кроме того, низкая интенсивность магнитного поля, которое должно регистрироваться при составлении карт, требует использования СКВИДов. Последнее существенно ограничивает применение МКГ с экономической точки зрения.

Известно, что электрические и магнитные поля взаимосвязаны [8] и всякое изменение электрического поля во времени $\partial \vec{E} / \partial t$ вызывает в той же точке вихрь поля магнитного $\text{rot} \vec{H}$. Таким образом, согласно первого уравнения Максвелла, если в каждый данный момент деятельности сердца его дипольный электрический генератор создает вокруг электрическое поле, то одновременно возникает эквипотенциальное магнитное поле, качественные и количественные характеристики которого могут быть визуализированы. Учитывая, что магнитная проницаемость в тканях тела человека и в окружающем пространстве отличается незначительно, то можно полагать, что метрология магнитного поля может быть выполнена размещение датчиков в рабочем кресле пилота или диспетчера.

Известно, что меридиан сердца [9] представляет собой тор с поверхностью Мебиуса. С учётом этого приближения, пренебрегая влиянием энергии анизотропии и обменных воздействий, нами ранее была разработана модель оценки влияния неориентированной поверхности на распространение в ее объеме магнитного поля [10]. В этой расчетной модели под миокардом сердца принимали магнитопровод, который выполнен из ферромагнитного материала в виде тора с поверхностью Мебиуса (рис. 2., поз. 1) и локальным расположением катушки намагничивания (рис 2, поз. 2) имитирующей источник электромагнитных колебаний сердца.

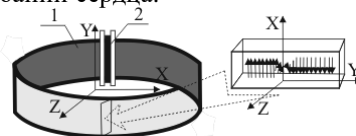


Рис. 2. Модель магнитопровода

В модели принимаем, что векторы намагниченности направлены в одну сторону и «механически» меняют свое направление при прохождении «зоны Мебиусной закрутки». С учетом сделанных допущений и упрощений выполним анализ распространения магнитного поля в тороидальном магнитопроводе с

топологией Мебиуса (норма) и традиционном торроидальном исполнении (патология). На рисунке 3 приведены результаты расчета, выполненного в приближении что магнитопровод выполнен из ферромагнитного материала типа Magnifer с габаритными размерами: внутренний радиус 40 мм, внешний радиус 50 мм, сечение прямоугольное 10 мм. Ток частотой 50 Гц и силой до 1 А, вызывающий МДС, протекает через катушку с числом витков 100.

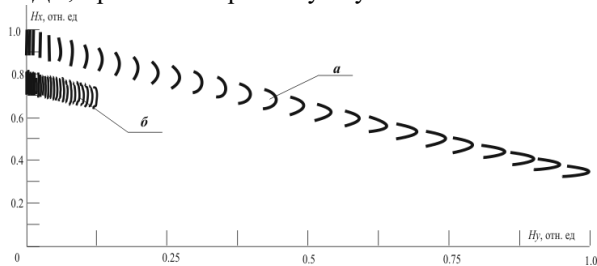


Рис. 3. Линии уровня напряженности магнитного поля в плоскости x, y: H_x , H_y – проекция напряженности магнитного поля в плоскости x и y, соответственно; а – магнитопровод выполнен в виде тора (патология), б – магнитопровод в форме петли Мебиуса (норма)

Видно, что напряженность магнитного поля в магнитопроводе выполненном в традиционной топологии (патология) больше, чем напряженность магнитного поля в магнитопроводе с топологией Мебиуса (норма). Причем в проекции оси x, разница напряженностей составляет 25%, а в проекции оси y – достигает 10 раз изменяясь с 0,1 до 1,0 отн. ед. Так же отметим, что во всех случаях форма зависимости H качественно совпадает с формой распространение электромагнитной волны по сечению магнитопровода (см. рис. 3), что качественно подтверждает достоверность предложенной модели. Из приведенных результатов видно, что «механическое» измерения ориентации доменной структуры магнитопровода при изменении его топологии вызывает изменение остаточной индукции и напряженности магнитного поля, причем не только в магнитопроводе, но и на удалении от него. Применительно к миокарду сердца, это позволяет предположить о возможности функциональной диагностики путем измерения интенсивности магнитного поля, которое различается для нормального (скрученного миокарда) и патологий.



Рис. 4. Усредненные показатели QRS комплекса МКГ здоровых людей (А) с гипертрофией левого желудочка (Б) и с инфарктом миокарда (В) [11]

Вывод о влиянии патологии миокарда на напряженность магнитного поля коррелирует с известными результатами [11], так же показывающими, что амплитуда сигнала регистрируемого магнитного поля здорового и больного человека различается (рис. 4) что качественно подтверждает достоверность предложенной модели.

Следует отдельно отметить, тот факт, что электромагнитная природа поля, возникающего при деятельности сердца, позволяет регистрировать как магнитный, так и так же и электрический потенциал. Однако, для решения задачи по определению топологии миокарда, метрологией электрических полей наряду с традиционными задачами оценки значений потенциалов на поверхности кожных покровов должна включать в себя задачу исследования неоднородного распределения поля. Последнее, применительно к регистрации электрических потенциалов, существенно затруднено как необходимостью инвазивной установки электродов на заданную глубину, так и тем, что при установке электродов вне кожных покровов результаты измерения трудно поддаются описанию ввиду существенных изменений диэлектрической проницаемости токопроводящих тканей как внутри тела, так и диэлектрической среды вне его. Кроме того, разность электрических сопротивлений кожных покровов существенно изменяется как с течением времени, так и в зависимости от состояния человека (например, потеет, либо голоден и вязкость крови, а значит и ее электрическая проницаемость изменяется). Вариативность диэлектрической проницаемости человека, в отличие от практически неизменных значений магнитной проницаемости, не позволяет выполнять эффективное решение задачи определения внутренней структуры источника (топологии Миокарда) по интенсивности внешнего электрического поля. Таким образом, решение поставленной задачи оценки функционального резерва деятельности сердца возможно путем регистрации только одного параметра – амплитуды напряженности или индукции магнитного поля, величина которого изменяется в зависимости от функционального статуса миокарда.

