

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК



СЕРИЯ “НАУЧНО-БИОГРАФИЧЕСКАЯ ЛИТЕРАТУРА”

Основана в 1959 г.

РЕДКОЛЛЕГИЯ СЕРИИ  
И ИСТОРИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ КОМИССИЯ  
ИНСТИТУТА ИСТОРИИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ И ТЕХНИКИ РАН  
ПО РАЗРАБОТКЕ НАУЧНЫХ БИОГРАФИЙ  
ДЕЯТЕЛЕЙ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ И ТЕХНИКИ

А.Л. Янин (председатель), *Э.Н. Мирзоян* (зам. председателя),  
*В.М. Орел* (зам. председателя), *З.К. Соколовская* (ученый секретарь),  
*В.П. Борисов, В.П. Визгин, В.Л. Гвоздецкий, А.А. Гуриштейн,*  
*С.С. Демидов, Г.М. Идлис, С.С. Илизаров, Э.И. Колчинский,*  
*В.Н. Краснов, В.И. Кузнецов, Н.К. Ламан, Б.В. Левшин,*  
*К.В. Манойленко, А.В. Постников, В.Н. Сокольский,*  
*Ю.И. Соловьев, Ю.Я. Соловьев, М.Г. Ярошевский*

*А. А. Ким*  
*И. А. Тюлина*

**Борис Владимирович**  
**БУЛГАКОВ**

**1900 - 1952**

Ответственный редактор  
доктор физико-математических наук  
Н. А. ПАРУСНИКОВ



---

МОСКВА  
«НАУКА»  
2000

УДК 531(929) Б.В. Булгаков  
ББК 22.2 г  
К 40

Рецензенты:

доктор физико-математических наук *Е.А. Девянин*,  
кандидат физико-математических наук *В.Н. Чиненова*

**Ким А.А., Тюлина И.А.**

Борис Владимирович Булгаков. 1900–1952. – М.: Наука, 2000. – 85 с., ил. – (Научно-биографическая литература)  
ISBN 5-02-002481-3

Эта книга – первая научная биография выдающегося отечественного математика и механика, чл.-корр. АН СССР Бориса Владимировича Булгакова. Весьма незначительные сведения об этом ученом удалось значительно пополнить при помощи библиографических, устных, архивных и других материалов. Авторы получили материалы, относящиеся к неизвестным, ранее засекреченным изобретениям ученого. Работы Б.В. Булгакова являются неотъемлемой частью мирового научного наследия по теории гироскопических устройств и теории колебаний.

Для всех интересующихся развитием отечественной науки.

ТП-2000-I-204

ISBN 5-02-002481-3

© Издательство “Наука”, 2000

© Российская академия наук и издательство “Наука”, серия “Научно-биографическая литература” (разработка, оформление), 1959 (год основания), 2000

## Предисловие

Борис Владимирович Булгаков был ровесником уходящего века: он родился 6 августа 1900 г. В крупных достижениях науки и техники XX века есть и его значительный вклад.

Блестяще окончив физико-математический факультет Московского государственного университета, будучи искусным математиком, Булгаков выбрал специальность прикладной механики, так как его с юности интересовала техника. Его главные труды посвящены теории гироскопов, инерциальной навигации, теории колебаний и управления. К сожалению, он прожил недолго – всего пятьдесят два года.

К столетию со дня рождения Б.В. Булгакова на механико-математическом факультете Московского университета о нем собран обширный архивный и библиографический материал, изучены его труды, записаны воспоминания его друга и сверстника В.Н. Щелкачева.

Авторы приносят большую благодарность за помощь в работе сотрудникам кафедры прикладной механики и управления: заведующему кафедрой академику А.Ю. Ишлинскому, профессорам В.В. Александрову, Е.А. Девянину, Н.А. Парусникову, а также известному ученому в области гидродинамики профессору В.Н. Щелкачеву.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 99-07-90157.

## К читателю

6 августа 2000 г. – столетие со дня рождения замечательного отечественного ученого, механика, члена-корреспондента АН СССР – Бориса Владимировича Булгакова (1900–1952).

Известный в стране и за ее пределами теоретик, талантливый педагог Борис Владимирович десять лет возглавлял кафедру прикладной механики механико-математического факультета Московского университета, будучи одним из ее организаторов. Он принимал активное участие, часто научное руководство, в научно-исследовательских поисках других организаций, в том числе в учреждениях оборонного значения: по совместительству он преподавал в МВТУ (ныне МГТУ) им. Н.Э. Баумана, где заведовал кафедрой авиационных приборов.

Каждая из его публикаций, начиная со студенческих лет, представляет собой оригинальное решение конкретной технической проблемы. Он опубликовал более тридцати работ и две монографии, выдержавшие несколько изданий и ставшие классическими: “Прикладная теория гироскопов” и “Колебания”.

В архивах обнаружены указания о двух его заявках на изобретение навигационных приборов, поданных незадолго до войны. Авторам очерка удалось найти и достать копии с двух ныне рассекреченных заявок Б.В. Булгакова, они приведены в тексте.

Научные идеи Б.В. Булгакова были глубоко изучены, по достоинству оценены, разработаны и до сих пор развиваются в трудах его учеников и последователей, прежде всего в школе прикладной механики и управления механико-математического факультета Московского университета.

Наибольшее внимание в работе уделено освещению важнейших научных результатов исследований Б.В. Булгакова, описанию его педагогической и административной работы.

К столетию со дня рождения Б.В. Булгакова на механико-математическом факультете собран архивный и библиографический материал о его деятельности. Кроме того, в эту копилку добавлены интересные уникальные сведения, почерпнутые авторами из бесед и рассказов Владимира Николаевича Щелкачева – однокурсника и университетского друга Бориса Владимировича. Это касается мало освещенного периода развития высшей школы в 1920–1930-е годы. Так составлено жизнеописание богато одаренного, но чрезвычайно скромного человека – Бориса Владимировича Булгакова.

*А.Ю. Ишлинский*

## Жизнь и трудовая деятельность

Недолгая, но содержательная жизнь Бориса Владимировича Булгакова совпала с первой половиной XX века. Ему пришлось пережить такие нелегкие испытания как Октябрьская революция и две мировые войны. Эти события коренным образом изменили все сферы деятельности мирового сообщества.

Годы учебы Бориса Владимировича на физико-математическом факультете Московского университета пришлось на 20-е годы. Это время, когда старые формы обучения были признаны негодными, а новые приходилось искать путем проб и ошибок. Московский университет, как один из ведущих вузов страны, в первую очередь подвергся перестройке. Мы постараемся передать атмосферу, царившую в нем после Октябрьской революции 1917 г.



Здание Московского университета на Моховой улице

## 1.1. Обстановка в Московском университете в начале XX века

Первые советские декреты, касающиеся изменения системы просвещения и образования, широко открывали двери высшей школы и университетов рабоче-крестьянской молодежи.

Отдел высших учебных заведений Наркомпроса возглавлял профессор физико-математического факультета Московского университета астроном П.К. Штернберг [61]. Это был убежденный и активный боец за идеалы социалистической революции, подпольщик, участник уличных боев.

После победы революции в условиях разрухи, иностранной интервенции, гражданской войны, саботажа немалой части интеллигенции требовалось проводить реформу высшей школы, допустив к обучению широкие слои молодежи.

8 июня 1918 г. было созвано Первое Всероссийское совещание представителей высших учебных заведений. Накануне совещания организаторы во главе с А.В. Луначарским и П.К. Штернбергом обсудили и наметили важнейшие тезисы документа – “Положения о вузах”. Это происходило в доме, где теперь гостиница “Метрополь”.

Для уничтожения корпоративности и элитарности высшей школы предполагалось, что руководящим органом каждого вуза и университета будет народный совет, куда помимо представителей профессуры войдут представители студенчества, Наркомпроса, некоторых советских учреждений, а также представители трудящихся. Университеты нацеливались в своей деятельности на три главных направления: учебное, научное и просветительское, т.е. культурную работу вне университета, особенно на предприятиях. Предлагалось также (и это было вскоре реализовано) отменить формальный образовательный ценз, т.е. принимать в университет без аттестата, чтобы облегчить доступ многим жаждущим знаний молодым людям.

При открытии 8 июня Всероссийского совещания в Коммунистической аудитории Московского университета создалась обстановка явно-го недоброжелательства со стороны значительной части профессуры. Выдвигались различные предлоги для переноса заседания.

– Вчера поблизости от университета весь день шла стрельба, не перенести ли заседание?

На это П.К. Штернберг рассмеялся и бодрым тоном ответил:

– Если и сегодня начнется стрельба, мы возьмем винтовки и пойдем на улицу, а если это не понадобится, то почему бы нам не заняться делами высшей школы?

Проект реорганизации вузов и университетов был встречен значительной частью профессуры враждебно: казалось весьма сомнительным суметь сохранить высокий уровень учебно-научной работы, если с улицы хлынут в аудитории пусть даже любознательные, но невежды. Однако некоторая часть профессоров и преподавателей приветствовала реформу, заметив в ней черты программы устройства университетов М.В. Ломоносова. Тогда он, кроме прочего, добивался обучения для

всех сословий, в том числе крестьян. Комиссию для доработки деталей проекта удалось сколотить с большим трудом.

Декрет Советского правительства “О правилах приема в высшие учебные заведения” был доработан и подписан 2 августа 1918 г. Отныне юношам и девушкам, достигшим 16 лет, было разрешено поступать в высшие школы и университеты без аттестата. Отменялась плата за учебу. Большое значение придавалось классовому принципу отбора поступающих: преимущественное право поступления в вуз и университет предоставлялось выходцам из пролетариата и беднейшего крестьянства. Государство обеспечивало эту часть студенчества стипендиями и общежитиями. Стали открываться рабочие факультеты, как бы подготовительный цикл необходимых знаний (в Московском университете рабфак открылся в 1919 г.). Желающих учиться было так много, что мест на рабфаках, а тем более в общежитиях не хватало. Реформа продолжала вызывать разнотолки и острую полемику.

Потребовался некоторый период (более десяти лет), состоявший из череды проб и ошибок, перегибов и находок. Так продолжалось напряженное искание нового способа обучения и образования, начиная со школ и техникумов до университетов. Новый состав студентов, естественно, существенно влиял на методы преподавания. Изменения и пересмотры учебных планов и программ не прекращались. Лекционному методу обучения студентов отдавалось все меньше внимания: это считалось архаичным. Пытались сделать акцент на самостоятельной работе учащегося с книгой; переносили основное время учебы в лаборатории, в выходы на предприятия. Но преподаватели все более оставались “не у дел”: как можно было контролировать результаты самостоятельного чтения? Ведь ни зачетов, ни переводных экзаменов не было.

В конце 1920 – начале 1921 гг. на физико-математическом факультете Московского университета числилось 11 тыс. студентов. Количество фактически занимающихся было много меньше: по правилам того времени посещение лекций было свободным; многие студенты зарабатывали на жизнь [54].

Передовые ученые Московского университета принимали активное участие в организации новых научных учреждений. В работе научной комиссии Научно-технического отдела ВСНХ принимали участие Н.Е. Жуковский, А.И. Некрасов, Н.Д. Зелинский, А.А. Эйхенвальд, С.А. Чаплыгин и многие естественники. Кипучая деятельность Жуковского, его энергичные усилия для создания мощной лабораторно-производственной базы самолетостроения в России нашли поддержку в правительстве: в тяжелых условиях интервенции, затем гражданской войны, сильнейшего спада производства и хозяйственной деятельности 1 декабря 1918 г. было принято решение правительства об организации Центрального аэрогидродинамического института – ЦАГИ, председателем Коллегии которого был назначен Н.Е. Жуковский. Были изысканы немалые средства для строительства научно-технического центра, который через несколько лет был сравним с крупнейшими мировыми центрами авиастроения и аэродинамики. В те же годы Жуковский



Сергей Алексеевич Чаплыгин  
(1869–1942)

был назначен ректором Института инженеров Красного воздушного флота, после смерти ученого преобразованного в Военно-воздушную инженерную академию им. Н.Е. Жуковского. Уйдя из университета по политическим соображениям в 1911 г., когда университет из протеста покинули десятки выдающихся прогрессивных ученых, С.А. Чаплыгин – ближайший ученик и последователь Жуковского, вернулся в Московский университет после Октябрьской революции. Взяв большую часть педагогической работы по механике в университете, Чаплыгин был правой рукой Жуковского в деле создания ЦАГИ. У Чаплыгина еще ранее обнаружили незаурядные административно-хозяйственные способности: подрядчиков он “насквозь” видел. Кроме того, он умел “изворачиваться” в обращении с финансами. Строительство продвигалось быстро.

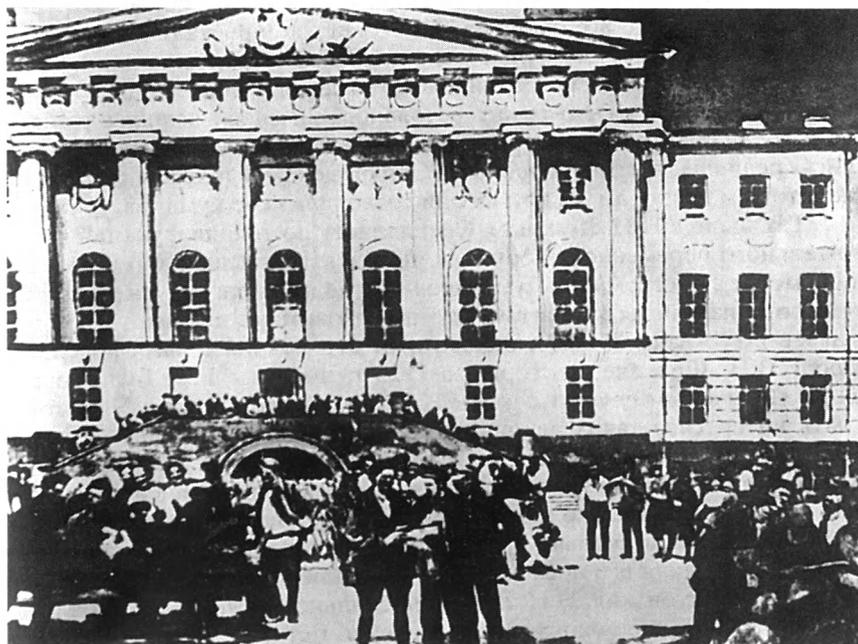
После смерти Н.Е. Жуковского, последовавшей 17 марта 1921 г., его пост руководителя ЦАГИ перешел к С.А. Чаплыгину; все более активным его помощником становился А.И. Некрасов. Из-за огромной

ответственности и занятости в ЦАГИ, отчасти из-за неурядиц в системе высшего образования, Чаплыгин был вынужден в 1924 г. покинуть университет.

Связь Московского университета с работой ЦАГИ все более укреплялась и поощрялась. К преподаванию в университете все шире привлекались сотрудники ЦАГИ, например, профессора: В.П. Ветчинкин, А.Н. Журавченко, К.К. Баулин, позже Ф.И. Франкль, С.А. Христианович и др. Программы физико-математического факультета по многим курсам больше походили на программы высших технических заведений, например, Московского авиационного института, Военно-воздушной инженерной академии и др.

Демократическая молодежь – тысячи ребят, о которых говаривали “от станка или от сохи” – не вся отступала перед трудностями высшей школы. Многие из них становились настоящими квалифицированными специалистами, некоторые – доцентами и профессорами в различных вузах Москвы и страны. В Московском университете можно привести такие примеры из механиков: доценты Н.В. Еремеев, пришедший учиться из Красной армии, доцент Г.И. Двухшерстов; профессора Х.А. Рахматулин, С.В. Бахвалов, Н.А. Слёзкин, А.А. Космодемьянский, П.М. Огибалов – это далеко не все.

Охарактеризуем в нескольких чертах обстановку на физмате Московского университета в 1917–1930-е гг. Студенческие массы (мы уже указывали, что их числились тысячи) были чрезвычайно разнородны-



Студенчество Московского университета в 1920-х годах



Владимир Николаевич Щелкачев – друг и однокурсник Б.В. Булгакова

ми, хотя и в то время на физмат поступали люди, не боявшиеся трудностей. Среди них не все были москвичи: многие приехали из глубинки, снимали углы или жили у родственников. Эти студенты не пропускали лекций, семинаров, диспутов; они часто заглядывали на лекции “чужих” потоков, если их там что-то интересовало. Они много читали, в том числе и специальной литературы. Зарабатывали они, если такие попадались среди них, частными уроками. Эти студенты выражали симпатии к некоторым лекторам, из других они сотворяли себе кумиров.