Результаты 3D сканирования миокарда показали, что он имеет переменные размеры: длина 60 см, ширина 8-10 см, толщина 0,5-2 см [12]. На основании полученных данных в работе принимаем, что морфологически-подобная модель миокарда с масштабируемыми магнитофизическими характеристиками, может быть выполнена из гибкого материала (рис. 5, а), а имитация зон поражения миокарда может быть выполнена магнитопластом, устанавливаемым взамен или дополнительно в имитирующей инфаркт зоне (рис. 5, б).

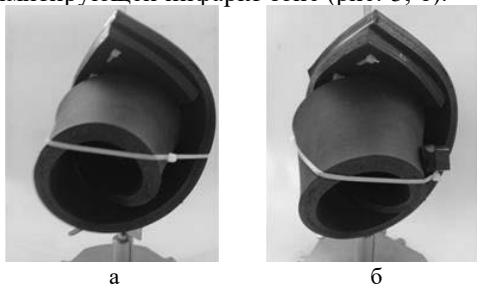


Рис. 5 Внешний вид образцов: а – образец «норма»; б – образец «Патология»

Результаты измерений магнитного поля образцов (см. рис. 5) приведен на рисунке 6.

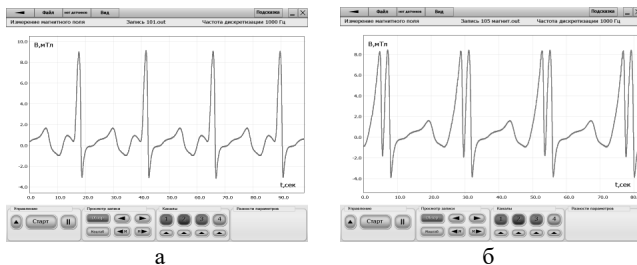


Рис. 6 Напряженность магнитного поля регистрируемого на расстоянии от поверхности 1 см: *а* – магнитное поле «Норма»; *б* – магнитное поле «Патология»

Образцы (см. рис. 5) закреплялись на предметном столе и вращались со скоростью относительно неподвижно эквидистантно установленного тесламетра со скоростью 5 оборотов в мин. Из приведенных результатов видно, что напряженность магнитного поля тора составляет до 10 мТл. Регистрация амплитудных значений подтверждает ранее выдвинутое положение [13] о том, что для каждого момента времени кардиоцикла результат регистрации магнитных полей отражает функциональный статус миокарда. Причем наличие магнитных патологий, сопровождается ростом амплитудных значений напряженности магнитного поля. Аналогичные результаты получены и в клинической практике [11], показывающие на двухкратный рост величины регистрируемых значений напряженности магнитного поля при заболеваниях сердца и имеют клиническое подтверждение, представленное измерением ЭКГ (рис. 7).

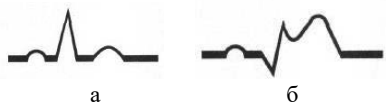


Рис. 7 - Изменения ЭКГ при инфаркте миокарда [14]: *а* – норма; *б* – острый инфаркт миокарда

Вывод. Регистрация амплитудных значений магнитного поля сердца обеспечиваемое за счет электронного чипа, как элемента безконтактной диагностики, установленного в спинке кресла пилота или диспетчера позволит повысить эффективность обнаружения на ранних стадиях развития патологий миокарда. Если амплитудные значения напряжённости магнитного поля миокарда не превышают нормальных значений, составляющих порядка 50 мкТл – опасности внезапной сердечной смерти нет. Если значения превышены это показывает на риск развития внезапной сердечной смерти.

Так же следует отметить, что физиологическая и патофизиологическая значимость феномена топологии миокарда изучена в настоящее время недостаточно полно, это делает актуальным принципиальному дальнейшее переосмысление и пересмотр существующих моделей, описывающих работу

сердца и ССС, с точки зрения учета новых, критически значимых качественных свойств и особенностей миокарда сердца.