Так было с Н.Н. Лузиным. Специалисту по теории функций действительного переменного поручили читать курс высшей алгебры. Едва просмотрев программку, Лузин шел без подготовки в аудиторию. Он честно признавался студентам, что не готовится к лекциям, чтобы не давать им “жвачку”. Впечатлениями от его лекций с нами поделился проф. В.Н. Щелкачев, который в 1923 г. вместе с Б.В. Булгаковым, Н.Н. Поляховым слушал лекции Н.Н. Лузина по алгебре. Что могло быть интереснее таких лекций?! “Таких лекций и докладов, которые читал Лузин, никогда я больше не слышал”, – замечал В.Н. Щелкачев. Он считал, что Лузин учил студентов мыслить: искал решение, рассуждал вслух, иногда шел по ложному пути, иногда после паузы мог попросить зачеркнуть несколько страниц изложенного. Студенты тянулись к Лузину: окружали его после лекций, задавали вопросы, провожали его до Арбата, где он жил. Н.Н. Лузина нисколько не тяготило такое шумное многочисленное окружение молодежи. Естественно, что среди поклонников Н.Н. Лузина было больше математиков, их было десятка два. Школа Лузина была прозвана его учениками “Лузитанией”. Это

было весьма любопытное неформальное сообщество учащихся и профессора<sup>1</sup>. Последний “вошел в роль” не только математического лидера, но и своеобразного повелителя правил игры. Он мог три лекции подряд биться над доказательством теоремы (и все лузитанцы потели и сопели, сопереживая лидеру), а разрядить обстановку некоей мистификацией. Например, взяв длинную задумчивую паузу, вдруг заявить: “Проблема континуума решена!” На доске появлялась лаконичная невразумительная формула. Аудитория замирала. Несколько минут – тишина, потом шум: “Кто? Как?” [62, с. 68].

Однажды ждали на лекции Лузина более 20 минут – не пришел. Кто-то, вероятно П.С. Александров, предложил пойти к Лузину домой. Дверь открыла супруга Лузина и в тоне “игры” сообщила: “Командора похитила девушка – они в Малом театре”. Удивление, возмущение лузитанок, которые были влюблены в учителя. Оставили “грозное” письмо с порицанием и поспешили в театр. Купив в складчину два билета, прошли все двадцать по принципу “вошли двое, один вышел (с двумя билетами)”. В антракте вывели Лузина в фойе и начали его качать в ритм песни: “Наш бог – Лебег, кумир – интеграл, рамки жизни сузим, так приказал наш Командор Лузин” [62, с. 69].

Главное, что Н.Н. Лузин непринужденно учил своих почитателей целеустремленному подходу к жизни, творчеству. Даже коллективные походы на концерты, в театры, споры на самые различные темы были незабываемы и очень дороги лузитанцам. Кроме многих математиков (П.С. Александров, М.Я. Суслин, Д.Е. Меньшов, А.Я. Хинчин, М.А. Лаврентьев, позже П.С. Урысон, А.Н. Колмогоров, В.В. Немыцкий, Н.К. Бари, Л.А. Люстерник, Ю.А. Рожанская, П.С. Новиков, Л.К. Келдыш и другие) в это сообщество входили и механики, например, В.Н. Щелкачев, Н.Н. Поляхов, приезжая из Саратова, В.В. Голубев, И.И. Привалов. Иногда к ним присоединялся Б.В. Булгаков, по своему складу более замкнутый и уединенный.

На физико-математическом факультете работало в тот период много выдающихся ученых с мировым именем. Из математиков можно назвать Л.К. Лахтина, читавшего чрезвычайно понятно, но менее известного своими математическими результатами, чем Н.Н. Лузин, его учителя Д.Ф. Егорова, А.Я. Хинчина, В.Ф. Кагана, С.С. Бюшгенса, С.П. Финикова, В.В. Степанова.

Из учеников Н.Е. Жуковского некоторые работали в Московском университете: до 1924 г. вел теоретическую механику и многие спецкурсы С.А. Чаплыгин, А.И. Некрасов (гидромеханику с 1918 г. и теоретическую механику позже), И.В. Станкевич (спецкурсы), А.И. Морошкин, в основном экспериментатор по аэродинамике. Они были профессорами, но в 1920–1930 гг. предпочитали называть всех преподавателями, а вместе с кафедрами были образованы “предметные комиссии”, куда входили и представители студенчества.

---

<sup>1</sup> В соответствии с эпохой некоторые из учеников Н.Н. Лузина (Л.А. Люстерник, А.Я. Хинчин, П.С. Александров, А.О. Гельфонд) в 1934–1936 гг. официально заявляли, что Н.Н. Лузин – фигура враждебная.

Из беседы с В.Н. Щелкачевым приведем воспоминания еще об одном любимом ученике Н.Е. Жуковского – Н.Н. Бухгольце. Это был большой эрудит, блестящий лектор, который мог сделать содержательные отступления на лекциях по механике в область философии, логики, истории науки. Он прекрасно знал специальную и художественную литературу, имел богатейшую библиотеку, свободно владел несколькими иностранными языками. Лекции по различным проблемам механики настолько увлекли математика Владимира Щелкачева, что он на старших курсах стал механиком, окончив как механик. Бухголец читал спецкурсы по механике сплошной среды, в том числе, по теории упругости, гидродинамике. Он был знатоком новейшей тогда теории относительности.

Студенты В. Щелкачев, Н. Поляхов, Б. Булгаков и другие уговорили Н.Н. Бухгольца в будущем осеннем семестре прочитать им факультативный курс по теории относительности. Он согласился. Приехали молодые люди после летних каникул, заходят в гости к Николаю Николаевичу, а его жена Нина Александровна говорит:

– Ну, сейчас вам достанется!

– Почему?

– А вы знаете, какие неприятности доставили Николаю Николаевичу?

– Какие?

– На него напустился Аркадий Клементьевич Тимирязев: контрреволюцию разводите, теорию относительности студентам собираетесь читать!

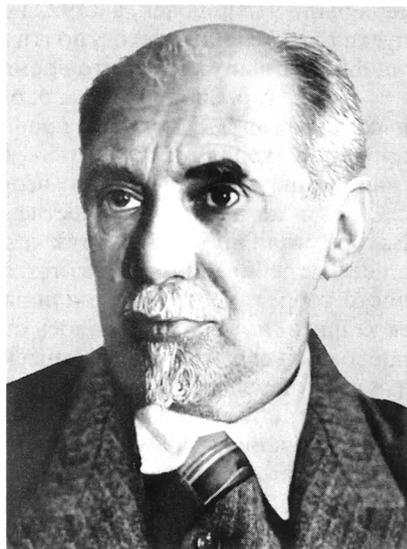
А.К. Тимирязев – известный физик, сын выдающегося биолога К.А. Тимирязева, был в это время деканом физико-математического факультета. Факультатив не состоялся.

Н.Н. Бухголец давал самые разнообразные темы для докладов и рефератов. В.Н. Щелкачев взял тему по внешней баллистике. Позже студент Л.И. Седов (будущий академик) делал у Бухгольца доклад о двойных звездах. В качестве темы дипломной работы Бухголец предложил В.Н. Щелкачеву провести анализ различных вариационных принципов механики. В зрелом возрасте, будучи профессором, лауреатом Государственной премии СССР, В.Н. Щелкачев не потерял интерес к этой теме. Его научное исследование “Вариационные принципы механики” выдержало несколько изданий; в последний раз было опубликовано в 1996 г. отдельной книгой вместе с еще одной его работой: “Проблемы педагогики высшей школы”. Отметим, сколь велико было влияние замечательного лектора – Н.Н. Бухгольца: и тема дипломной работы стала предметом разработки на долгие десятилетия, и проблемы педагогической деятельности стали для его ученика также делом всей жизни. Отметим, что основной областью научно-технической и организационной деятельности В.Н. Щелкачева стали механика нефти и газа, а также проблемы их добычи.

О Станкевиче Иване Вячеславовиче студент Щелкачев вынес хорошее впечатление: он бывал в Париже, был знаком с А. Пуанкаре, хорошо знал отечественную и зарубежную специальную литературу, его на-

учный интерес относился к области методов интегрирования дифференциальных уравнений динамики.

Леонид Самойлович Лейбензон – ученик и последователь Н.Е. Жуковского по Московскому университету и по Московскому высшему техническому училищу. Он проектировал аэродинамическую трубу для Жуковского, когда оба в начале века работали в Аэродинамическом институте в Кучино. Незаурядный математик, Лейбензон был механиком широкого профиля, специалистом в теории упругости, имеющим здесь оригинальные труды; но самое важное дело его жизни – он создал школу в области нефтяного дела. Он явился одним из организаторов Государственного исследовательского нефтяного института (ГИНИ). В Московском университете Л.С. Лейбензон преподавал до 1911 г.; он покинул университет, когда многие прогрессивные профессора университета из протеста ушли (история Кассо).



Леонид Самуилович  
Лейбензон  
(1879–1951)

В 1920-х гг. Лейбензон читал в Московском университете курс сопротивления материалов, а после 1933 г. возглавлял кафедру гидромеханики.

Мы подробно останавливаемся на воспоминаниях В.Н. Щелкачева о физмате 1920-х годов, так как он дружил с Б.В. Булгаковым и донес до нас живые сведения о событиях тех лет. Его объективные зарисовки по памяти чрезвычайно важны для нас.

Потребность ЦАГИ в хорошо подготовленных специалистах постепенно влияла на усиление инженеризации части студентов физико-математического факультета Московского университета. Университет расширял и укреплял связи с рабочими коллективами; к 1928 г. было установлено шефство над 20 предприятиями Москвы, в свою очередь предприятия взяли шефство над факультетами университета. Физико-математический факультет сотрудничал с заводом “Динамо”, “Шарикоподшипником”; с заводом “Каучук” были связаны химики, также входившие в состав физико-математического факультета. Устанавливались связи и взаимодействие с войсками Московского гарнизона, со строительными новыми районами Москвы; налаживалась шефская работа в деревне.

К концу 1920-х гг. усилилась борьба за учебную дисциплину; было введено обязательное посещение лекций и всех занятий, объявлена война второгодничеству и многогодничеству (уже упоминалось, что тысячи “вечных студентов” числились на различных факультетах). Например, в 1921/22 учебном году выпускников всего Московского универси-

тета было 915 человек, а с 1922 по 1925 г. университет подготовил и выпустил 5287 специалистов, почти половину – на медицинском факультете; физмат выпустил за это время 889 человек [54, с. 102].

В 1929 г. была проведена реорганизация так называемых “предметных комиссий”, куда кроме профессоров и преподавателей по данному профилю входили и студенты – для взаимопонимания. Были вновь организованы кафедры как во всех высших школах за рубежом, чтобы сделать акцент не на количестве выпускников, а на качестве их знаний. Вскоре стали проявляться так называемые “левацкие перегибы”, сводящиеся к требованиям сократить, а лучше исключить из учебных планов чисто теоретические дисциплины типа чистой математики, теоретической физики. Явно намечалось стремление “втузировать” университет, превратить физико-математический факультет в индустриальный, создав на этой основе самостоятельный институт. Раздавались голоса в печати и с трибун о “ненужности” университетов, об их “устарелости”, дело шло к ликвидации университетского образования.

Мы расскажем как удалось преодолеть это сильное стремление к закрытию “устарелых” и “реакционных” университетов. Пока же напомним об одном восторжествовавшем довольно необычном для высшей школы методе отчетности о знаниях учащихся. Этот метод восторжествовал к 1930-м гг., когда стали “подтягивать гайки”, и по закону о действии и противодействии выработался упомянутый метод. Он получил название бригадно-лабораторного метода. Когда учащихся зачислено очень много, а администрация требует, чтобы все посещали все, что нужно, то в лабораториях становится тесно. Учесть индивидуально, кто и чему научился, трудно. Группы разбивались на бригады с бригадиром во главе. Последний, как правило, был или более способным или пришедшим с аналогичного производства. На зачете преподаватель задавал вопрос всей бригаде; кто знал ответ, тот поднимал руку и отвечал. В случае правильного ответа он получал баллы в пользу всей бригады. Чаще всего “отдувался” за бригаду бригадир, и в этом случае все могли получить зачет. Упор делался на лабораторные занятия, умение поставить и проанализировать результаты опыта.

Для математиков речь шла еще и о знании теоретического материала и умении решать задачи. После ряда письменных контрольных проводился “бригадный” зачет. Однако математики, да и механики тоже, отступали от выработанных правил и находили способы “прощупать” знания студентов посерьезнее. Наиболее неподготовленная часть студентов могла обжаловать такие нестандартные приемы преподавателей, но после реорганизации в кафедры “предметных комиссий” (где был всегда “свой друг” студент) такие конфликтные ситуации стали разрешаться в пользу преподавателей с ужесточением их требований. Вот тогда-то и стали все громче раздаваться голоса об “устарелости” университетского образования, о необходимости уничтожения теоретически содержательных курсов.

В 1920-х гг. многотиражка Московского университета часто меняла свое название, но довольно долго называлась “Первый университет”. В этой газете в 1929 г. появлялись статьи о “ненужности и об устарело-

сти” университетского образования. В ответ появились гневные статьи против реорганизации университета в направлении его ликвидации. Выдвигались иные предложения укрепления научной и учебной работы университета. Дирекция (так в эти годы назывался ректорат) заняла правильную позицию и дала отпор “левацким” выступлениям, направив в Наркомпрос РСФСР в конце 1930 г. протест против вредных предложений ликвидировать биологический и физико-математический факультеты. Упразднение физматов в университетах под флагом передачи их функций вузам распылило бы кадры крупных ученых, собранных в школы, семинары физико-математических факультетов; такое распыление научных школ существенно снизило бы теоретический уровень фундаментальных наук. Критика бригадно-лабораторного метода с его уродливыми формами коллективных зачетов, с отведением более половины учебного времени на производственную практику раздавалась все громче; в этом отношении среди вузов и университетов страны голос ученых Московского университета звучал сильнее и убедительнее других.

Осенью 1932 г. последовало решительное вмешательство руководящих органов государства: постановление ЦИК СССР от 19 сентября 1932 г. “Об учебных программах и режиме в высшей школе и техникумах” ознаменовало собой поворотный момент в истории нашей высшей школы. Отмечалось неудовлетворительное качество подготовки специалистов. Ставилась задача усиления роли теоретического образования не только в университетах, но и в вузах. Существенно перерабатывались учебные планы; основным методом преподавания были признаны лекции специалистов, коллективные зачеты были запрещены. Вводились вступительные и семестровые экзамены, дипломные работы. Вмешательство студенчества в работы кафедр, деканатов и дирекции полностью исключалось. Введенные ранее аспирантуры университетов получали четкую регламентацию. Восстановились защиты кандидатских и докторских диссертаций. Многие научные работники и квалифицированные преподаватели университетов и вузов по совокупности трудов вполне заслуженно получали ученые степени кандидатов и докторов наук.

К весне 1933 г. в Московском университете было шесть факультетов: механико-математический, физический, химический, биологический, почвенно-географический, рабочий факультет и заочный сектор. При некоторых факультетах были Научно-исследовательские институты для подготовки через аспирантуру будущих преподавателей и профессоров, а также научных работников.

Первым деканом механико-математического факультета был назначен сотрудник С.А. Чаплыгина по ЦАГИ профессор В.В. Голубев. Он же вошел в состав членов Научно-исследовательского института математики и механики, созданного еще в 1922 г. и возглавляемого после ухода С.А. Чаплыгина из университета в 1924 г. Л.С. Лейбензоном.

На механико-математическом факультете было три отделения: математики, механики и астрономии. Были организованы четыре кафедры, в основных чертах предугаданные Н.Е. Жуковским до 1919 г.

Теперь, с 1933 г., они получили статус кафедр: теоретической механики – заведующий член-корр. АН СССР А.И. Некрасов, гидромеханики – заведовал проф. Л.С. Лейбензон, аэродинамики – заведовал проф. В.В. Голубев, теории упругости – заведовал проф. Н.Н. Бухгольц.

## 1.2. Юношеские годы

Б.В. Булгаков родился 6 августа 1900 г. в Москве. Его отец умер очень рано и мать вторично вышла замуж. Отчим Бориса Владимировича – А.С. Постников – был врачом-педиатром, а мать Софья Ивановна работала в школе [37, л. 1]. Уже в ранней юности мальчик начал проявлять интерес к исследованию явлений природы, различных механических явлений. Его мать, практически одна воспитывавшая сына, поделилась воспоминаниями об одном эпизоде из его жизни. Однажды, когда Борису было еще 12 лет, они плыли на пассажирском корабле по Черному морю. Во время шторма мальчик не растерялся, а взял часы и, стоя на палубе, измерял период качаний корабля.

В период с 1908 г. по 1918 г. Булгаков учился в 9-й московской гимназии [37, л. 7]. С осени 1918 г. по август 1920 г. Борис Владимирович служил в Главном Комитете государственных сооружений делопроизводителем со специальными полномочиями [37, л. 1], а затем до ноября 1924 г. был помощником начальника Отдела в Штабе Красной Армии [37, л. 1]. Впоследствии он был снят с воинского учета, так как был болен туберкулезом легких. В Москве Борис Владимирович жил в д. 4, кв. 5 по Спиридоньевской улице [37, л. 2]. Он увлекался древнегреческим языком, знал латинский, французский, английский, немецкий, итальянский [37, л. 2], особую страсть питал к музыке. По воспоминаниям Владимира Николаевича Щелкачева, его студенческого друга, они часто устраивали совместные концерты, на которых присутствовали мать и отчим Бориса Владимировича (Булгаков играл на рояле, а Щелкачев – на виолончели). Булгаков даже написал пьесу для виолончели с аккомпанементом на фортепиано, которую они впоследствии разучили и исполняли вместе.

“Дом, в котором жил Булгаков с семьей”, – рассказывал В.Н. Щелкачев, – “вплотную примыкал к особняку Максима Горького, только вход был со двора через арку направо, по черной лестнице на третий этаж. У Бориса Владимировича была маленькая комнатка без окна, а рядом была комната с пианино, там же был обеденный стол. Была еще третья комната: кабинет и спальня. Мать Бориса – Софья Ивановна – была фанатичной любительницей музыки. Когда бы я ни выбрался в консерваторию, я ее всегда там встречал, она была там постоянной посетительницей. Мы с Борисом играли дуэтом пьесы Чайковского, Шопена, Мусоргского, Моцарта, Балакирева. Борис Владимирович сочинил произведение для виолончели с фортепиано. У меня была где-то партитура. Это была кантиленная красивая мелодия”.

В 1923 г. Б.В. Булгаков поступил на математическое отделение физико-математического факультета Московского университета, а в 1928 г. Булгаков завершил обучение в университете по специальности

“Теоретическая механика” механического цикла. В Архиве МГУ удалось обнаружить перечень прослушанных им теоретических курсов и выполненных практических занятий за все время обучения [37, лл. 18–21].

Будучи еще на третьем курсе Булгаков стал увлекаться теорией упругости. Выдающийся ученый, впоследствии академик Л.С. Лейбензон привлек его вместе с другими студентами к работе в Государственном исследовательском нефтяном институте. Здесь Борис Владимирович с ноября 1928 г. по май 1930 г. числился старшим научным сотрудником [37, л. 1] и “занимался, главным образом, вопросами расчета обкатных труб” [37, л. 7].

Его первые научные работы [2, 3], написанные под влиянием и руководством Л.С. Лейбензона, были посвящены определению влияния отклонения формы трубы от круглой на сопротивление трубы внешнему и внутреннему давлению и имели большое теоретическое, и практическое значение, о чем рассказывал проф. В.Н. Щелкачев на одном из спецсеминаров. Эти работы были опубликованы в журнале “Нефтяное хозяйство” в 1929 и 1930 г. Одна из статей ([2]) является публикацией квалификационной работы Булгакова на тему “О влиянии овальности трубы на ее сопротивление внешнему давлению”, успешно защищенной им в декабре 1928 г. [37, л. 18]. Б.В. Булгаков совместно с доц. В.Я. Натанзоном перевел также капитальный труд О. Лява “Трактат о математической теории упругости”.

К сожалению, о личной жизни Бориса Владимировича удалось выяснить очень мало. Этот интеллигентный, тонкий человек был удивительно скромным. Несмотря на продолжительные поиски стало известно только то, что в 1930 г. он был уже женат [37, л. 1].

### 1.3. Начало трудового пути

В 1930 г. Б.В. Булгаков начал свою педагогическую деятельность в Московском университете, которую не прекращал до самой смерти. 8 апреля 1930 г. Борис Владимирович стал ассистентом кафедры теоретической механики. В 1931–1933 гг. в списке курсов, читаемых на Механическом отделении, значилась “Теория колебаний” доцента Б.В. Булгакова для IV [38, лл. 17–18] и для V [39, л. 12] курсов – 66 часов. К тому же он читал факультативный курс “Динамика твердого тела” [40, л. 12]. В своей автобиографии Булгаков писал, что “в 1932–1939 гг. занимался главным образом прикладной теорией гироскопов” [37, л. 7].

Борис Владимирович вел интенсивную научную и педагогическую деятельность в области прикладной механики. В 1934 г. кафедрой теоретической механики ему было поручено руководство дипломными работами по темам: “Гироскоп и азимутальные девиации”, “Гироскоп и горизонтальная стабилизация”, “Жирогоризонт морского типа”, “Авиационный гироскоп”, “Относительное движение твердого тела”. Кроме того, в его обязанности входило оказывать помощь в порядке индивидуальной консультации студентам, делающим доклады по темам гироскопического характера на научно-исследовательском семина-

ре [39, лл. 21–22]. Б.В. Булгаков являлся старшим научным сотрудником отделения общей механики НИИ механики и математики МГУ, а после его разделения в 1935 г. на два отдельных института продолжил свою деятельность в НИИ механики.

С 1 февраля 1935 г. Борис Владимирович официально числился доцентом кафедры теоретической механики [37, л. 33]. В тот же период он начал вести подготовку аспирантов на этой кафедре [37, л. 22]. В 1936 г. с оценкой “отлично” были защищены следующие дипломные работы, выполненные под руководством Булгакова: Сосунов “Теория прецизионных гироскопических горизонтов” [41, лл. 12–13]; Бочков Д.И. “Горизонтальная стабилизация гироскопов” [41, лл. 14–15]; Иванов И.З. “Теория гиромаятника и теория гироскопа Сперри” [41, лл. 16–17]; Маринов А.М. “Гироскоп и его девиации в азимуте” [41, л. 21].

Свою деятельность в МГУ Булгаков совмещал с работой в других вузах Москвы. Он преподавал в Геолого-разведочном институте и работал в Государственном исследовательском нефтяном институте. Большое значение имела его работа в Московском высшем техническом училище (ныне МГТУ) им. Н.Э. Баумана. Совместно с учеными кафедры авиационных приборов, организованной в 1933 г., проф. Г.В. Щипановым и С.С. Тихменевым он разрабатывал и читал курсы: “Авиационные приборы”, “Прикладные теории гироскопов”, “Автопилоты” и др., которые послужили основой для организации подготовки специалистов в области авиационного приборостроения, автоматических бортовых систем управления летательными аппаратами. Позднее, в сентябре 1939 г. Борис Владимирович стал заведующим кафедрой авиационных приборов МВТУ по совместительству на 1/2 ставки [37, л. 1].

Уже в то время научный вес Б.В. Булгакова был столь значителен, что на заседании механико-математической секции Ученого совета МГУ от 26 октября 1935 г. было принято решение ходатайствовать перед Наркомпросом о присуждении ему ученой степени доктора физико-математических наук без защиты диссертационной работы. Однако это решение вызвало возражения со стороны декана механико-механического факультета проф. Л.А. Тумаркина, не отрицавшего при этом научного значения работ Булгакова [37, лл. 29–30]. По этой причине степень доктора Борис Владимирович тогда не получил.

В 1937 г. Б.В. Булгаковым и С.С. Тихменевым была опубликована первая отечественная работа в области авиационных гироскопов [9]. Эта работа была посвящена исследованию погрешностей авиационного гироскопа с квазиупругой коррекцией и ограничением зоны ее пропорциональности.

В этот период в МГУ Б.В. Булгаков читал факультативные курсы по динамике твердого тела (для упругистов, аэромехаников, гидромехаников), по теории колебаний (для V курса), теории технических гироскопов [42, л. 8]. 10 февраля 1938 г. он был назначен исполняющим обязанности профессора на кафедре теоретической механики с обязательством защитить докторскую диссертацию [37, л. 11]. В 1939 г. из семи объявленных кафедрой теоретической механики спецкурсов четыре читал Борис Владимирович: теорию линейных колебаний, теорию нелиней-

ных колебаний, прикладную теорию гироскопов, специальные главы прикладной теории гироскопов. Кроме того, он вел семинар по прикладной механике совместно с А.Ю. Ишлинским и Н.Г. Четаевым. (Годовой спецкурс по прикладной механике читал проф. И.И. Артоболевский, он же руководил семинаром по прикладной механике [60, с. 162]).

16 января 1939 г. состоялась публичная защита докторской диссертации Б.В. Булгакова по теории гироскопов. Его официальными оппонентами были профессора Г.Г. Аппельрот, Н.Н. Бухгольц, Л.Н. Сретенский. В своих отзывах они дали положительную оценку работы, отметили новизну и актуальность полученных результатов. Ученый совет механико-математического факультета единогласно проголосовал за присуждение Б.В. Булгакову степени доктора физико-математических наук и за его утверждение в звании действительного профессора механико-математического факультета МГУ [43, л. 54]. Это решение было утверждено протоколом № 18 Высшей аттестационной комиссии от 23 апреля 1939 г. [37, лл. 8, 9, 12].

В том же году вышла в свет его монография “Прикладная теория гироскопов” [11] – одна из основополагающих работ на эту тему, заслужившая признание научной общественности. В монографии изложена теория всех наиболее важных гироскопических приборов, применяемых в авиации, морском деле и других отраслях техники: гироскопических вертикалей, гироскопов Фуко с двумя степенями свободы, астатических гироскопов, гироскопических компасов, гиригоризонткомпасов и непосредственных гироскопических стабилизаторов. Уже после смерти Бориса Владимировича книга выдержала еще два издания: в 1955 и в 1976 г. В эти издания были включены некоторые добавления, содержащие работы Б.В. Булгакова по прикладной теории гироскопов, написанные уже после выхода в свет первого издания книги и частично опубликованные в журналах. Начиная с 1939 г., особое внимание в своей научной работе Борис Владимирович уделял теории колебаний и автоматического регулирования.

В это время значительно увеличилась выполняемая Б.В. Булгаковым нагрузка на кафедре теоретической механики. Им проводилась основная работа по руководству аспирантами. Например, в 1938/39 учебном году за ним было закреплено 7 аспирантов Института механики [44, лл. 1–2]. В 1939/40 учебном году выполняемая Б.В. Булгаковым нагрузка была наибольшей на кафедре [45, лл. 64–65]:

“1. Теория колебаний (лекции)	80 час.
2. Теория гироскопа (лекции)	80 час.
3. Специальный семинарий по общей механике	80 час.
4. Руководство аспирантами (Ройтенберг, Сизов, Манукян, Теленин) 4 × 50	200 час.
5. Руководство аспирантами смежных кафедр	40 час.
6. Руководство курсовыми работами 3 × 15	45 час.
7. Консультации	10 час.
8. Экзамены	16 час.
9. Государственные экзамены	20 час.
Итого	571 час.”

В связи с переходом Н.Н. Бухгольца, возглавлявшего кафедру теоретической механики, на другую работу Б.В. Булгаков с 1 февраля 1942 г. являлся исполняющим обязанности заведующего этой кафедрой на полной ставке с 1500 рублями в месяц (приказ по МГУ № 29 от 18 февраля 1942 г. [37, л. 37]).

#### **1.4. Б.В. Булгаков на кафедре прикладной механики**

К концу 1930-х годов в учебной и научной деятельности кафедры теоретической механики все большее место стала занимать прикладная механика. Глубокие научные исследования Б.В. Булгакова по теории гироскопов и теории колебаний, а также многочисленные работы проф. И.И. Артоболевского по теории механизмов и машин и результаты, полученные их учениками, образовали обширные самостоятельные разделы механики. Поэтому на заседаниях кафедры теоретической механики в предвоенные годы неоднократно поднимался вопрос о создании кафедры прикладной механики.

Л.В. Кудряшовой и И.З. Пироговым было проведено тщательное исследование архивных материалов [60]. Однако приказа об образовании этой кафедры не удалось найти ни в документах факультета, ни в Архиве МГУ. Очевидно, он был утерян в результате взрыва бомбы, которая 29 октября 1941 г. попала во двор старого здания университета напротив Манежа, где располагался тогда механико-математический факультет. Скорее всего кафедра прикладной механики была учреждена в конце 1941 г. В январе 1942 г. чл.-корр. АН СССР, проф. Ивану Ивановичу Артоболевскому уже было предложено принять заведование кафедрой прикладной механики “по совместительству”, как записано в личном деле [46].

Сначала в состав кафедры входило всего четыре человека: профессора И.И. Артоболевский и Б.В. Булгаков, преподаватель Н.В. Еремев и один лаборант.

Несмотря на трудности войны, Б.В. Булгаков не покидал Москву ни на один день. Борис Владимирович не отличался хорошим здоровьем (последние 18 лет жизни он тяжело страдал от туберкулеза легких), однако болезнь не помешала ему в сентябре 1941 г. наряду с другими крупными учеными в области математики и механики, в том числе И.Г. Петровским, П.С. Александровым, С.Л. Соболевым, А.А. Ильюшиным, в качестве рядового бойца подразделения МПВО гасить фашистские зажигалки, охраняя здание Московского университета.

После эвакуации основной части университета в Ашхабад, а затем в Свердловск Борис Владимирович наряду с работой на факультете некоторое время преподавал механику в Геолого-разведочном институте, а также работал в одном из отраслевых НИИ.

Кафедра прикладной механики образовалась в тяжелое военное время, однако с самого ее основания на ней был налажен активный научный и учебный процесс. Эта усиленная деятельность была обусловлена актуальностью трех основных направлений проводимых на кафедре

исследований: теории механизмов и машин, теории гироскопов и теории колебаний. Как один из организаторов кафедры Б.В. Булгаков принимал активное участие в ее работе. В 1943 г. им была написана работа “Теория нелинейных колебаний систем с приложением к теории регулирования”. Она была признана одной из важнейших научно-исследовательских работ года, выполненных на факультете, и была представлена на соискание Государственной премии СССР [76]. В том же 1943 г. Борис Владимирович подготовил и прочитал спецкурс оборонного значения “Прикладная теория гироскопических приборов”. Кроме того, все студенты-механики в обязательном порядке слушали годовой курс “Прикладная механика”, состоявший из двух полугодических частей: “Теория механизмов и машин” (лектор И.И. Артоболевский) и “Теория колебаний” (лектор Б.В. Булгаков). К ранее читавшимся спецкурсам прибавились новые, в том числе теория гироскопов [47].

1 апреля 1944 г. Борис Владимирович был освобожден от исполнения обязанностей заведующего кафедрой теоретической механики механико-математического факультета, будучи оставленным в должности профессора той же кафедры на 1/2 ставки с окладом 1000 рублей в месяц приказом по МГУ № 82/6 от 10 марта 1944 г. Этим же приказом он был назначен первым штатным заведующим кафедрой прикладной механики МГУ на 1/2 ставки с окладом 1150 рублей в месяц [37, л. 36]. В документах за 1944/45 учебный год сохранился состав кафедр и выполняемая сотрудниками нагрузка [48]. Кафедра прикладной механики: Булгаков Б.В. – зав. кафедрой, профессор (648 часов); Артоболевский И.И. – профессор, совместитель (376 часов); Еремеев Н.В. – старший преподаватель (778 часов).

Для чтения некоторых новых спецкурсов привлекались преподаватели других кафедр (доц. Я.Н. Ройтенберг, проф. В.Я. Натанзон, проф. М.А. Крейнс и др.).

4 декабря 1946 г. Булгаков был избран членом-корреспондентом АН СССР [37, лл. 1, 4]. Он активно участвовал в общественной жизни, являлся членом правления Московского механического общества [37, л. 14].

До тех пор, пока позволяло здоровье, Борис Владимирович не прекращал вести активную педагогическую деятельность. В личном деле Б.В. Булгакова был обнаружен написанный его рукой список аспирантов, успешно защитивших кандидатские диссертации под руководством Бориса Владимировича [37, л. 31]:

“1. Теленин – в Красной Армии; 2. Манукян – преподаватель Ереванского университета; 3. Игошин – погиб при исполнении обязанностей; 4. Сизов – преподаватель Ленинградской военно-воздушной академии; 5. Тохмахян – пал на Отечественной войне; 6. Ройтенберг – преподаватель МГУ, докторант Академии наук; 7. Помилуйко”.

Этот перечень включает далеко не всех. Приведем список защищенных в МГУ кандидатских диссертаций, выполненных под руководством Б.В. Булгакова:

1. Г.М. Тохмахян “Бигироскопный горизонт Шулера”. (Защищена 9.06.39. Утверждена 25.06.39) [69, с. 78].

2. М.М. Манукян “Гирогоризонт с несимметричным кардановым подвесом”. (Защищена 19.06.40. Утверждена 25.06.40) [69, с. 78].

3. Я.Н. Ройтенберг “К теории многогироскопной вертикали”. (Защищена 20.06.41. Утверждена 30.06.41) [69, с. 78].

4. М.Б. Сизов “Колебания некоторых псевдолинейных систем”. (Защищена 15.10.41. Утверждена 30.11.42) [82].

5. А.М. Летов “К задаче об автопилоте”. (Защищена 5.11.45. Утверждена 10.11.45) [64].

6. М.З. Литвин-Седой (позже профессор механико-математического факультета МГУ) “Исследования автоматического курса самолета с учетом флюгерного момента”. (Защищена 8.04.48. Утверждена 31.05.48) [65].

7. Е.Н. Мирославлев (впоследствии заведующий кафедрой высшей математики МВТУ) “О влиянии постоянных времени в нелинейных колебательных системах”. (Защищена 12.06.52. Утверждена 3.07.52) [72].