Список литературы

1. Бойцов С.А., Никулина Н.Н., Якушин С.С. и др. Внезапная сердечная смерть у больных ИБС: распространенность, выявляемость и проблемы статистического учета // Российский кардиологический журнал. – 2011. – №2. – С. 59-64.
2. Центральная база статистических данных Федеральной службы государственной статистики, 2010 год (www.gks.ru/dbscripts/Cbsd).
3. Праскурничий Е.А. Управление сердечно-сосудистым риском для безопасности полётов: учебное пособие. – М.: ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России, 2019. – 157 с.
4. <https://www.techinsider.ru/technologies/12787-kak-samolyet-kontroliruet-zdorove-pilotov/>
5. Davey P.P. Which Lead for Q-T Interval Measurements // *Cardiology*. – 2000. – Vol. 94. – P. 159-164.
6. Ikefujii H., Nomura M., Nakaya Y. et al. Visualization of cardiac dipole using a current density map: detection of cardiac current undetectable by electrocardiography using magnetocardiography // *J. Med. Invest.* – 2007. – Vol. 54(1-2). – P. 116-123.
7. Pope J. H. Missed diagnosis of acute cardiac ischemia in the emergency department / J.H. Pope, T.P. Aufderheide, R. Ruthazer et al. // *N. Engl. J. Med.* – 2000. – Vol. 342. – P. 1163-1170.
8. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1964. - 750 с.
9. Лисин А.В., Платоненко В.И. Топологические свойства и отношения живых систем. Эффект нелокальности в живых системах // *Вестник международной академии наук (Русская секция)*. – 2009. – №1. – С. 21-27.
10. Арутюнов Ю.А., Комаринцев В.Н., Возовиков И.Н., Стащук К.А., Чашин Е.А. Разработка методов функциональной диагностики повышенной эффективности на основе новых представлений об анатомии миокарда сердца // *Вестник аритмологии*. Арутюнов Ю.А., Комаринцев В.Н., Возовиков И.Н., Стащук К.А., Чашин Е.А. – 2018. – № 5. – С. 58.
11. Холодов Ю.А., Козлов А.Н., Горбач А.М. Магнитные поля биологических объектов. – М.: Наука, 1987. – 145 с.
12. Арутюнов Ю.А., Шашок П.А., Чашин Е.А. Морфологически-подобная модель миокарда с масштабируемыми магнитофизическими характеристиками // *Современные проблемы науки и образования*. – 2018. – № 6.
13. Buckberg G.D. Basic science review: The helix and the heart // *Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. – 2002. – Vol. 124. – № 5. – P. 376-386.
14. Признаки инфаркта миокарда с подъемом сегмента ST на ЭКГ / [Электронный ресурс]. – URL: https://meduniver.com/Medical/cardiology/infarkt_miokarda_s_podьемom_st_na_ekg.html.

ОБ УПРАВЛЕНИИ ТРЕХЗВЕННЫМ РОБОТОМ-ЗМЕЕЙ С ПОМОЩЬЮ ВНУТРЕННЕГО МАХОВИКА В СЛУЧАЕ АНИЗОТРОПНОГО СУХОГО ТРЕНИЯ

Селюцкий Ю.Д., Климина Л.А.

НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова

Ключевые слова: трехзвенный робот-змея, внутренний маховик, анизотропное сухое трение.
Аннотация. Рассматривается трехзвенный робот-змея, перемещающийся по шероховатой горизонтальной плоскости. Каждое звено опирается на плоскость в одной точке. Предполагается, что в точках контакта имеет место сухое анизотропное трение. Единственным управляющим воздействием является момент, приложенный к маховику, расположенному в головном звене робота. Предложен алгоритм управления этим моментом, обеспечивающий продвижение робота вдоль заданного направления. Исследовано влияние параметров системы на среднюю скорость этого движения.

Введение. Мобильные роботы, перемещающиеся по шероховатым поверхностям или в сопротивляющихся средах за счет движения внутренних масс, активно разрабатываются и исследуются в научной литературе. Такие устройства, в частности, предназначены для применения в агрессивных средах. Рассматриваются системы как с переменной, так и с неизменяемой геометрией [1-3].

Как правило, управление роботами-змеями осуществляется с помощью приводов, расположенных в шарнирах между звеньями (например, [14-18, 4-8]). В то же время, в ряде работ продвижение робота обеспечивается за счет перемещения внутренних масс (различные схемы исследовано, в частности, в [4]). В работах [19-24, 9-14] рассмотрены аппараты с несколькими звеньями (от 1 до 3), приводимые в движение с помощью внутреннего маховика.

Важным аспектом моделирования динамики роботов-змей является описание сил взаимодействия с опорной плоскостью. В настоящей работе предполагается, что трение в точках контакта является сухим анизотропным. Это отличает ее от аналогичных работ: в [4, 5] сухое трение считается изотропным, в [6-10, 12, 13] механическая система является неголономной (по крайней мере, одна из опор представляет собой конек Чапльгина), в [14] в точке опоры действует анизотропное вязкое трение, а в [11] аппарат движется в жидкости. Можно отметить, что для реальных змей действительно имеет место анизотропия трения при движении [15].

1. Описание системы и уравнения движения. Рассмотрим трехзвенный механизм *AK-KBL-LC*, расположенный в горизонтальной плоскости (рис. 1). Центры масс звеньев расположены в точках *A*, *B* и *C*. Звенья соединены в точках *K* и *L* цилиндрическими шарнирами, причем $AK = KB = BL = LC = r$. В каждом шарнире установлена линейно-упругая спиральная пружина. Будем считать, что контакт каждого звена с опорной плоскостью является точечным, причем точка контакта совпадает с центром масс соответствующего звена. На головном звене *AK* в точке *A* установлен маховик, имеющий массу m_0 и центральный момент

инерции J_0 . Маховик приводится во вращение вокруг вертикальной оси A мотором, статор которого является частью звена AK .

В качестве обобщенных координат выберем координаты x и y точки A , углы $\varphi_i, i = 1...3$, отклонения звеньев AK, KL, LC от оси OX , а также угол φ_0 поворота маховика относительно первого звена (эта координата, очевидно, будет циклической). Обозначим через V_i векторы скоростей точек A, B, C .