8. Г.Н. Шушара “Вынужденные колебания нелинейной системы регулирования с двумя степенями свободы”. (Защищена 13.12.51. Утверждена 7.04.52) [84].

Б.В. Булгаков понимал, что кафедра может готовить высококвалифицированных специалистов-прикладников только, если научные идеи не остаются для студентов сухими абстрактными фразами, а используются в конкретных приборах. Поэтому Борис Владимирович уделял значительное внимание оснащению кафедры современными гироскопиче-



Выпуск механико-математического факультета Московского университета 1946 г.

Во втором ряду второй слева – Б.В. Булгаков,  
в центре – декан факультета генерал В.В. Голубев

скими и аналого-вычислительными комплексами. Булгаков имел тесные связи с промышленностью (особенно с авиационной). Это помогло ему привлечь крупных специалистов к проектированию и изготовлению лабораторного оборудования для учебной и научной работы. В некоторых проектах Борис Владимирович и сам принимал деятельное участие, особенно при строительстве нового здания МГУ на Ленинских горах и лабораторного корпуса механико-математического факультета. Позднее на базе лаборатории кафедры были организованы соответствующие лаборатории Института механики МГУ.

Последние годы своей жизни Борис Владимирович, будучи уже тяжело больным, продолжал работу над третьей частью монографии “Колебания”, посвященной системам с конечным числом степеней свободы, но закончить эту работу помешала преждевременная смерть, последовавшая 29 апреля 1952 г. Б.В. Булгаков был похоронен на Новодевичьем кладбище (недалеко от могилы Шалаяпина).

После смерти Бориса Владимировича Булгакова в “Известиях АН СССР” был помещен некролог [53], в котором отмечались научные заслуги этого ученого. О Борисе Владимировиче говорилось как о “талантливом труженике науки, скромном и отзывчивом человеке”.

В 1954 г. вышла в свет большая (около 56 печатных листов) монография Булгакова “Колебания” [31]. Б.В. Булгаков был одним из наиболее значительных ученых середины XX столетия. Его можно по праву назвать одним из основоположников важнейшей области современной механики – механики управляемых систем.

---

## Научная деятельность

### 2.1. Ранние труды

Первые три работы Б.В. Булгакова были посвящены проблемам теории упругости.

Самое раннее значительное научное исследование ученого было посвящено вопросу о влиянии отклонений формы трубы от круглой на ее сопротивление внешнему давлению [2]. Эта задача была предложена Борису Владимировичу, когда он был еще студентом физико-математического факультета МГУ, его учителем профессором Л.С. Лейбензоном. Исследование проводилось в Государственном исследовательском нефтяном институте. Полученная точная формула для случая трубы, сжимаемой нормальным внешним давлением, стала применяться при бурении, когда необходим точный расчет действующих на стенки скважины давлений.

При производстве и транспортировке труб неизбежны некоторые погрешности, в результате чего форма трубы отличается от круглой. Влияние этих отклонений на прочность труб в то время еще не было исследовано. Булгаков был первым, кто сумел рассчитать сплющивающее давление, действующее на трубу овального сечения. При решении этой чрезвычайно сложной задачи им был использован не только аппарат теории упругости, но и оригинальный и весьма остроумный метод, основанный на теории тонких кривых брусьев. В 1929 г. в журнале “Нефтяное хозяйство” было опубликовано краткое резюме [11] рассматриваемого исследования. Полностью работа вышла в следующем году [2]. Работа “Влияние отклонений формы трубы от круглой на ее сопротивление внешнему давлению” состоит из трех глав.

В первой главе содержится решение задачи плоской теории упругости: определяется распределение напряжений в эллиптической трубе малого эксцентриситета, подверженной равномерному внешнему давлению, в случае равновесия. Дело в том, что эллиптическое искажение формы трубы оказывает наиболее вредное влияние на ее прочность. Полученное Булгаковым точное решение поставленной таким образом задачи позволило несколько уточнить линейный закон распределения напряжений в сечении, на котором основан распространенный в теории изгиба способ определения максимального напряжения. Тем не менее, для очень тонких труб, встречающихся на практике, эти результаты оказались непригодными ввиду того, что в этом случае особую значимость приобретает большое смещение точек приложения внешних сил, вызванное деформацией. Данное обстоятельство довольно

сложно учесть при решении поставленной задачи методами теории упругости.

Эта проблема решается во второй главе с помощью приближенной теории тонких кривых брусьев, в результате применения которой основные уравнения задачи значительно упрощаются. Основной прием исследования заключается в том, что из трубы вырезается кольцо шириной в 1 см, рассматриваемое как кривой брус. Полученная таким способом формула для расчета величины внешнего давления, достаточного для смятия слегка овальной трубы, наиболее точно отражает существо явления и может быть применена не только к толстым, но и к тонким трубам. Упомянутая формула была независимо от Б.В. Булгакова выведена профессором Л.С. Лейбензоном другим способом.

В третьей главе теоретические выкладки, полученные в двух предшествующих главах, сравниваются с данными экспериментов. Результаты этого сравнения приведены в таблицах и графических диаграммах, которые могут быть использованы при вычислениях. На основании проведенного исследования делается вывод о том, что сопротивление смятию труб увеличивается в отношении, лишь немного меньшем, чем в критической точке материала при испытании на разрыв.

Аналогичному рассмотренному в статье [2] вопросу для случая внутреннего давления посвящена следующая публикация Булгакова [3]. Эта проблема, как и предшествующее исследование, имеет не меньшее значение для различных отраслей техники, в частности, для расчета нефтепроводных труб. Разработкой этого вопроса Борис Владимирович занялся также по предложению профессора Л.С. Лейбензона.

Отличие рассматриваемой в статье [3] задачи заключается в том, что равномерное внутреннее давление способствует сглаживанию изначальных неровностей трубы, а не усилению их, как в случае давления, приложенного к внешней поверхности трубы. В результате действия внутреннего давления форма трубы приближается к круглой и деформации будут невелики. Поэтому для внутреннего давления решение, полученное методами общей теории упругости, будет ближе отражать существо явления, чем при действии внешнего давления. В данной работе интегрирование уравнений равновесия было произведено методом, аналогичным использованному в статье [2] для случая внешнего давления. В результате была получена формула, позволяющая определять относительную толщину стенки трубы, которая необходима для того, чтобы напряжение в материале не превосходило допустимого значения при заданном максимальной рабочем давлении.

В 1933 г. в ЦАГИ Б.В. Булгакову поручили рассмотреть проблему сопротивления лопастей пропеллера кручению. Результаты своей работы ученый изложил в статье [4].

При рассмотрении вращения лопастей винтов наибольшее значение приобретает деформация первоначальной цилиндрической формы лопастей под действием значительной центробежной силы. Поэтому геометрические характеристики работающего винта отличаются от тех, которые имеют место в случае покоя.

В небольшой по объему, но, тем не менее, весьма интересной работе [4] получено точное решение задачи о кручении стержня, поперечное сечение которого имеет форму сегмента гиперболы. Это решение полезно с точки зрения приложений в авиации, так как такое сечение довольно близко к сечениям, применяемым для лопастей винтов.

## 2.2. Исследования по теории гироскопов

Как известно, гироскопом (от греч. “гирос” – кружусь, вращаюсь, и “скопео” – смотрю, наблюдаю) называется быстро вращающееся симметричное твердое тело. Если угловая скорость собственного вращения гироскопа вокруг оси фигуры достаточно велика, и эта ось вращения (совпадающая с осью симметрии) гироскопа имеет возможность свободно изменять свое направление в пространстве, гироскоп проявляет свои основные свойства: 1) при отсутствии возмущающих сил ось вращения астатического гироскопа (т.е. гироскопа, центр тяжести которого совпадает с центром подвеса) устойчиво сохраняет свое направление в инерциальном пространстве; 2) (так называемый закон прецессии) “внешний момент  $M$ , приложенный к гироскопу, заставляет кинетическую ось<sup>1</sup> поворачиваться с мгновенной угловой скоростью

$$\Omega = \frac{M \sin(\Theta, M)}{\Theta} \quad (1)$$

вокруг оси, перпендикулярной к плоскости векторов  $\Theta$ ,  $M$ ; это вращение имеет тенденцию совместить первый вектор со вторым” [11, с. 16]. Здесь  $\Theta$  – кинетический момент гироскопа (главный момент количества движения).

Гироскопическими свойствами обладают вращающиеся небесные тела, детский волчок, артиллерийские снаряды, винты самолетов и др. Эти свойства позволяют использовать гироскоп во многих современных технических устройствах и приборах, служащих для целей навигации, автоматического управления движением различных объектов, измерения их угловых и линейных скоростей и для многих других целей.

Теоретический фундамент для развития теории гироскопов был заложен в трудах Л. Эйлера по динамике движения твердого тела. В его работах [33] получены уравнения, описывающие вращение твердого тела вокруг неподвижной точки. Исследования вращательного движения твердого тела были продолжены Л. Пуансо, Ж. Лагранжем, С.В. Ковалевской, А.М. Ляпуновым, Н.Е. Жуковским, С.А. Чаплыгиным, В. Гессом, Д.К. Бобылевым, В.А. Стекловым и другими учеными.

Теория гироскопов как самостоятельное направление в механике зародилась во второй половине XIX в. Хотя эта теория является продолжением одного из разделов общей динамики твердого тела, она имеет свои специфические цели – построение теории и расчет параметров конкретных гироскопических приборов.

<sup>1</sup> Кинетической осью называется ось, положительное направление которой совпадает с направлением кинетического момента.

Начало теории гироскопов было положено в трудах Фуко, который в своих докладах Парижской академии наук [91–94] указал способ обнаружения суточного вращения Земли с помощью прибора, названного им “гироскопом”. Фуко указал еще на два возможных пути использования астатического гироскопа: ось быстро вращающегося ротора, имеющая возможность поворачиваться только в плоскости горизонта, будет стремиться установиться по полуденной линии, если же перемещения оси гироскопа ограничены плоскостью меридиана, то она будет стремиться стать параллельно земной оси.

Быстрое развитие техники в начале XX в. обусловило разработку и создание новых, все более совершенных гироскопических устройств. Появились такие приборы, как гировертикали, гироскопы направления, позволявшие определять угловое отклонение объекта от определенным образом ориентированных осей; гироскопические измерители угловой скорости и углового ускорения, использовавшиеся при управлении вращением объекта; гиросtabilизаторы, служившие для сохранения неизменной ориентации различных механических систем; автопилоты, способные автоматически управлять самолетом. Огромная заслуга в развитии прикладной теории гироскопов принадлежит инженерам-практикам, благодаря которым создавались новые гироскопические устройства и совершенствовались старые: Г. Флерие, Л. Обри, Ж. Сир, Ж. Труве, Г. Аншютц-Гемпфе [85], Э. Сперри, Г. Гаррисон и А. Роллингс, О. Шликк [105, 106].

Зарождающаяся новая ветвь механики требовала создания теоретического фундамента. Исследование поведения новых гироскопических приборов, разработка общей теории гироскопов на раннем этапе ее развития проводились такими учеными, как В. Томсон [113], Ф. Клейн и А. Зоммерфельд [98], М. Шулер [108–110], И. Геккелер [95, 96], О. Мартинсен [100–102], Г. Узенер, Р. Граммель [97], А. Бенген [51].

Важные теоретические результаты были получены М. Шулером. Им была разработана теория гироскопа Аншютца, рассмотрены отклонения прибора, обусловленные скоростью и ускорением судна, на котором он установлен, так называемые скоростные и баллистические девиации. В 1910 г. им было найдено условие невозмущаемости недемпфированного гироскопического компаса [108]: такой прибор не будет иметь баллистических девиаций, если период его собственных колебаний равен

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} = 84,4 \text{ мин.} \quad (2)$$

Здесь  $R$  – радиус Земли;  $g$  – ускорение свободного падения. В 1923 г. Шулер распространил этот результат на случай физического маятника, гиromаятника и однородного гироскопа [110].

“Жизнь показала, что развитию механики гироскопических систем и гироскопической техники помогало их взаимодействие; нередко именно инженерная практика ставила перед механикой новые задачи и слу-

жила критерием правильности их решения. С другой стороны, развивающаяся теория гироскопов и гироскопических систем указывала возможные пути построения новых конструкций и их совершенствования” [55, с. 145].

В нашей стране до Октябрьской социалистической революции и в период восстановления после войны промышленность была отсталой. Поэтому гироскопические приборы тогда не разрабатывались и не изготовлялись. Теоретических работ, посвященных этому вопросу, было мало. Среди них видное место занимают сочинения Б.И. Кудревича, всю свою жизнь занимавшегося развитием гироскопического дела у нас в стране. Он довольно рано понял важность использования гироскопов в морском деле и посвятил ряд статей описанию принципа действия некоторых конструкций этого прибора, а также его свойств и возможностей применения для различных целей. Перу Б.И. Кудревича принадлежит обширное руководство “Теория и практика гироскопического компаса” [59], в котором были исследованы различные типы этих приборов, в частности, маятниковые однороторные гироскопические компасы, однороторные гироскопы с ртутными баллистическими сосудами, двухроторные и пространственные гироскопические компасы. Кроме того, был рассмотрен ряд вопросов теории гироскопов и гироскопизонтов.

После Октябрьской революции гироскопической тематикой серьезно заинтересовался А.Н. Крылов, которым совместно с Ю.А. Крутковым была написана вышедшая в свет в 1932 г. монография “Общая теория гироскопов и некоторых технических их применений”, в которой с помощью второго метода Лагранжа исследована теория гироскопических устройств, гироскопов Фуко, маятникового кренометра, в частности, снабженного гидравлическим успокоителем; рассматриваются девиации (т.е. отклонения) гироскопического маятника и гироскопического компаса; а также вопросы использования гироскопа для непосредственной стабилизации различных механических систем.

Следует подробнее сказать о работе А.Н. Крылова, посвященной теории двухроторного компаса Аншютца с гидравлическим успокоителем [57]. Им проведено исследование поведения такого гироскопа на неподвижном основании и на движущемся по поверхности Земли судне. Подобное исследование уже было проведено к тому времени Геккелем, но А.Н. Крылов использовал иные методы и исправил неточности, допущенные его предшественником, которым не было учтено влияние незатухших свободных колебаний от предыдущего маневра на начальные условия движения компаса перед последующим маневром. В результате ученый получил более точную оценку девиации гироскопа, возникающей вследствие ускорений корабля. При этом А.Н. Крылов отмечал, что методы, использованные Б.В. Булгаковым в его “превосходной монографии” [11], о которой речь пойдет ниже, заведомо учитывали указанную добавочную девиацию, и поэтому полученные Б.В. Булгаковым результаты в поправке не нуждаются. В работе [57] Крыловым было также продемонстрировано, что при рассмотрении быстрых движений корабля или его движения в высоких

широтах в формуле скорости девиации гирокомпаса необходимо учитывать восточную составляющую скорости судна. Работы А.Н. Крылова в области теории гироскопических приборов в значительной степени способствовали развитию этой отрасли промышленности в Советском Союзе и за рубежом и не потеряли своего значения в наши дни.

Первые работы по динамике гироскопа в кардановом подвесе с учетом инерции кардановых колец принадлежат Е.Л. Николаи. В статье “О движении уравновешенного гироскопа в кардановом подвесе” [73] им было рассмотрено движение такого гироскопа по инерции. Ученый вывел уравнения движения системы, состоящей из гироскопа и двух кардановых колец. Рассмотрев устойчивость движения, Е.Л. Николаи пришел к выводу о значительном снижении устойчивости малых колебаний гироскопа, ось которого совпадает или близка к оси внешнего карданова кольца.

В теории гироскопов существенное значение имеет вопрос о вращении твердого тела с учетом действующих на него сопротивлений. Этой проблеме посвящена статья Е.Л. Николаи “О влиянии трения на движение гироскопа в кардановом подвесе” [74], а также опубликованная в 1944 г. монография “Гироскоп в кардановом подвесе” [75]. Ученым было рассмотрено влияние масс колец карданова подвеса и трения в их опорах на поведение быстро вращающегося гироскопа.

Таковыми в общих чертах были теоретические и практические результаты, достигнутые отечественными и зарубежными учеными в прикладной теории гироскопов к началу второй половины XX в.

Борис Владимирович Булгаков наряду с такими крупными советскими учеными как А.Н. Крылов, Ю.А. Крутков, Е.Л. Николаи, Б.И. Кудревич, И.В. Мещерский и др. заложил надежный фундамент для развития гироскопической техники в СССР. Его статьи и, в особенности, книга “Прикладная теория гироскопов” [11] вошли в ряд основополагающих работ по этой отрасли развивающейся советской промышленности.

Обратимся теперь к отдельным публикациям Булгакова, посвященным этой весьма важной для практики области механики. Подробному изложению содержания монографии “Прикладная теория гироскопов” [11] будет посвящен отдельный раздел.