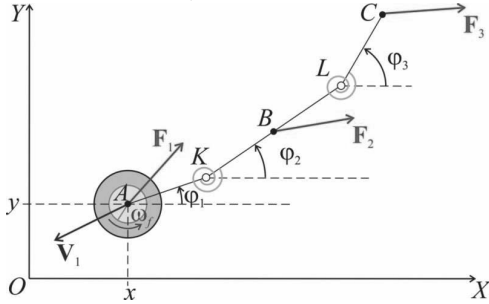


Рис. 1. Схема робота

Будем считать, что в каждой точке опоры (A, B, C) действует анизотропное сухое трение F_i . Анизотропия связана со свойствами опор, а не поверхности, по которой движется робот. Для описания анизотропного трения воспользуемся подходом [16], в рамках которого для силы трения принимается следующая формула:

$$\mathbf{F} = -N\Theta \frac{\mathbf{V}}{|\mathbf{V}|},$$

где N – величина нормальной реакции в точке опоры, \mathbf{V} – скорость точки контакта, а Θ – так называемый тензор трения, который характеризует зависимость коэффициента сухого трения от направления движения.

Пусть e_ξ, e_η – орты главных осей тензора трения. Тогда проекции силы трения \mathbf{F} на эти оси определяются следующим выражением

$$\begin{pmatrix} F_\xi \\ F_\eta \end{pmatrix} = -\frac{N}{V} \Theta \begin{pmatrix} V_\xi \\ V_\eta \end{pmatrix}, \quad \Theta = \begin{pmatrix} \mu_\xi & 0 \\ 0 & \mu_\eta \end{pmatrix},$$

где V_ξ, V_η – проекции вектора \mathbf{V} на главные оси тензора трения.

Анизотропию трения можно реализовать на практике, например, используя в качестве опоры жесткосоединенное со звеном (заклиненное) колесо, протектор которого имеет специальный рисунок.

Пусть для i -го звена направления вдоль и поперек звена являются главными для соответствующего тензора трения, и компоненты тензора трения в главных осях для всех звеньев одинаковы. Проекции векторов на эти направления будем обозначать индексами ξ и η , а коэффициенты трения по этим направлениям – μ_ξ и $\mu_\eta \geq \mu_\xi$. Тогда

$$\begin{aligned}
F_{i\xi} &= -\mu_{\xi} N_i V_{i\xi} / V_i, \quad V_{i\xi} = V_{ix} \cos \varphi_i + V_{iy} \sin \varphi_i, \\
F_{i\eta} &= -\mu_{\eta} N_i V_{i\eta} / V_i, \quad V_{i\eta} = -V_{ix} \sin \varphi_i + V_{iy} \cos \varphi_i; \\
F_{ix} &= F_{i\xi} \cos \varphi_i - F_{i\eta} \sin \varphi_i; \\
F_{iy} &= F_{i\xi} \sin \varphi_i + F_{i\eta} \cos \varphi_i.
\end{aligned}$$

При сделанных предположениях, очевидно, имеют место равенства $N_1 = m_1 g$, $N_2 = m_2 g$, $N_3 = m_3 g$ (где m_i – масса i -го звена).

Момент U , формируемый мотором, – единственное управление, присутствующее в системе. Будем считать, что этот момент ограничен по абсолютной величине значением U_{\max} . Отметим, что имеет место существенный дефицит управляющих воздействий.

Составим уравнения движения робота в виде уравнений Лагранжа второго рода. Исключим из этих уравнений ускорение маховика и представим систему относительно координат точки A и углов ориентации звеньев в следующем виде:

$$A\ddot{X} + B\Omega = Q,$$

где

$$\begin{aligned}
X &= (x \quad y \quad \varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \varphi_3)^T, \quad \Omega = (\dot{\varphi}_1^2 \quad \dot{\varphi}_2^2 \quad \dot{\varphi}_3^2)^T, \\
A &= \begin{pmatrix} m_1 + m_2 + m_3 & 0 & -r(m_2 + m_3)S_1 & -r(m_2 + 2m_3)S_2 & -rm_3S_3 \\ 0 & m_1 + m_2 + m_3 & r(m_2 + m_3)C_1 & r(m_2 + 2m_3)C_2 & rm_3C_3 \\ -r(m_2 + m_3)S_1 & r(m_2 + m_3)C_1 & r^2(m_2 + m_3) + J_1 & r^2(m_2 + 2m_3)C_{21} & r^2m_3C_{31} \\ -r(m_2 + 2m_3)S_2 & r(m_2 + 2m_3)C_2 & r^2(m_2 + 2m_3)C_{21} & r^2(m_2 + 4m_3) + J_2 & 2r^2m_3C_{32} \\ -rm_3S_3 & rm_3C_3 & r^2m_3C_{31} & 2r^2m_3C_{32} & r^2m_3 + J_3 \end{pmatrix}, \\
B &= \begin{pmatrix} -r(m_2 + m_3)C_1 & -r(m_2 + 2m_3)C_2 & -rm_3C_3 \\ -r(m_2 + m_3)S_1 & -r(m_2 + 2m_3)S_2 & -rm_3S_3 \\ 0 & -r^2(m_2 + 2m_3)S_{21} & -r^2m_3S_{31} \\ r^2(m_2 + 2m_3)S_{21} & 0 & -2r^2m_3S_{32} \\ r^2m_3S_{31} & 2r^2m_3S_{32} & 0 \end{pmatrix}, \\
Q &= \begin{pmatrix} F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} \\ F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} \\ r(F_{2y} + F_{3y})C_1 - r(F_{2x} + F_{3x})S_1 - U - c_1(\varphi_1 - \varphi_2) \\ r(F_{2y} + 2F_{3y})C_2 - r(F_{2x} + 2F_{3x})S_2 - c_1(\varphi_2 - \varphi_1) - c_2(\varphi_2 - \varphi_3) \\ r(F_{3y}C_3 - F_{3x}S_3) - c_2(\varphi_3 - \varphi_2) \end{pmatrix}, \\
C_i &= \cos \varphi_i, \quad C_{ij} = \cos(\varphi_i - \varphi_j), \quad S_i = \sin \varphi_i, \quad S_{ij} = \sin(\varphi_i - \varphi_j).
\end{aligned}$$

Здесь $J_{1,2,3}$ – центральные моменты инерции соответствующих звеньев, а c_1 и c_2 – коэффициенты жесткости пружин в первом и втором шарнире.

Будем строить управление таким образом, чтобы обеспечить продвижение робота в направлении, противоположном оси OX . При этом ограничимся рассмотрением таких движений, при которых скорости точек контакта остаются не равными нулю.

Рассмотрим управление следующего вида:

$$U = \begin{cases} U_p, & |U_p| \leq U_{\max}, \\ U_{\max} \operatorname{sign}(U_p), & |U_p| > U_{\max}, \end{cases}$$

$$U_p = U_{\max} \operatorname{sign}(\sin(2\pi ft)) + k_0 y + k_1 \dot{\varphi}_1.$$

Здесь f – частота возбуждения, k_0 и k_1 – коэффициенты обратной связи, предназначенные для того, чтобы обеспечить нулевое значение среднего отклонения курса от направления против оси OX .

Для упрощения дальнейшего анализа выберем единицы измерения таким образом, чтобы выполнялись следующие соотношения:

$$m_1 + m_2 + m_3 = 1, \quad r = 1, \quad g = 1.$$

Эта процедура эквивалентна переходу к безразмерным величинам.

2. Параметрический анализ. Проведем численное моделирование динамики системы, выбрав следующие значения параметров:

$$m_1 = 0.5, m_2 = 0.1, J_1 = 1.5, J_2 = J_3 = 0, c_1 = 0.9, c_2 = 1.2, \mu_\xi = 0.05, \mu_\eta = 0.7,$$

$$U_{\max} = 0.6, f = 0.12, k_0 = -0.9, k_1 = 0.5.$$

На рисунке 2 представлена траектория точки A и положения звеньев робота в различные моменты времени. Видно, что система движется вдоль оси абсцисс, что и было целью управления.

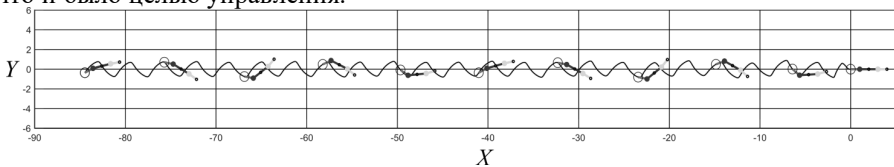


Рис. 2. Движение робота-змеи

Исследуем теперь влияние различных параметров системы (как конструктивных, так и коэффициентов в законе управления) на среднюю скорость V_{aver} продвижения робота вдоль заданной прямой.

На рисунке 3 представлены зависимости V_{aver} от величины U_{\max} и от частоты возбуждения f . И здесь, и далее в каждом случае величины коэффициентов k_0 и k_1 подбирались таким образом, чтобы значение V_{aver} было максимальным.

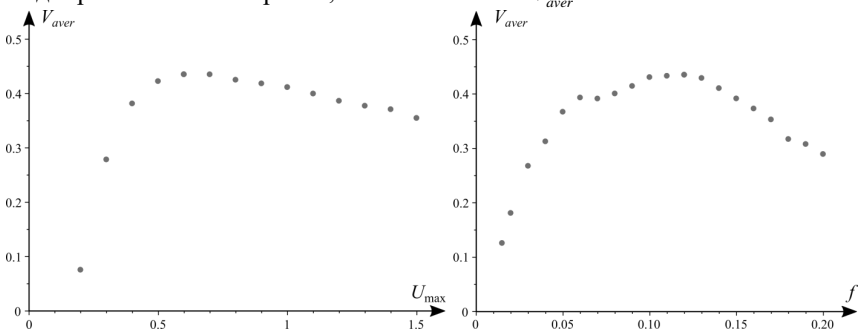


Рис. 3. Зависимость скорости робота от параметров закона управления

Видно, что указанная зависимость является немонотонной. Интересно, что увеличение максимума момента управления свыше некоторого оптимального значения приводит к уменьшению скорости продвижения. Данное обстоятельство представляется несколько неожиданным. Оно связано с тем, что энергия расходуется на более интенсивные угловые колебания звеньев.

Зависимость средней скорости от частоты также является немонотонной. Существует некоторое значение f , при котором достигается максимум V_{aver} при фиксированных значениях прочих параметров.

Влияние коэффициентов жесткости пружин между звеньями на скорость продвижения проиллюстрировано на рисунке 4, где представлена зависимость V_{aver} от c_2 при разных значениях c_1 .

Видно, что зависимость скорости от коэффициентов жесткости пружин в шарнирах между звеньями немонотонная. С точки зрения максимизации скорости нецелесообразно выбирать как пружины с малой жесткостью, так и пружины с большой жесткостью. Отметим, что в случае $c_1 = 0.9$ в достаточно широком диапазоне значений c_2 скорость остается практически постоянной.