Как мы уже отмечали выше в период с 1932 по 1939 г. Борис Владимирович вел напряженную работу по разработке теории гироскопических приборов, имевшую в преддверии Великой Отечественной войны существенное значение для советской оборонной промышленности. Им были опубликованы четыре важные статьи, посвященные теории гироскопов, где методами строгой теории гироскопов рассматривались прикладные проблемы инженерного конструирования различных гироскопических приборов.

В первой из них, озаглавленной “Две задачи из теории волчка” [5], рассмотрены два частных случая движения гироскопа в кардановом подвесе: вынужденная прецессия и движение свободного гироскопа под действием сил сопротивления. В частности, исследован гироскоп, уста-

новленный в кардановом подвесе, внешнее и внутреннее кольца которого скреплены так, что угол между ротором гироскопа и осью внешнего кольца остается постоянным. Если сообщить внешнему кольцу подвеса вращение вокруг его оси с постоянной угловой скоростью, то полученное движение гироскопа будет регулярной прецессией.

Особенно интересной являлась задача определения движения гироскопа, которое может быть названо вынужденной прецессией. В этом случае внешнее карданово кольцо приводится во вращение с постоянной угловой скоростью вокруг своей оси, являющейся теперь осью прецессии, а внутреннее кольцо подвеса при этом остается свободным. Таким образом, ось ротора гироскопа в данном случае может составлять любой угол с осью внешнего кольца карданова подвеса. Такое движение гироскопа представляется интересным с практической точки зрения. Например, к нему сводится задача о движении связанных гироскопов Фуко.

В статье показано, что движение, совершаемое собственной осью гироскопа при обычных условиях, имеет характер псевдогармонических колебаний около оси прецессии. Оказывается, при условии существования интеграла собственного вращения можно найти точное решение данной задачи при помощи эллиптических квадратур. Исследовано три возможных типа движения, которые имеют место в случаях, когда абсолютная величина начальной угловой скорости внутреннего кольца подвеса меньше, равна или больше некоторой определенной величины.

Целью второй части работы [5] являлось продолжение начатого Ф. Клейном и А. Зоммерфельдом [98] анализа вращения свободного гироскопа с учетом сопротивления среды. Предполагается, что сопротивление среды может быть представлено двумя парами сил, моменты которых пропорциональны экваториальной и осевой составляющим мгновенной угловой скорости и направлены противоположно им. При этом считается, что по оси фигуры не приложен активный вращающий момент, поддерживающий собственное вращение.

В результате исследования автор пришел к выводу, что вектор кинетического момента гироскопа и вектор мгновенной угловой скорости вращения асимптотически стремятся совпасть с малой осью эллипсоида инерции гироскопа, построенного для неподвижной точки. Таким образом, в случае вытянутого эллипсоида инерции вектор кинетического момента гироскопа и вектор мгновенной угловой скорости вращения стремятся совпасть с экваториальной плоскостью гироскопа, а в случае сплюснутого эллипсоида инерции – с осью фигуры. В обоих случаях вектор кинетического момента несколько опережает вектор мгновенной угловой скорости вращения. При этом вектор кинетического момента вращается вокруг оси фигуры гироскопа, неограниченно убывая по абсолютному значению. Далее приведено наглядное геометрическое исследование траекторий вершины гироскопа на единичной сфере.

В заключение дан анализ частного случая, когда угловая скорость собственного вращения гироскопа сохраняет постоянную величину.

Это условие выполняется, когда активный вращающий момент, получаемый, например, от электромотора, уравнивает момент сил сопротивления относительно оси фигуры. Оказывается, в этом случае независимо от того является ли эллипсоид инерции гироскопа вытянутым или сплюснутым, как вектор мгновенной угловой скорости, так и вектор кинетического момента асимптотически стремятся совпасть с осью фигуры гироскопа. Колебания оси фигуры около кинетической оси являются затухающими.

Отметим, что Б.В. Булгакова всегда интересовал практический аспект рассматриваемой области механики. Тесное сотрудничество с инженерами ставило перед ученым задачи, с которыми те повседневно сталкивались на практике. В своих работах он рассматривал приборы, применявшиеся в различных областях техники. В 1937 г. были опубликованы две его статьи, посвященные теории гироскопов – гироскопических приборов, позволяющих определять горизонталь. В одной из них [8] проведен анализ динамики морского гироскопического горизонта системы Аншютца с несимметричным кардановым подвесом и показано его преимущество по сравнению с гироскопом в обычном кардановом подвесе.

Основная трудность, с которой пришлось столкнуться при конструировании гироскопического горизонта состояла в том, что для уменьшения влияния ускорений судна выгодно увеличивать период прецессии. Это можно обеспечить, монтируя прибор таким образом, чтобы центр тяжести прецессирующей системы находился на малом расстоянии от точки опоры. С другой стороны, линия искусственного горизонта находится путем определения среднего положения из двух наблюдений, второе из которых производится по истечении половины периода прецессии после первого. Поэтому для удобства выполнения данной операции желательно, чтобы этот период был небольшим. Оригинальное решение возникшей проблемы мы находим в конструкции гироскопического горизонта Аншютца, позволяющей примирить эти противоречивые требования.

Отличительной чертой этого прибора является то, что оси внешнего и внутреннего колец его карданова подвеса располагаются на разной высоте над центром тяжести гироскопа. Схема его устройства приведена на рис. 1.

Булгаковым изучены свободные колебания прибора и вынужденные колебания, которые совершает гироскопический горизонт Аншютца под воздействием качки корабля. Исследование произведено путем выведения и интегрирования уравнений движения чувствительного элемента. Показано также, что период прецессии обратно пропорционален среднему геометрическому от расстояний между центром тяжести и двумя осями карданова подвеса; для получения малого периода достаточно сделать одно из этих расстояний относительно большим. С другой стороны, показано, что, если сделать второе плечо относительно коротким, амплитуда вынужденных колебаний гироскопа в одной вертикальной плоскости с наблюдаемым светилом у морского гироскопического горизонта с несимметричным кардановым подвесом будет очень мала по срав-

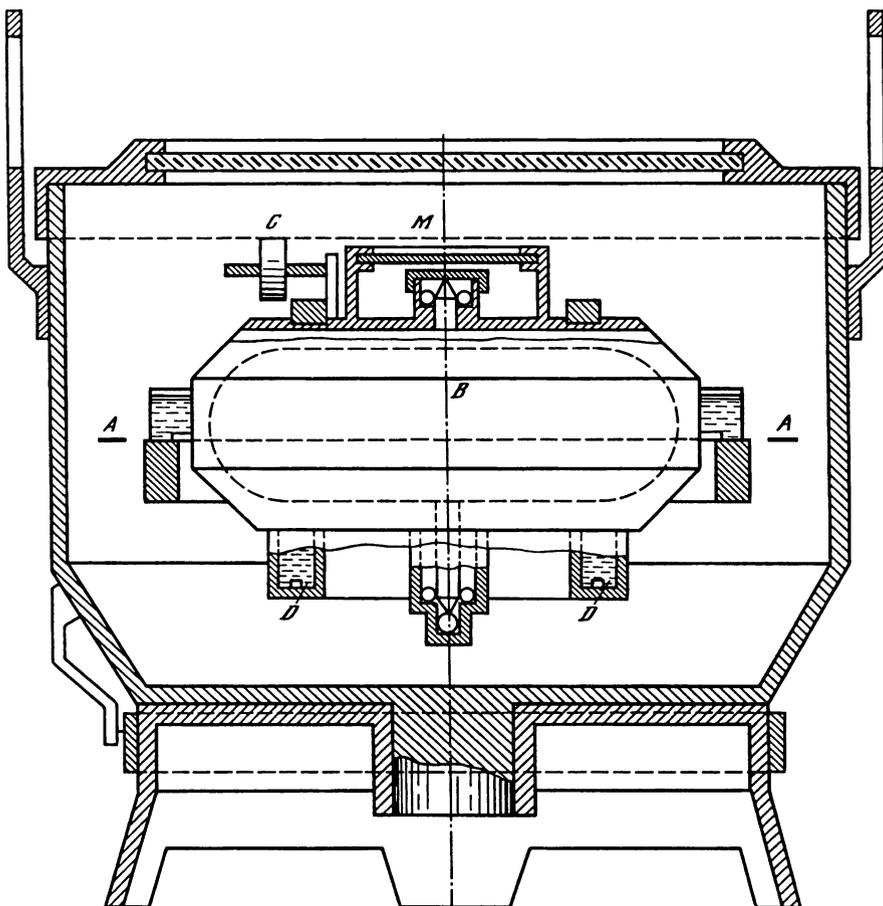


Рис. 1. Морской гироскопизонт Аншютца

нению с аналогичным отклонением в случае гироскопизонта с обычным кардановым подвесом. Эти две особенности обусловили применение гироскопизонта Аншютца на практике. Результаты данного исследования дают возможность оценки точности прибора и выбора его параметров.

Вторая статья [9] была написана Б.В. Булгаковым в соавторстве с сотрудником МВТУ им. Н.Э. Баумана С.С. Тихменевым. Работа посвящена построению теории гироскопизонта с маятниковой воздуховодной коррекцией фирмы "Spergy Co". В свое время этот прибор получил очень широкое распространение в авиации для целей навигации при слепом полете и бомбометании, так как он позволял получать искусственный горизонт в условиях отсутствия видимости земных ориентиров. Предотвращение отклонений в этом приборе осуществляется при помо-

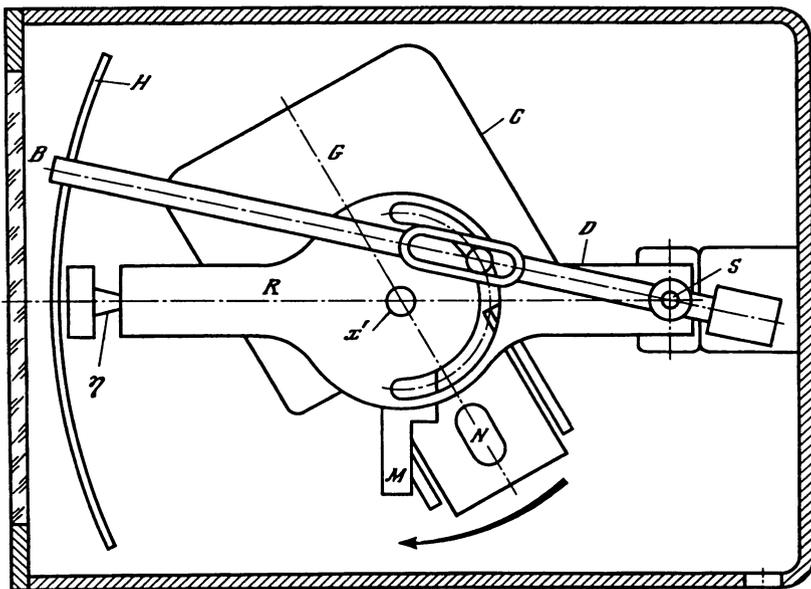


Рис. 2. Авиационный горизонт Сперри

щи оригинального воздуходувного корректора (рис. 2). При отклонении чувствительного элемента гироскопа от вертикали это устройство позволяет возвращать ось фигуры в исходное положение кратчайшим путем, что составляет основное преимущество данного гироскопа.

Сначала в статье [9] рассмотрено движение прибора на неподвижном основании. Авторами определено поведение проекции вершины ротора гироскопа при установке по вертикали сначала без учета сопротивления, а затем при наличии трения в подшипниках карданова кольца и кожуха. После этого исследуется влияние вращения земного шара и вращения самолета, вызванного кривизной поверхности земного шара, на движение гироскопа Сперри. Скоростные девиации, т.е. смещения оси ротора гироскопа, обусловленные этими факторами, для данного прибора оказываются весьма незначительными, так как он имеет сравнительно сильную коррекцию.

Анализируя влияние ускорения на точность гироскопа, авторы развили следующий общий метод. Если рассматривать изменение скорости как некоторую предельную постоянную величину, то время действия ускорения будет обратно пропорционально ускорению. Полный угол отклонения за это время и даст оценку степени податливости прибора по отношению к ускорениям. В заключение приводится составленная авторами таблица таких углов отклонения для конкретных значений максимального изменения скорости. Этот метод получил дальнейшее развитие как в трудах самого Бориса Владимировича, так и в работах других авторов под названием "задачи Булгакова о накоплении воз-

мущений”. Обе статьи ([8] и [9]) представляют собой первые работы, детально разрабатывающие теорию рассмотренных в них гироскопических устройств.

В 1937 г. Б.В. Булгаков занялся исследованиями устойчивости колебаний гироскопов. Результат этих изысканий был просуммирован в работе “Некоторые вопросы устойчивости движения в теории гироскопа” [10]. Предметом статьи является устойчивость малых колебаний оси гироскопа около кинетической оси. При этом колебания считаются устойчивыми, если гироскопу можно сообщить достаточно быстрое вращение, а его оси такое малое начальное отклонение и слабый удар, чтобы сферический радиус колебаний после этого оставался меньшим любого заданного числа. Борис Владимирович впервые в литературе поставил вопрос об исследовании нутационных колебаний для любых, в том числе неконсервативных, систем.

В поисках системы обобщенных координат, которая позволяла бы представлять гироскопические свойства движения наиболее наглядно, ученый пришел к системе шести координат, которые включают: долготу и широту на единичной сфере точки, находящейся на расстоянии одной линейной единицы от точки опоры на положительной части кинетической оси; абсолютную величину вектора кинетического момента; две координаты вершины гироскопа относительно астатических осей и угол собственного вращения гироскопа. Эта система фазовых координат, впервые предложенная Булгаковым, впоследствии широко использовалась многими исследователями как при построении уравнений теории гироскопов, так и при расчете движений космических объектов.

Для астатического гироскопа, вращающегося под действием сопротивления воздуха, получены уравнения движения, выражающие в явном виде угол между осью ротора и кинетической осью, и задача устойчивости решается непосредственно. Для класса движений, когда к гироскопу приложены консервативные или диссипативные силы, решение может быть получено при помощи энергетического критерия. С такими движениями мы сталкиваемся при рассмотрении важного для практики вопроса о движении гиромаятника или гироскопа с учетом влияния вращения Земли. Если же приложенные к гироскопу силы не являются ни консервативными, ни диссипативными, задача в некоторых случаях может быть решена путем качественного анализа дифференциальных уравнений движения. В качестве примера такого исследования приводится задача об устойчивости колебаний оси фигуры искусственного горизонта Сперри с радиальной коррекцией с учетом сопротивления воздуха. Полученные Булгаковым результаты позволяют, в частности, утверждать, что при наличии вязкого сопротивления колебания оси гироскопа около кинетической оси будут устойчивыми.

Результаты рассмотренных выше статей с некоторыми добавлениями и уточнениями были в 1939 г. включены Борисом Владимировичем Булгаковым в его докторскую диссертацию, посвященную теории и практическим применениям гироскопа [11].

В 1940 г. на немецком языке была опубликована работа [33], впоследствии вошедшая во второе издание монографии “Прикладная теория

гироскопов” [11] в качестве добавления 2, озаглавленного “О накоплении девиаций у гироскопических приборов”. Данная работа посвящена вопросу о накоплении баллистических девиаций у гироскопических приборов. Задача определения наиболее неблагоприятного для точности приборов маневра и отыскания максимального значения баллистической девиации, которое при этом может быть достигнуто, уже ставилась и решалась Булгаковым для случаев гиromаятника с погашением колебаний [11] и гирокомпыа Сперри [9]. В статье [33] задача о накоплении девиаций решена для более сложного случая гирокомпыа Аншютца с демпфирующим устройством, удовлетворяющего условию М. Шулера.

Основываясь на дифференциальных уравнениях малых колебаний гирокомпыа Аншютца, полученных И.В. Геккелером [95, с. 66], Булгаков получает их решение с помощью операционного исчисления. Найденное Булгаковым выражение для баллистической девиации позволило найти приближенную формулу, при помощи которой можно в первом приближении подсчитать баллистические девиации, получающиеся в важном частом случае маневра, а также решить исходную задачу. Гирокомпыа Аншютца получает максимальную девиацию при перемещении корабля вдоль меридиана попеременно на север и на юг, меняя курс через каждый полупериод компаса. Разумеется, в действительности такие движения практически не встречаются. Баллистические девиации гирокомпыа, удовлетворяющего условию Шулера, возникают только при наличии демпфирования.

Другая важная работа по теории гироскопических приборов “К теории силовых гироскопических горизонтов” [22] была написана Б.В. Булгаковым в 1948 г. совместно с его учеником Я.Н. Ройтенбергом, позже она вошла в качестве добавления 3 в монографию “Прикладная теория гироскопов” [11].

Принцип силовой гироскопической стабилизации обычно служит для снятия показаний гироскопических приборов. Суть его состоит в использовании разгрузочных сервомоторов и электромагнитов, с помощью которых компенсируется трение в опорах гироприбора и силы реакции. Рассмотренный в статье [22] силовой гироскопический горизонт содержит помещенную в карданов подвес горизонтальную площадку с установленными на ней четырьмя гироскопами.