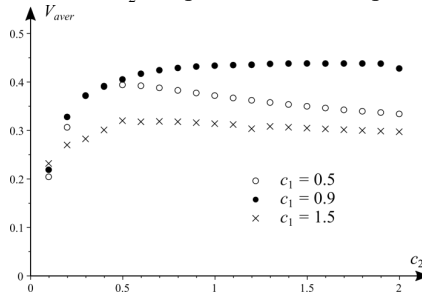


Рис. 4. Зависимость скорости робота от коэффициентов жесткости пружин в шарнирах

Оценим теперь влияние анизотропии трения на скорость робота. На рисунке 5 представлена зависимость V_{aver} от коэффициента трения μ_η в направлении поперек звена (значение коэффициента трения вдоль звена фиксировано: $\mu_\xi = 0.05$).

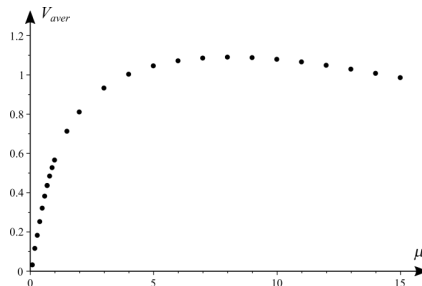


Рис. 5. Зависимость скорости робота от коэффициента трения в направлении поперек звена

Как и следовало ожидать, с ростом μ_1 скорость продвижения увеличивается. Однако при достаточно больших значениях этого коэффициента (здесь мы оставляем в стороне вопрос о физическом смысле таких значений) наблюдается некоторое уменьшение V_{aver} .

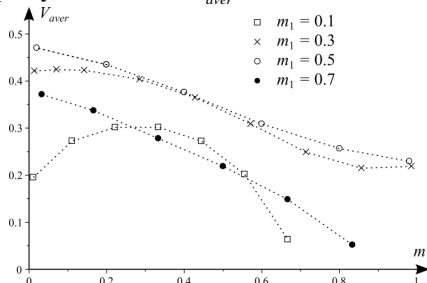


Рис. 6. Влияние соотношения масс звеньев на среднюю скорость робота

На рисунке 6 приведены зависимости скорости робота от соотношения масс звеньев $m = m_2 / (1 - m_1)$ при разных значениях массы первого звена. Видно, что отношение масс звеньев заметно влияет на величину V_{aver} . При малых массах первого звена зависимость скорости от m немонотонна, а при $m_1 \geq 0.5$ скорость монотонно убывает с ростом m . Максимальная скорость достигается в случае, когда вся масса системы практически равномерно распределена между первым и третьим звеном.

Таким образом, предложенный алгоритм управления обеспечивает продвижение робота вдоль выбранного направления.

Заключение. Построена математическая модель робота-змеи, управляемого одним внутренним маховиком, в предположении, что сила сухого трения в точках контакта с опорной плоскостью является анизотропной.

Предложен закон управления, который обеспечивает продвижение робота вдоль заданной прямой линии.

Исследовано влияние различных параметров системы на среднюю скорость движения робота. В частности, установлена немонотонная зависимость этой скорости от величины максимального управляющего момента и возбуждающей частоты, а также коэффициентов жесткости пружин между звеньями робота.

Список литературы

1. Черноусько Ф.Л. О движении твердого тела с подвижными внутренними массами // Известия Академии наук СССР. Механика твердого тела. – 1973. – №4. – С. 33-44.
2. Козлов В.В., Рамоданов С.М. О движении в идеальной жидкости тела с жесткой оболочкой и меняющейся геометрией масс // Доклады Академии наук. – 2002. – Т. 382, – №4. – С. 478-481.
3. Childress S., Spagnolie S. E., Tokieda T. A Bug on a Raft: Recoil Locomotion in a Viscous Fluid // J. Fluid Mechanics. – 2011. – Vol. 669. – P. 527-556.
4. Chernousko F.L. Locomotion of multibody robotic systems: dynamics and optimization // Theoretical and Applied Mechanics. – 2018. – Vol. 45. – №1. – P. 17-33.
5. Черноусько Ф.Л. Управление движением многозвенников на шероховатой плоскости // Тр. ИММ УрО РАН. – 2000. – Т. 6, № 1. – С. 277-287.