Авторами составлены уравнения движения этого устройства, позволяющие определить скоростные девиации, появляющиеся при перемещении судна с постоянными курсом и скоростью. Причем параметры устройства можно подобрать таким образом, что скоростные девиации будут достаточно малы. При различных изменениях направления движения и скорости корабля прибор получит дополнительные баллистические девиации, которые могут быть исследованы обычными методами. В заключение авторы указали на вариант описанной схемы, когда система ведет себя как гиromаятник с периодом прецессии, равным периоду М. Шулера  $T^* = 84,4$  мин, что обеспечивает компенсацию баллистических девиаций устройства.

Обратимся теперь к работам Булгакова, послужившим заделом развития теории инерциальной навигации. Исследования по созданию

системы навигации, которая позволяла бы автоматически определять местоположение объекта, не используя никакую внешнюю информацию, велись на протяжении многих лет в нашей стране и за рубежом. Первые исследования в этом направлении проводились М. Керри (США, 1903) [87], В. Алексеевым (Россия, 1911) [49], Ф. Свини (США, 1911) [112], Р. Вуссовым (1905), немецким изобретателем И.М. Бойковым (1911, 1928–1933) [86], Г. Обертом (1929), Р. Эно-Пельтри (1930).

Значительный шаг на пути к реализации инерциальной системы, позволяющей осуществлять навигацию объектов, перемещающихся по земной поверхности, был сделан советскими инженерами Е.Б. Левенталем и Л.М. Кофманом в авторской заявке 1932 г. [63]. Предложенная ими система содержала горизонтируемую по трем осям с помощью трехстепенного астатического гироскопа платформу. На ней были помещены два акселерометра с взаимно ортогональными горизонтальными осями чувствительности. Новым был способ стабилизации платформы, которая осуществлялась путем подачи на гироскоп такого корректирующего момента, чтобы платформа оставалась в горизонтальном положении. Для этого гироскопу сообщалась прецессия, скорость которой была пропорциональна интегралу по времени от показаний акселерометров.

Достоинством этой схемы было то, что в ней горизонтальное положение сохраняли не только акселерометры, но и гироскоп, что при малых ускорениях и скоростях передвижения позволяло уменьшать ошибки системы. Кроме того, вследствие горизонтальности осей чувствительности акселерометров проекция на них силы тяжести равнялась нулю, что уменьшало требования к их точности.

7 июля 1936 г. Б.В. Булгаковым было подано две авторские заявки на изобретения, на которые впоследствии был поставлен гриф секретности, который сняли только в 1965 г. Содержащиеся в этих изобретениях идеи послужили дальнейшему развитию систем инерциальной навигации, поскольку они позволяли осуществлять коррекцию гироскопических приборов, не используя внешней информации.

Одно из изобретений под названием “Полугирокомпас с применением интеграторов” [7] являлось плодом совместной работы Б.В. Булгакова и Л.М. Кофмана. В авторской заявке ими был предложен способ стабилизации гироскопического полукомпаса, аналогичный способу, использованному в навигационной системе Кофмана–Левентала. Авторское свидетельство (не подлежащее опубликованию) № 3600 изобретатели получили 2 октября 1940 г.

Полукомпас представляет собой астатический гироскоп с горизонтальной осью, служащий для фиксации направления зюйд–норд на движущемся судне. При работе полукомпаса вследствие земного вращения и переносного движения судна гироскоп получает прецессию в горизонтальной плоскости, а также происходит отклонение оси гироскопа от горизонтальной плоскости. Стабилизация гироскопа с помощью механических приспособлений, например маятника, вызывает новые девиации, возникающие при ускорениях основания из-за возмущения маятника силами инерции. В связи с этим авторами было предложено

устранять отклонения прибора путем подачи соответствующих корректирующих моментов. При этом ими было предложено использовать показания интеграторов, входящих как элемент в изобретение Л.М. Кофмана – Е.Б. Левенталя (авторское свидетельство № 1337 с).

Согласно изобретению для устранения прецессии в горизонтальной плоскости следовало подать на гироскоп вокруг горизонтальной оси момент, пропорциональный показанию интегратора, показывающего абсолютную переносную скорость по направлению вост–ост, и тангенсу широты места, получаемую от соответствующего интегратора.

Горизонтальная стабилизация оси осуществлялась путем передачи вокруг вертикальной оси корректирующего момента, пропорционального интегралу от показания акселерометра, воспринимающего ускорения в направлении оси гироскопа. При этом прибор не имеет баллистических девиаций и может совершать лишь гармонические колебания с периодом Шулера  $T^* = 84,4$  мин.

В изобретении Б.В. Булгакова под названием “Способ получения затухания в гироскопических горизонтах и полукомпасах” [6] им было предложено устройство, служащее для погашения колебаний прецизионных компенсированных гироскопических горизонтов и полукомпасов, снабженных акселерометрами и интеграторами в качестве корректоров, путем возвратного автоматического интегрирования. Заявленный способ отличается тем, что показания интеграторов “используются одновременно для непрерывного воздействия в виде внешних моментов на гиросистему и для введения в качестве поправок в подынтегральную величину, учитывающую показания акселерометров” [6, л. 4]. Авторское свидетельство по этому изобретению было выдано Б.В. Булгакову 14 декабря 1937 г. за № 2850.

В 1937 г. была построена первая отечественная система инерциальной навигации под названием “Универсальный ориентатор = 37”, схема которой была близка к схеме Е.Б. Левенталя–Л.М. Кофмана. Б.В. Булгаковым были разработаны основы ее теории в 1938 г. Эта работа была подготовлена к печати в 1939 г. А.М. Летовым [64], но из-за наложенного на нее грифа секретности впервые опубликована была только в 1969 г. [32]. Впоследствии она вошла в 3-е издание монографии “Прикладная теория гироскопов” [11] в качестве дополнения 5.

Булгаковым была рассмотрена система, содержащая два астатических трехстепенных гироскопа, установленных в независимых кардановых подвесах, и два акселерометра. Все они были помещены на общей следящей платформе, установленной во внешнем кардановом подвесе. Оси гироскопов и акселерометров были горизонтальны. При этом оси одной пары гироскоп–акселерометр давали направление на север, а другой – на восток. При нормальной работе прибора следящая платформа горизонтальна, оси роторов гироскопов взаимно перпендикулярны и параллельны платформе. При малейшем отклонении следящая платформа поворачивается вокруг соответствующей кардановой оси с помощью сервомоторов, и восстанавливается нормальное положение. Рассмотренная схема включает также интеграторы показаний акселерометров.

Б.В. Булгаков рассмотрел два наиболее важных режима работы такой системы. При первом режиме “северный гироскоп работает как гироскоп, восточный осуществляет поперечную горизонтальную стабилизацию. Система в целом является одновременно и гироскопом и прецизионным гироскопом. Геометрическая ось юг–север следящей платформы дает полуденную линию, плоскость платформы – искусственный горизонт” [11, с. 386]. Второй режим – астатический. В этом случае “северный гироскоп работает как полукомпас (гироскоп направленный), одновременно осуществляя горизонтальную стабилизацию относительно оси запад–восток. Восточный гироскоп обеспечивает горизонтальную стабилизацию вокруг оси юг–север. Прибор в целом представляет собой в этом случае комбинированный прецизионный полукомпас и гироскоп” [11, с. 392].

В системе использованы астатические гироскопы, а внешние моменты прикладываются к ним с помощью электромагнитной системы коррекции, использующей различные комбинации выходных данных акселерометров и интеграторов. Булгаков выводит уравнения, определяющие моменты сил, накладываемых на гироскопы, чтобы обеспечить соответствующий режим работы прибора, а также уравнения, по которым должны вычисляться географические координаты местоположения объекта. При выводе уравнений автор делает упрощающие предположения, которые используются также и при исследовании морского гироскопа. В показаниях акселерометров он опускает составляющую, обусловленную кориолисовым ускорением, а при определении корректирующего момента, налагаемого на одну из осей северного гироскопа, пренебрегает восточной составляющей относительной скорости объекта по сравнению с переносной скоростью, обусловленной вращением Земли. Ученый нашел положения равновесия прибора в обоих режимах и показал, что такая инерциальная навигационная система будет иметь баллистические девиации.

Ввиду упрощающих допущений, принятых Булгаковым в этой работе, остался невыясненным вопрос о возможности построения инерциальной системы, осуществляющей навигацию произвольно движущегося объекта с точностью, ограниченной лишь инструментальными погрешностями составляющих ее элементов.

Таким образом, в области теории гироскопов и теории инерциальной навигации: Б.В. Булгаковым были получены следующие основные результаты.

1. Исследованы вынужденная прецессия и устойчивость колебаний гироскопов. Булгаков разрешил задачу о влиянии сопротивления окружающей среды на поведение свободного гироскопа.

2. Впервые предложена оригинальная система фазовых координат, которая оказалась весьма эффективной при изучении малых колебаний кинетической оси гироскопа около его оси динамической симметрии.

3. Ему принадлежат первые работы, в которых была детально разработана теория морского гироскопического горизонта Аншюгца с несимметричным кардановым подвесом и авиационного гироскопа Сперри.

4. Совместно с Я.Н. Ройтенбергом им была разработана теория силового гироскопического горизонта.

5. В засекреченных изобретениях Б.В. Булгакова 1936 г. был предложен способ, позволяющий осуществлять коррекцию в гироскопических горизонтах и полукомпасах. В них содержались идеи теории инерционной навигации: для создания корректирующего момента использовались показания акселерометров с их последующим интегрированием.

6. Разработана теория первой отечественной навигационной системы.

7. При решении конкретной навигационной задачи Б.В. Булгаковым был введен в научный обиход метод оценки податливости устройства по отношению к ускорениям основания, на котором оно установлено, заключающийся в нахождении наилучшего режима работы гироскопического прибора и служащий для оценки его погрешностей (“задача Булгакова о накоплении возмущений”). Она была развита как в работах самого Б.В. Булгакова, так и в исследованиях других авторов. В этом методе усматривается идейная связь и предыстория сформулированного позже Понтрягиным и его школой так называемого принципа максимума, ставшего одним из важнейших в теории оптимального управления.

### **2.3. Докторская диссертация: монография “Прикладная теория гироскопов”**

В 1939 г. вышла в свет монография “Прикладная теория гироскопов” [11] – одно из первых фундаментальных исследований по данной тематике. Эта работа охватывала широкий спектр важнейших проблем, связанных с теорией действия гироскопических приборов того времени и впоследствии выдержала еще два издания. Отдельные главы посвящены астатическим гироскопам, гировертикалям, гироскопам Фуко, гириомаятникам, гироскопическим компасам, непосредственным гироскопическим стабилизаторам активного и пассивного типа, полигироскопным системам, а также разработке их теории, построенной на точных уравнениях.

Этот основополагающий труд был по достоинству оценен ведущими специалистами в области теории гироскопов. В нем были впервые поставлены и решены многие задачи, имеющие несомненное как теоретическое, так и прикладное значение. Для Б.В. Булгакова характерно сочетание теоретического и инженерного подходов. Наряду с детальным исследованием динамики устройств им приведены краткие исторические данные и описания конструкций приборов. Проведено также тщательное изучение влияния качки и маневрирования корабля на точность показаний гироскопических устройств. А.Ю. Ишлинский отмечал [56, с. 84], что несомненной заслугой Бориса Владимировича является “систематическое изучение поведения гироскопических приборов на подвижном основании”. Монография Б.В. Булгакова получила широкий отклик и за рубежом: в 1940 г. в “Zentralblatt für Mechanik und

Werkstoffforschung” был опубликован реферат E. Schmid’a [107], посвященный этой книге.

Эта уже ставшая классической монография состоит из Введения и шести глав.

Во Введении приводятся элементы общей теории динамики твердого тела, вводятся основные понятия и описываются свойства быстро вращающегося симметричного гироскопа, который Булгаков определяет как “твердое тело, одна из точек которого  $O$  как-либо закреплена, а эллипсоид инерции относительно этой точки есть эллипсоид вращения” [11, стр. 9].

В монографии детально разобрана динамика гироскопического маятника, который представляет собой гироскоп в кардановом подвесе, центр тяжести которого смещен относительно точки подвеса вдоль оси фигуры. Такой гироскоп совершает прецессию около оси, сохраняющей неизменное направление в инерциальном пространстве. Это свойство позволило использовать гироскопический маятник в качестве “чувствительного элемента” большинства гироскопов – приборов, предназначенных для определения местной вертикали или перпендикулярной к ней горизонтальной плоскости. С помощью гироскопов в морском деле восстанавливают местоположение корабля, определяя высоту какого-либо небесного светила над горизонтальной плоскостью. В авиации такие приборы позволяют определить угол пикирования или угол кабрирования самолета.

Движение гироскопического маятника, центр тяжести которого лежит ниже точки опоры, представляет собой суперпозицию медленной прецессии и более быстрой нутации (дрожания). Ученый исследовал движение гироскопического маятника, находящегося на неподвижном основании под действием сил сопротивления среды. Им выяснено, что при наличии этих сил происходит затухание прецессии и нутации, составляющих движение гироскопа. При этом нутация всегда затухает быстрее прецессии.

Далее рассматривается поведение гироскопического маятника на подвижном основании. Булгаковым изучены погрешности, вызванные ускорениями движущегося судна, на котором установлен прибор, – так называемые баллистические девиации. Рассмотрены скоростные девиации гироскопического маятника, т.е. отклонения чувствительного элемента, обусловленные влиянием вращения Земли и переносной скоростью основания. Несмотря на то, что скоростные девиации довольно велики, они могут быть исключены из показаний прибора, так как закон их формирования известен.

Здесь Борис Владимирович обсуждает факт, впервые открытый Максом Шулером в 1923 г. [110] и имеющий большое значение не только в теории гироскопов, но и в теории инерциальной навигации: гироскопический маятник с периодом  $T^* = 84,4$  мин имеет только скоростные девиации, т.е. на него не влияют ускорения судна. Затем автор проводит оригинальное исследование гироскопического устройства, названного впоследствии бигироскопической вертикалью Шулера–Булгакова. Оно состоит из двух гироскопических маятников, вращающихся с периодом Шулера  $T^*$  в противоположных направлениях. Биссектриса осей этих гироскопов не име-

ет ни скоростных, ни баллистических девиаций. Этот факт имеет большое прикладное значение, так как гироскопические приборы, как правило, используются в целях навигации на движущихся кораблях или самолетах.

Далее автором рассматриваются конструкции некоторых гиригоризонтов. Борис Владимирович анализирует устройство искусственного горизонта, изобретенного в 1886 г. адмиралом Флерие и удостоенного премии Парижской Академии наук. Затем рассматриваются морской гиригоризонт Аншютца, принцип действия которого был изложен в статье [8] наряду с разработанной Булгаковым теорией этого прибора, и конструкция авиационного горизонта Аншютца, позволяющего определять поперечный крен самолета. Все эти приборы содержат гироскопический маятник, приводимый в быстрое вращение. Если его ротор прецессирует вокруг вертикали, то среднее положение экваториальной плоскости гироскопа определяет горизонтальную плоскость.

Однако гириомаятник нуждается в погашении собственных колебаний. Одним из устройств, предназначенных для этой цели, является гидравлический успокоитель. Для погашения колебаний в одной плоскости используется успокоитель, состоящий из пары сообщающихся сосудов, наполненных жидкостью и неизменно связанных с одним из кардановых колец. При наклоне оси гироскопа, вызывающем поворот этого кольца, жидкость начинает перетекать в нижний сосуд. Если бы жидкость перетекала мгновенно, то момент ее веса стремился бы увеличить наклон ротора и создавал эффект обращенного маятника. Однако вследствие инерции и вязкости жидкости происходит некоторое запаздывание, которое можно сделать таким, что момент веса жидкости приводит к погашению колебаний. Устройство, позволяющее гасить колебания гириомаятника в двух плоскостях, состоит из двух пар сообщающихся сосудов, связанных соответственно с внешним и внутренним кольцами кардана подвеса. Проведенное Булгаковым исследование уравнений движения гириомаятника, снабженного гидравлическим успокоителем, показало, что в этом случае невозможно получить гироскопический маятник, не имеющий баллистических девиаций (см. рис. 1 на с. 34).

Затем автор излагает ранее построенную им совместно с сотрудником МВТУ им. Н.Э. Баумана С.С. Тихменевым теорию авиационного гиригоризонта Сперри с воздуходувной радиальной коррекцией, применявшегося в авиации для ориентировки при слепом полете. Основные положения этой теории были опубликованы ими в статье [9].

Так же подробно излагается общая теория прецизионных гироскопических горизонтов с квазиупругой радиальной коррекцией. Основное отличие высоко прецизионных гироскопических устройств от рассматриваемых ранее приборов заключается в том, что в первых вредные сопротивления сведены к минимуму, что позволяет значительно расширить возможности выбора величин корректирующих моментов. В данной части монографии рассматривается случай квазиупругой радиальной коррекции, интенсивность которой пропорциональна соответствующим углам отклонения.

Пренебрегая моментами трения, автор выводит уравнения движения прибора, которые сводятся к линейному дифференциальному уравнению первого порядка. Общее решение полученного уравнения содержит три компоненты. Первая из них зависит от начальных условий и вызывается случайными погрешностями и возмущениями. Она одинакова для случаев неподвижного и движущегося основания и представляет сходящееся прецессионное движение вершины гироскопа по логарифмической спирали. Вторая компонента есть скоростная девиация, которая может быть вычислена по полученным Булгаковым уравнениям и исключена из показаний прибора. Последняя компонента – баллистическая девиация, возникающая при неравномерном движении судна, на котором установлен прибор. Изучение баллистической девиации представляет наибольший интерес для практики гироскопических приборов.

Ученый рассматривает прямолинейное равномерно-переменное движение и циркуляцию (движение по дуге окружности) основания и анализирует зависимости коэффициента баллистической девиации от конструктивных параметров прибора. При этом Булгаков приходит к выводу о выгодности периода  $T^*$ , так как он обеспечивает наименьшее значение максимальной баллистической девиации. Рассмотрение этих двух частных случаев оставляет все же открытым вопрос о возможности накопления баллистических девиаций, возникающих при отдельных маневрах, и об оценке получающегося при этом результирующего отклонения.

В связи с этим Булгаков ставит и решает задачу определения такого маневрирования основания, при котором накопленная баллистическая девиация будет максимальной, а также проводит вычисление этого максимального значения. При этом изменение скорости в процессе маневра судна, происходящее вследствие ускорения, рассматривается как некоторая фиксированная величина. Варьируя время полета, требуется определить величину ускорения, при которой отклонения оси фигуры за время маневра примут максимальное значение. Такой подход получил широкую известность как “задача Булгакова о накоплении возмущений” и положил начало интенсивно развившейся впоследствии теории оптимального управления.

Затем приводятся теория плоского гироскопического маятника, применяющегося в гирокомпасах и кренометрах, и теория гироскопов Фуко, которые к тому времени были уже достаточно хорошо исследованы такими учеными, как Е.Л. Николаи, А.Н. Крылов, Ю.А. Крутков, Б.И. Кудревич и др.

Отдельная глава посвящена техническим приложениям астатического гироскопа, центр тяжести которого совпадает с точкой пересечения кардановых осей. Рассматриваются прикладные проблемы с некоторыми теоретическими обоснованиями. Описываются получившие широкое применение гироскопические приборы: направляющий аппарат торпеды Уайтхеда, указатель поворота самолета, авиационный полуконпас и гироскоп Сперри, гироскопический клинограф Сервела.

Особое значение имеют исследования Бориса Владимировича по динамике гироскопических компасов. Автором представлен краткий

исторический обзор всех принципиально важных попыток использования гироскопа для чисто механического определения направления на север, предпринятых к тому времени. Он приводит основы конструкции приборов Трувэ (1865), В. Томсона (1884), голландского министра Ванден-Боса, Аншютца (1904, 1908), А. Феппля (1904), Сперри (1909, 1911). Во всех рассмотренных приборах обеспечение горизонтального положения оси ротора гироскопа достигается не с помощью наложения жесткой механической связи, а путем создания упругого или маятникового момента. Указанный восстанавливающий момент возрастает вместе с ростом угла отклонения оси фигуры от горизонтальной плоскости, вследствие чего этот угол остается достаточно малым. Кроме того, Борис Владимирович упоминает исследования О. Мартинссена (1906), М. Шулера и Б.И. Кудревича.

Несмотря на различие конструкций рассмотренных гироскопов, принцип их действия основан на единой схеме. В них используется идея Л. Фуко, заключающаяся в том, что на чувствительный элемент гироскопа накладывается такая механическая связь, которая позволяет оси гироскопа перемещаться только в горизонтальной плоскости. Таким образом, в инерциальном пространстве ось ротора вместе с этой плоскостью вращается вокруг полуденной линии. Это позволило Булгакову развить теорию, общую для всех моделей.

Рассматривая простой маятниковый гироскоп, ротор которого вращается против часовой стрелки, если наблюдатель смотрит с севера на юг, Борис Владимирович сначала выводит для него уравнения малых колебаний. При этом он учитывает, что основание, на котором установлен прибор, перемещается по поверхности земного шара, а не связано с ним неподвижно. (Напомним еще раз, что гироскопические приборы создавались, как правило, в целях навигации для определения направления на движущихся кораблях или самолетах.) Немаловажным представляется и то обстоятельство, что Борис Владимирович учитывал не только массу самого гироскопа, но также массу кожуха и плавающего в сосуде с жидкостью поплавка, на котором установлен кожух, т.е. всего “чувствительного элемента”.

Рассматривая задачу в самом общем виде, автор при помощи принципа Даламбера получает точные уравнения движения гироскопа, основываясь на которых, последовательно развивает строгую теорию поведения данного прибора.

Сначала Борис Владимирович исследует движение гироскопа на неподвижном относительно Земли основании. В этом случае вертикальная составляющая угловой скорости вращения Земли  $U$  вызывает гироскопический момент. В результате ось фигуры находится в равновесии не в строго горизонтальном положении, а в положении, когда она наклонена под некоторым углом  $\beta^*$  в плоскости меридиана. При этом северный конец оси гироскопа должен быть приподнят над горизонтальной плоскостью в северном полушарии и опущен – в южном.

Из-за северной составляющей угловой скорости вращения Земли  $U$  возникает другой гироскопический момент, направленный по вертикали. Он носит название направляющего момента и исчезает только в

плоскости меридиана. Таким образом, гирокомпас имеет лишь два положения равновесия, причем если его ротор вращается около положительного направления оси фигуры против часовой стрелки, то равновесие будет устойчивым только на северном направлении.

Допустим теперь, что ось фигуры отклонилась от положения равновесия, например к востоку, сохраняя нормальный угол подъема  $\beta^*$ . Под действием направляющего момента она начнет подниматься и угол подъема возрастет. В результате восстанавливающий момент заставит ось гироскопа прецессировать к меридиану, но не остановится здесь, так как угол подъема будет возрастать, вследствие чего вершина гироскопа начнет, опускаясь, отклоняться к западу. Если проследить за ее движением дальше, выяснится, что ось фигуры гирокомпаса, опора которого неподвижна относительно Земли, совершает незатухающие колебания около положения равновесия.

После этого автор получает уравнения этих колебаний гирокомпаса с неподвижной относительно Земли точкой опоры. Движение оси фигуры представляет собой комбинацию двух колебаний: медленной прецессии и быстрой нутации. С увеличением собственного момента гироскопа  $H$  период прецессии сначала убывает, достигая своего минимального значения, а затем опять начинает увеличиваться.

Борис Владимирович приходит к выводу о крайней невыгодности малых периодов прецессии. В самом деле, именно возможность получения больших периодов колебаний гирокомпаса, позволяющих сделать его мало чувствительным к быстрым колебаниям корабля, составляет одно из основных преимуществ этого гироскопического прибора. Другим положительным следствием увеличения собственного момента ротора является то, что при этом уменьшается влияние на гироскоп случайных вредных моментов.

Выяснив, каково будет поведение гирокомпаса на неподвижном основании, Булгаков переходит к изучению движения прибора на движущемся корабле. Характер движения компаса не изменится, если основание, на котором он установлен, движется поступательно равномерно и прямолинейно. Однако мы не можем удовлетворить этим условиям на движущемся корабле вследствие шарообразности Земли. Ускорения, вызываемые перемещением судна по поверхности земного шара, должны оказывать на гирокомпас существенное влияние, если учесть, что этот прибор чувствителен даже к такому, казалось бы, незначительному фактору, как угловая скорость суточного вращения Земли вокруг своей оси.

Рассматривая перемещение судна по поверхности земного шара, автор пренебрегает влиянием восточной составляющей скорости корабля, так как она мала по сравнению с переносной скоростью  $RU\cos\varphi$ , являющейся следствием вращения Земли. Кроме того, он отбрасывает “маятниковые” инерционные моменты, почти не влияющие на основное прецессионное движение гироскопа. На основании полученных уравнений движения гирокомпаса Булгаков последовательно рассматривает поведение оси гироскопа при различных характерах перемещений судна по поверхности земного шара.

При движении основания с постоянной скоростью и курсом эллиптические колебания вершины гироскопа совершаются около смещенного положения равновесия ( $\varphi^*$ ,  $\beta^*$ ), где

$$\alpha^* = \frac{V_N}{RU \cos \varphi}. \quad (3)$$

Здесь  $V_N$  – северная составляющая скорости судна;  $R$  – радиус Земли;  $U$  – угловая скорость земного вращения.

При движении в сторону севера ось гироскопа отклонится на угол  $\alpha^*$  к западу, при южном курсе – на тот же угол  $\alpha^*$  к востоку. Угол отклонения положения равновесия оси гироскопа от полуденной линии  $\alpha^*$  называется скоростной или курсовой девиацией гироскопа. Эта погрешность является следствием того, что перпендикулярная оси фигуры ось инерции стремится установиться по абсолютной скорости основания, причем эта последняя складывается из скорости вращения Земли и относительной скорости судна и лежит в горизонтальной плоскости.

Таким образом, при движении корабля с постоянной скоростью и курсом в показания гирокомпаса необходимо внести поправку, которую можно определить, зная широту места, а также курс и скорость судна. В некоторых моделях компасов, например в гирокомпасах Сперри, предусмотрено специальное устройство, которое вводит необходимую поправку механически.

Рассматривая более сложные случаи равноускоренного перемещения основания гироприбора с постоянным курсом и циркуляцию судна по кругу с постоянной угловой скоростью, ученый выясняет, что кроме нормального возвышения оси фигуры  $\beta^*$  и скоростной девиации  $\alpha^*$ , имевших место при движении с постоянной скоростью, теперь появляется дополнительная девиация, зависящая от ускорения. Она носит название баллистической и убывает с возрастанием периода прецессионных колебаний гирокомпаса. Если же этот период равен периоду Шулера  $T^* = 84$  мин 24 с, баллистическая девиация исчезает вовсе.

Далее Булгаков доказывает на основе общих уравнений колебаний гирокомпаса весьма важное утверждение о том, что при отсутствии затухания гирокомпас с периодом  $T^* = 84,4$  мин не будет иметь баллистических девиаций не только в рассмотренных выше частных случаях, но и при любом движении судна. Этот факт был обнаружен в 1910 г. М. Шулером [108], в честь которого и был назван период  $T^*$ .

Итак, при любом отклонении от положения равновесия гирокомпас начинает совершать эллиптические колебания, которые нуждаются в погашении для эффективного использования этого прибора на практике в целях навигации. Как и в случае гирогоризонта, повышенные требования к точности прибора не позволяют использовать для этой цели силы сопротивления. Поэтому для погашения колебаний гирокомпаса инженерами были разработаны специальные приспособления. В своей монографии Борис Владимирович рассмотрел наиболее важные из них.

Сначала автор приводит детальное исследование двух способов погашения колебаний гирокомпаса, использующих пару сил с вертикаль-

ной осью. В первом из них – способе воздушных струй Аншютца – следующим образом использована идея Герона Александрийского. В кожухе прибора сделаны два отверстия – вблизи оси ротора и с краю. Момент реактивного давления воздуха направлен по оси фигуры. Второй способ – способ эксцентрического подвешивания Сперри – состоит в том, что тяжелый маятник серповидной формы, повторяющий с помощью следящей системы качания кожуха вокруг его оси, соединяется с камерой в точке, несколько смещенной к востоку от наинизшей ее точки. В некоторых своих гирокомпасах Сперри использовал для этого соединения плоский гироскопический маятник, чтобы предотвратить влияние качки. Тяжелый маятник действует на ротор с силой, момент которой перпендикулярен плоскости, содержащей ось фигуры гироскопа и точку соединения маятника с кожухом.

Ученый выводит уравнения движения, которые в обоих случаях будут одинаковыми. Полученное им решение определяет затухающие колебания около положения равновесия ( $\alpha^* + \alpha^{**}, \beta^*$ ), где  $\alpha^{**}$  – девиация затухания.

Булгаковым найдены достаточно простые закономерности, которым подчиняются скоростные девиации и девиации затухания. Поэтому они могут быть найдены и исключены из показаний прибора. Наиболее важным представляется исследование баллистических девиаций, которые при наличии демпфирования, как выяснилось, невозможно совершенно устранить независимо от величины периода собственных колебаний гирокомпаса. С помощью уравнения энергии автор находит точные формулы для баллистических девиаций устройства, позволившие рассмотреть влияние на поведение прибора отдельного маневра.

Завершается исследование гирокомпаса, колебания которого гасятся с помощью пары сил с вертикальной осью, постановкой и решением знаменитой “задачи Булгакова о накоплении возмущений”, которая заключается в отыскании последовательности эволюций корабля, обеспечивающей максимальное значение баллистической девиации, а также нахождения этого максимума. Полученная величина позволяет оценить баллистические девиации, которые прибор может получить при произвольном движении судна.

Погашение собственных колебаний гирокомпаса возможно также при помощи пары сил с горизонтальной осью. Такое демпфирование осуществляет, например, гидравлический успокоитель, который был разработан М. Шулером и использовался в компасах фирмы Аншютца с 1911 г. (рис. 3). Напомним, что это устройство состоит из двух сообщающихся сосудов с достаточно вязкой жидкостью – маслом, глицерином или ртутью. При наклоне прибора в вертикальной плоскости жидкость перетекает в нижний сосуд. Благодаря запаздыванию обратного момента веса жидкости по отношению к изменениям угла подъема оси фигуры происходит погашение колебаний. Булгаковым построена теория гирокомпаса с гидравлическим успокоителем и определены его баллистические девиации.

При использовании гирокомпасов Аншютца и Сперри на практике выяснилось, что при качке оба прибора подвержены существенным де-

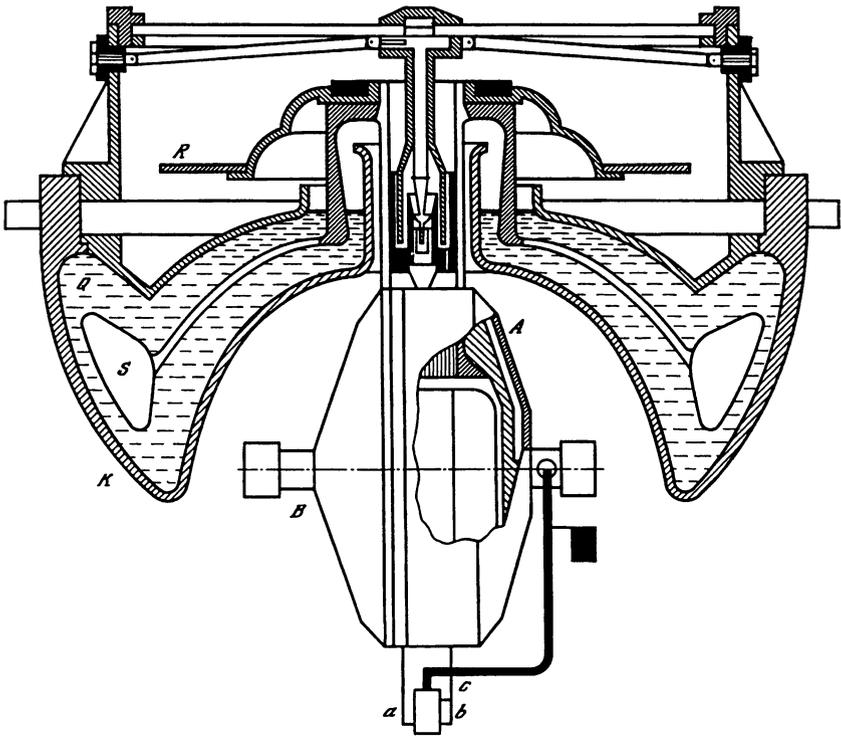


Рис. 3. Первая модель гирокомпаса Аншютца

виациям, хотя предполагалось, что результаты действия моментов сил инерции, возникающих при качке, будут компенсироваться, поскольку эти моменты постоянно меняют знак. Испытания показали, что соответствующие девиации достигают максимального значения, когда корабль идет одним из интеркардинальных курсов NE, NW, SE, SW, и не возникают только на кардинальных курсах N, S, E, W, вследствие чего девиация получила название интеркардинальной. Ее причина заключается в том, что восточная составляющая ускорения судна вызывает колебания чувствительного элемента вокруг оси ротора. Колебания эти характеризуются переменным углом поворота  $\gamma$ , меняющим знак в такт качке. Поэтому вертикальная составляющая произведения этого угла на момент, происходящий от северной составляющей ускорения корабля, возникающей благодаря этим колебаниям, имеет постоянный знак и вызывает девиацию. Ученый получил формулу, определяющую интеркардинальную девиацию гирокомпаса при отсутствии затухания.