6. Kuleshov A.S. Further Development of the Mathematical Model of a Snakeboard // *Regular and Chaotic Dynamics*. – 2007. – Vol. 12. – №3. – P. 321-334.
7. Derammelaere S., Copot C., Haemers M., Verbelen F., Vervisch B., Ionescu C., Stockman K. Realtime Locomotion Control of a Snakeboard Robot Based on a Novel Model, Enabling Better Physical Insights // *European J. Control*. – 2019. – Vol. 45. – P. 57-64.
8. Yona T., Or Y. The Wheeled Three-Link Snake Model: Singularities in Nonholonomic Constraints and Stick–Slip Hybrid Dynamics Induced by Coulomb Friction // *Nonlinear Dynamics*. – 2019. – Vol. 95. – №3. – P. 2307-2324.
9. Bizyaev I.A., Borisov A.V., Mamaev I.S. Exotic Dynamics of Nonholonomic Roller Racer with Periodic Control // *Regular and Chaotic Dynamics*. – 2018. – Vol. 23. – №7. – P. 983-994.
10. Fedonyuk V., Tallapragada P. The Dynamics of a Chaplygin Sleigh with an Elastic Internal Rotor // *Regular and Chaotic Dynamics*. – 2019. – Vol. 24. – №1. – P. 114-126.
11. Pollard B., Tallapragada P. Passive Appendages Improve the Maneuverability of Fishlike Robots // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. – 2019. – Vol. 24. – №4. – P. 1586-1596.
12. Kelly S.D., Fairchild M.J., Hassing P.M., Tallapragada P. Proportional Heading Control for Planar Navigation: The Chaplygin Beanie and Fishlike Robotic Swimming // *2012 American Control Conference (ACC)*. IEEE. – 2012. – P. 4885-4890.
13. Bizyaev I.A., Borisov A.V., Mamaev I.S. Dynamics of a Chaplygin sleigh with an unbalanced rotor: regular and chaotic motions // *Nonlinear Dynamics*. – 2019. – Vol. 98, №3. – P. 2277-2291.
14. Borisov A.V., Kuznetsov S.P. Comparing Dynamics Initiated by an Attached Oscillating Particle for the Nonholonomic Model of a Chaplygin Sleigh and for a Model with Strong Transverse and Weak Longitudinal Viscous Friction Applied at a Fixed Point on the Body // *Regular and Chaotic Dynamics*. – 2018. – Vol. 23. – №7. – P. 803-820.
15. Transth A.A., Pettersen K.Y., Liljebäck P. A Survey on Snake Robot Modeling and Locomotion // *Robotica*. – 2009. – Vol. 27. – №7. – P. 999-1015.
16. Zmitrowicz A. Mathematical Descriptions of Anisotropic Friction // *Intern. J. Solids and Structures*. – 1989. – Vol. 25. – №8. – P. 837-862.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ ДЛЯ УХОДА МАГНУСА

Буданов В.М.

НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова

Ключевые слова: гироскоп, карданов подвес, метод последовательных приближений.

Аннотация. На основе авторского метода построения периодических решений предлагается анализ известного механического эффекта ухода уравновешенного гироскопа в кардановом подвесе вследствие нутационных колебаний.

Введение. В 1955 К. Магнус опубликовал работу с выводом формулы, ныне носящей его имя и объясняющей эффект ухода уравновешенного гироскопа в кардановом подвесе при возникновении нутационных колебаний. Вопрос математической обоснованности этой формулы и ее уточнения до сих пор остается предметом научных работ. Математическая постановка задачи, вывод формулы и некоторые современные результаты приведены в [1]. В [2] приводится уточнение с поправками более высокого порядка. В данной работе используется метод, предложенный в [3], идейно близкий к [4] и являющийся развитием метода последовательных приближений в применении к нелинейным системам дифференциальных уравнений.

Уравнения движения. Будем использовать уравнения свободных колебаний уравновешенного гироскопа в кардановом подвесе на неподвижном основании в форме, приведенной в монографии [2]

$$\begin{aligned}(A_0 - C_0 \sin^2 \beta) \dot{\alpha} + H \sin \beta &= L, \\ B_0 \ddot{\beta} + C_0 \dot{\alpha}^2 \sin \beta \cos \beta - H \dot{\alpha} \cos \beta &= 0.\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь α , β – углы наклона внешнего и внутреннего колец карданова подвеса; H , L – константы, представляющие кинетический момент ротора и проекцию вектора кинетического момента всей системы на одну из осей, а остальные коэффициенты являются комбинациями моментов инерции ротора (без индекса), внутреннего (с индексом «1») и внешнего (с индексом «2») колец карданова подвеса

$$A_0 = A + A_1 + A_2, \quad B_0 = A + B_1, \quad C_0 = A + A_1 - C_1, \quad (2)$$

Система (1) имеет стационарное решение $\sin \beta_0 = L/H \equiv l$, $\dot{\alpha} = 0$, при котором ротор неподвижен. Колебания в окрестности этого решения называются нутационными и возникают при соответствующих начальных условиях. В первом приближении эти колебания являются гармоническими, однако при более детальном рассмотрении они приводят к изменению положения внешнего кольца с малой постоянной скоростью, т.е. уходу гироскопа.

Рассмотрим уравнения в отклонениях x , y от стационарного решения $\dot{\alpha} = x$, $\beta = \beta_0 + y$. При этом тригонометрические функции могут быть выражены как $\sin \beta = \sqrt{1-l^2} \sin y + l \cos y$, $\cos \beta = \sqrt{1-l^2} \cos y - l \sin y$, и уравнения (1) приводятся к виду

$$[A_0 - C_0(\frac{1}{2} + l\sqrt{1-l^2} \sin 2y - \frac{1}{2}(1-2l^2)\cos 2y)]x + H(\sqrt{1-l^2} \sin y + l \cos y) = lH ;$$

$$B_0\ddot{y} + C_0x^2(l\sqrt{1-l^2}\cos 2y + \frac{1}{2}(1-2l^2)\sin 2y) - Hx(\sqrt{1-l^2}\cos y - l\sin y) = 0.$$

Выделим в этих уравнениях линейную часть, которую оставим слева, а остальные члены переместим вправо

$$\begin{aligned} &(A_0 - C_0l^2)x + H\sqrt{1-l^2}y = lH(1 - \cos y) + \\ &H\sqrt{1-l^2}(y - \sin y) + C_0x(l\sqrt{1-l^2}\sin 2y + (\frac{1}{2}-l^2)(1 - \cos 2y)); \\ &B_0\ddot{y} - H\sqrt{1-l^2}x = \\ &= -C_0x^2(l\sqrt{1-l^2}\cos 2y + \frac{1}{2}(1-2l^2)\sin 2y) - Hx(\sqrt{1-l^2}(1 - \cos y) + l\sin y). \end{aligned} \quad (3)$$

Система (3) получена из исходной системы (1) заменой переменных и пока ей полностью эквивалентна. Далее можно строить последовательные приближения для решения этой системы.

Первое приближение. Правые части системы (3) содержат как минимум члены второго порядка по x , y , поэтому в первом приближении полагаем правые части равными нулю и находим решение линейной системы

$$(A_0 - C_0l^2)x + H\sqrt{1-l^2}y = 0; \quad B_0\ddot{y} - H\sqrt{1-l^2}x = 0.$$

Поскольку эта система автономна, то фаза решения несущественна и можно искать решение с виде

$$x = a \cos \varphi; \quad y = b \cos \varphi; \quad \varphi = \omega t, \quad (4)$$

что приводит к следующей системе

$$\begin{aligned} &(A_0 - C_0l^2)a + H\sqrt{1-l^2}b = 0; \\ &-H\sqrt{1-l^2}a - B_0\omega^2b = 0. \end{aligned}$$

Поскольку эта система однородна, то нетривиальное решение существует только в случае, когда ее определитель равен нулю, что определяет частоту колебаний

$$\omega_0^2 = \frac{H^2(1-l^2)}{B_0(A_0 - C_0l^2)}. \quad (5)$$

При этом возникает связь между амплитудами колебаний

$$b = \frac{A_0 - C_0l^2}{H\sqrt{1-l^2}}a. \quad (6)$$

Таким образом, в первом приближении получаем гармонические колебания с частотой ω_0 с произвольной амплитудой a колебаний по угловой скорости внешнего кольца и связанной с ней амплитудой колебаний внутреннего кольца.

Второе приближение. В правой части системы (3) сохраняем только члены второго порядка малости по искомым переменным, а также делаем замену независимой переменной $\tau = \omega_0 t$

$$\begin{aligned} &(A_0 - C_0l^2)x + H\sqrt{1-l^2}y = \frac{1}{2}lHy^2 + 2C_0l\sqrt{1-l^2}xy \equiv R_1; \\ &B_0\omega_0^2\ddot{y} - H\sqrt{1-l^2}x = -C_0l\sqrt{1-l^2}x^2 - HLxy \equiv R_2. \end{aligned} \quad (7)$$

В правые части подставляем первое приближение (4), (6)

$$R_1 = -\frac{A_0 - C_0 l^2}{4H(1-l^2)} l(-A_0 + 4C_0 - 3C_0 l^2) a^2 (1 + \cos 2\varphi);$$

$$R_2 = \frac{A_0 - C_0}{2\sqrt{1-l^2}} l a^2 (1 + \cos 2\varphi).$$

Видим, что в правой части (7) возникли постоянные составляющие и вторая гармоника. Из второго уравнения находим постоянную составляющую для x

$$x_0 = \frac{C_0 - A_0}{2H(1-l^2)} l a^2.$$

Последнее соотношение с учетом (2) приводится к классическому виду формулы Магнуса [1]

$$x_0 = -\frac{C_1 + A_2}{2H(1-l^2)} l a^2. \quad (8)$$

После этого можно определить постоянную составляющую по второй координате

$$y_0 = \frac{3}{4} \frac{A_0 - C_0 l^2}{H^2 (1-l^2)^{3/2}} l (A_0 - 2C_0 + C_0 l^2) a^2.$$

Также для системы (7) нетрудно найти частное решение для вторых гармоник. Соответствующие коэффициенты выпишем без промежуточных выкладок.

$$a_1 = \frac{A_0 - 3C_0 + 2C_0 l^2}{2H(1-l^2)} l a^2; \quad b_1 = -\frac{(A_0 - C_0 l^2)(A_0 - 2C_0 + C_0 l^2)}{4H^2 (1-l^2)^{3/2}}.$$

Таким образом, решение второго приближения имеет вид

$$x = a \cos \varphi + x_0 + a_1 \cos 2\varphi; \quad y = b \cos \varphi + y_0 + b_1 \cos 2\varphi.$$

Все коэффициенты этого решения и частота найдены выше.

Заключение. Отметим, что здесь не только получена формула Магнуса, но и построено во втором приближении полное решение для обеих искомым переменных. С точностью до величин второго порядка малости оно удовлетворяет уравнениям движения рассматриваемой механической системы, поскольку добавки второго порядка при подстановке в правую часть (7) дадут только члены более высокого порядка.

Работа выполнена при поддержке научно-образовательной школы МГУ «Фундаментальные и прикладные исследования космоса».

Список литературы

1. Ишлинский А.Ю., Борзов В.И., Степаненко Н.П., Тихомиров В.В. Лекции по теории гироскопов. – М.: МАКС Пресс, 2013. – 296 с.
2. Журавлев В.Ф., Климов Д.М. Прикладные методы в теории колебаний. – М.: Наука, 1988. – 328 с.
3. Буданов В.М. Метод неопределенных частот // Фундаментальная и прикладная математика. – 2018. – Т. 22, Вып. 2. – С. 59-71.
4. Малкин И.Г. Методы Ляпунова и Пуанкаре в теории нелинейных колебаний. – Изд. 2-е. – М.: Едит. УРСС, 2004. – 248 с.