Объяснение явления интеркардинальной девиации вызвало активные поиски способов ее устранения. Многие инженеры и конструкторы гироскопических устройств работали над этой проблемой. Были найдены различные ее решения. Булгаковым изложен принцип действия наи-

более существенных из них. С целью устранения интеркардинальной девиации Аншютц стал использовать многороторные компасы. Колебания этих устройств в углу  $\gamma$  очень малы благодаря соответствующей гироскопической стабилизации всего поплавка. Сперри ввел блуждающее соединение маятника с гироскопом, гироскопически стабилизировав это соединение относительно вертикали. Другие конструкторы для того чтобы предотвратить влияние качки, применили комбинацию горизонтального и вертикального гироскопов, соединив таким образом гироскоп с гироскопом. Таковы, например, гироскопы Мартинссена–Галилео и Беген–Монфрэ–Карпантье.

Далее Булгаковым исследуются полигироскопные системы. Разработка их теории представляет значительный интерес, поскольку конструкция большинства современных гироскопов содержит и связанный с ними гироскоп, с помощью которого погашаются колебания. Для таких систем ученым установлен важный принципиальный факт: для коррекции подобных конструкций могут быть использованы силы взаимодействия между гироскопами. В этом заключается одно из преимуществ полигироскопных систем. Дело в том, что устройства, вводимые в одногироскопные системы для предотвращения влияния качки на показания прибора, сами вносят дополнительные возмущения. Б.В. Булгаков вывел необходимое условие затухания собственных колебаний полигироскопного компаса, один из гироскопов которого вертикален, а другой горизонтален.

Автор также рассматривает пространственные гироскопы, оси которых гироскопически стабилизированы по трем направлениям восток–север–зенит. Существенным преимуществом таких приборов является то, что их параметры могут быть подобраны таким образом, что единственной существенной скоростной девиацией будет азимутальная девиация. А если оба гироскопа удовлетворяют условию Шулера, то при отсутствии затухания баллистические девиации будут равны нулю.

Далее рассматриваются непосредственные гироскопические стабилизаторы, применяющиеся для погашения колебаний какой-нибудь механической системы путем рассеяния ее энергии. Такими стабилизаторами являются, например, плоский гироскоп, успокоители качки судов пассивного и активного типов, применяющиеся для успокоения бортовой качки на кораблях, поскольку такая качка может вызвать достаточно серьезные последствия вплоть до опрокидывания судна.

Успокоители качки судов представляют собой гироскоп большого размера, ось фигуры которого для получения максимального гироскопического эффекта располагается перпендикулярно к вектору угловой скорости колебаний корабля, совпадающей с продольной осью судна. Колебания корабля вызывают гироскопические моменты и передаются гироскопу, который начинает прецессировать в плоскости, проходящей через продольную ось корабля и положение равновесия оси фигуры гироскопа. Качания гироскопа относительно судна каким-либо образом гасятся, в результате чего энергия всей системы в целом рассеивается, и качания судна тоже будут затухать.

Один из первых гироскопических успокоителей качки такого типа был предложен английским инженером Генри Бессемером в 1875 г. для стабилизации одной из кают на пароходе "Bessemer". Эта попытка оказалась неудачной, так как ось гироскопа была неизменно связана с каютой, и гироскоп не мог прецессировать относительно нее. Вследствие этого никакого стабилизирующего эффекта не могло быть получено. Более удачной был гироскопический успокоитель качки судов пассивного типа, предложенный в 1904 г. Отто Шликом, главным сюрвейером Гамбургского классификационного общества. Эта система была предназначена для стабилизации всего судна и успешно прошла испытания. Теория этой гироскопической системы была разработана в трудах самого О. Шлика [105, 106], а также Г. Лоренца, А. Феппля [89, 90], А. Зоммерфельда и Ф. Нетера [103].

Булгаков подробно рассматривает свободные и вынужденные колебания успокоителя Шлика, а также параметры, повышающие эффективность прибора. Кроме того, он указывает на усовершенствование системы Шлика – систему парных гироскопов, вращающихся в разные стороны. Такие установки предлагались Скечем, компанией Сперри в 1914 г., а через 10 лет инженером Фиё. Дело в том, что при торможении прецессии гироскопа, а также при килевой качке гироскопический успокоитель Шлика развивает гироскопические моменты, способствующие качке. В случае работы системы двух гироскопов, вращающихся в противоположные стороны, при этих условиях вредные моменты взаимно уничтожаются; полезные же гироскопические моменты, способствующие затуханию бортовой качки, складываются.

Далее Булгаков рассматривает успокоители качки судов активного типа. В этих устройствах используется какой-либо источник энергии для обеспечения режима работы успокоителя, повышающего его эффективность, – полного торможения прецессии гироскопа в конце каждого размаха и ускорения в противоположном направлении в начале следующего. Для осуществления последней операции необходим подвод мощности от какого-либо двигателя, благодаря чему гироскопические системы такого вида и получили название активных. Булгаков рассмотрел конструкцию активного успокоителя, предложенного в 1911 г. Э.А. Сперри, в котором для ускорения прецессии использован электродвигатель, автоматически управляемый вспомогательным гироскопом. В качестве примера приводится несложная теория однорельсовой железной дороги, устойчивость которой достигается только искусственным путем, для чего и может быть использован гироскоп. Проект такой железной дороги был в 1909 г. предложен почти одновременно Л. Бреннаном и А. Шерлем и П.П. Шиловским.

Затем автор анализирует движение брошенного вращающегося тела. Этот вопрос имеет практический интерес, например в артиллерии при стрельбе снарядами, имеющими продолговатую форму. Невращающийся снаряд под действием сопротивления воздуха будет кувыркаться, что увеличит лобовое сопротивление и приведет к уменьшению дальности полета. Если же снаряду сообщить вращение, например с помощью винтовой нарезки в стволе орудия, то он приобретет все свойства гироскопа.

скопа. Сила сопротивления воздуха вызовет его прецессию вокруг оси, касательной к траектории центра тяжести снаряда. Булгаков исследовал приближенные уравнения движения такого снаряда, в которых медленно меняющиеся величины силы сопротивления воздуха и угловой скорости вращения снаряда вокруг оси, перпендикулярной плоскости стрельбы, заменены их средними значениями. Получаемое приближенное решение задачи показывает, что при движении снаряда среднее положение его оси несколько отклонено от плоскости стрельбы, а сама ось снаряда прецессирует вокруг этого среднего положения.

Заключительная глава работы посвящена изложению общей теории гироскопа, основанной на точных уравнениях его действия. Изложенные результаты имели большое значение для развития теории гироскопов, поскольку Б.В. Булгаковым приведены решения многих актуальных задач гироскопии. Причем им использованы уравнения, выходящие за рамки прецессионной постановки.

Сначала Борис Владимирович рассматривает регулярную прецессию, представляющую вращение гироскопа с постоянной угловой скоростью вокруг некоторой оси, которая сама совершает вращение с постоянной угловой скоростью вокруг оси, называемой осью прецессии, проходящей через точку опоры и сохраняющей неизменное направление в пространстве. Он проводит классификацию регулярных прецессий, основанную на сравнении углов между векторами полной мгновенной угловой скорости гироскопа и ее составляющими, направленными по оси фигуры и оси прецессии.

В приведенном затем исследовании свободной и вынужденной регулярной прецессии ученый в значительной мере повторяет результаты первой части статьи [5]. Свободная регулярная прецессия совершается гироскопом, к которому не приложено никаких активных сил и не наложены никакие связи. В противном случае регулярная прецессия будет вынужденной. Это имеет место, например, для гироскопа в кардановом подвесе, внешнее кольцо которого приводится во вращение с постоянной угловой скоростью, а внутреннее кольцо жестко скрепляется с внешним таким образом, чтобы ось гироскопа составляла постоянный угол с осью прецессии. Большой интерес представляет, однако, движение гироскопа, когда внешнему кольцу карданова подвеса сообщается постоянная угловая скорость, но внутреннее кольцо при этом остается свободным. Как указывалось выше, в данном случае уравнения движения гироскопа могут быть разрешены точно.

Затем Борис Владимирович исследует движение гироскопа в сопротивляющейся среде, используя аппарат сферической геометрии. Эта задача уже была решена им во второй части работы “Две задачи из теории волчка” [5]. Он указывает на обнаруженный им случай, когда характер изменения кинетического момента отличается от того, на который указывали Клейн и Зоммерфельд. Этот случай имеет место, когда момент сопротивления относительно оси фигуры уравнивается активным вращающим моментом таким образом, что угловая скорость собственного вращения гироскопа сохраняет постоянную величину.

В этом исследовании ученый использует систему шести фазовых координат, введенную им в статье [10]. Эта система координат впоследствии получила имя Булгакова и широко использовалась многими авторами, поскольку она, “сводя задачу к уравнениям первого порядка, дает возможность наиболее ясно характеризовать изменение направления и величины вектора кинетического момента  $\Theta$ , колебания оси фигуры относительно кинетической оси и собственное вращение. Такие уравнения представляют интерес с точки зрения обоснования прикладной теории, так как для быстро вращающихся гироскопов эти составляющие движения обычно имеют свои специфические свойства, вследствие чего и практическое их значение совершенно различно” [11, с. 268].

Затем Булгаков выводит уравнения движения гироскопа относительно системы отсчета с началом в точке опоры гироскопа, но не участвующей в его вращении, а движущейся поступательно. Найденные уравнения Булгаков применяет для получения интегралов собственного вращения и “живых сил” относительного движения гироскопического маятника и гироскопа.

В заключение Булгаков указывает на поправки, которые необходимо внести в уравнения абсолютного движения некоторой точки по земной поверхности с учетом сжатия Земли.

Как уже отмечалось выше, книга была дважды переиздана, уже по-смертно. Оба издания были подготовлены к печати учеником Бориса Владимировича Булгакова, одним из ведущих отечественных гироскопистов профессором Я.Н. Ройтенбергом. Им были включены добавления, содержащие некоторые более поздние работы Б.В. Булгакова по прикладной теории гироскопов.

Во второе издание книги, увидевшее свет в 1955 г., вошли три добавления. В первом из них проведен анализ колебаний оси фигуры около кинетической оси и изложен метод вариаций постоянных применительно к теории гироскопов. Эта работа является одной из глав докторской диссертации Бориса Владимировича и впервые была опубликована целиком, хотя отдельные ее части публиковались ранее [10, 34]. Добавление 2 представляет собой статью [33], в которой приводится решение задачи о накоплении девиаций для случая гироскопического компаса Аншютца с демпфирующим устройством, удовлетворяющего условию М. Шулера. В добавлении 3 рассматривается схема силового четырехгироскопного горизонта. Это исследование было проведено Б.В. Булгаковым совместно с Я.Н. Ройтенбергом и впервые опубликовано в 1948 г. [22].

Третье издание, опубликованное в 1976 г., содержит еще два добавления. Добавление 4 содержит один из параграфов книги Бориса Владимировича “Колебания” [31, с. 827–839], в котором методами нелинейной механики исследовано движение гироскопического маятника под влиянием сил сухого трения. В последнем, пятом добавлении приведена ценная разработка Б.В. Булгакова (1938 г.) по теории системы инерциальной навигации. Это исследование было продолжительное время засекреченным. Первая его публикация осуществилась

лишь после смерти ученого – в 1969 г. в журнале “Механика твердого тела” [32].

Некоторые работы Б.В. Булгакова, а также ряд его изобретений на протяжении многих лет были засекречены ввиду их важности для оборонной промышленности. Например, изобретения [6] и [7], представляющие собой технические приложения некоторых теоретических исследований ученого о гироскопах. Сейчас доступ к ним открыт.

Подводя итог, еще раз отметим наиболее ценные результаты, полученные Б.В. Булгаковым в его докторской диссертации.

1. Главным достижением книги является строгая постановка и решение многих прикладных задач технической теории гироскопов.

2. Монография содержит теорию гироскопического гироскопа, гироскопических горизонтов, одно- и полигироскопных компасов, непосредственных гироскопических стабилизаторов. В ней рассмотрены различные приложения астатического гироскопа, а также общая теория движения симметричного гироскопа, основанная на точных уравнениях. Булгаков систематически исследовал поведение гироскопов на неподвижном основании, а затем изучал влияние качки и маневрирования корабля на точность показаний гироскопических устройств.

3. Булгаков рассмотрел гироскопы с периодом Шулера, не подверженные баллистическим девиациям, а также показал, что введение демпфирования лишает прибор этого свойства. При исследовании полигироскопных систем ученый установил, что для коррекции подобных конструкций могут быть использованы силы взаимодействия между гироскопами.

4. Развитию общей теории гироскопов способствовали работы Бориса Владимировича, исследующие вынужденную прецессию гироскопа, влияние сил сопротивления на движение свободного гироскопа, устойчивость колебаний гироскопов. Получила широкое распространение введенная Булгаковым система фазовых координат, оказавшая весьма удобной при изучении гироскопических свойств движения.

5. Как мы увидим позже, “задача Булгакова о накоплении возмущений”, возникшая в ходе решения конкретной навигационной задачи, была развита как в работах самого Б.В. Булгакова, так и в исследованиях других авторов. Она заключается в нахождении наилучшего режима работы гироскопического прибора и служит для оценки его погрешностей. Эта задача стала одной из первых постановок проблем теории оптимального управления и послужила заделом к дальнейшему развитию последней.

## **2.4. Теория колебаний**

При исследовании поведения гироскопических приборов Булгакову приходилось использовать аппарат теории колебаний. Поэтому нет ничего удивительного в том, что, начиная с 40-х годов, Борис Владимирович вплотную занялся разработкой теоретического аппарата этой по своей сути математической дисциплины, тесно связанной, однако, с изу-

чением движения сложных механических и физических систем. Монография Булгакова “Колебания” [31] является одной из первых книг, написанных учеными-механиками по этой сложной и сравнительно мало изученной в то время тематике. Ученого отличает физический подход к рассмотрению теории колебаний, многочисленные иллюстрации полученных им теоретических результатов на конкретных технических приложениях.

Большое значение имеют работы ученого, посвященные разработке новых методов теории нелинейных колебаний. Ведь в то время как теория малых, или, как их стали называть в дальнейшем, линейных колебаний была достаточно хорошо развита, необходимость построения строго обоснованного математического аппарата, который мог быть применен для систематического исследования нелинейных колебаний, была осознана только в 20-е годы нашего столетия. Это произошло в результате изучения новых явлений в механике и акустике, бурного развития радиотехники, в частности появления электронной лампы. Перед учеными встали новые проблемы, которые уже невозможно было решить методами линейной теории. Эти задачи требовали новых методов, радикально отличающихся от прежних.

Одним из таких методов является “метод медленно меняющихся коэффициентов” Ван-дер-Поля. Согласно этому методу исходные нелинейные дифференциальные уравнения путем соответствующей замены переменных сводятся к системе уравнений вида

$$\frac{dx_k}{dt} = \epsilon X_k(t, x_1, \dots, x_n) \quad k = 1, \dots, n \quad (4)$$

относительно “медленно изменяющихся” неизвестных  $x_1, \dots, x_n$ . Далее путем применения к ним “принципа осреднения”, т.е. заменой их правых частей соответствующими осредненными по времени выражениями, получают приближенные уравнения Ван-дер-Поля.

Строгое математическое обоснование применимости метода Ван-дер-Поля в случае, когда функции  $X_k$  в правых частях уравнений (4) являются периодическими функциями времени  $t$ , было дано Л.И. Мандельштамом и Н.Д. Папалекси [68]. В 1937 г. Н.М. Крылову и Н.Н. Боголюбову удалось показать законность перехода к осредненным уравнениям также и для тех случаев, когда зависимость  $X_k$  от времени является квазипериодической [58]. Значительный результат в этом направлении был получен в 1945 г. Н.Н. Боголюбовым. В работе [52] им было доказано, что достаточным условием применимости метода осреднения является лишь существование среднего значения по времени правых частей осредняемых дифференциальных уравнений.

Существенный вклад в эту область исследований внесла публикация Б.В. Булгакова [34], увидевшая свет в “Compositio Mathematica” в 1940 г. В ней методы “укороченных” уравнений Ван-дер-Поля получили свое дальнейшее развитие и обоснование путем построения бесконечного процесса, сходящегося к точному решению. Для этого интервал, на котором требуется получить решение, разбивается на подынтер-

валы. Решение на каждом подынтервале получается путем использования метода последовательных приближений с конечным числом итераций. При этом для самой первой аппроксимации используются начальные условия исходных дифференциальных уравнений. Начальными значениями неизвестных для аппроксимации на каждом последующем интервале служат их значения в конце предыдущего подынтервала.

В работе доказывается сходимость такого приближения к точному решению; показано, что сходимость можно получить двумя различными способами: либо путем увеличения количества итераций, либо уменьшением максимального значения абсолютной величины подынтервалов.

Такой подход дает возможность уточнять результаты, получаемые с помощью метода Ван-дер-Поля, который позволяет найти только первое приближение. Несмотря на то, что для большинства задач, встречающихся на практике, вполне достаточно отыскания первого приближения, Булгаковым построено также и второе приближение, для чего потребовался расширенный математический аппарат и многочисленные громоздкие выкладки. Используя расчеты, предложенные Булгаковым, можно вычислить более высокие приближения, которые имеют большое принципиальное значение не только сами по себе, но также и при оценке точности первого приближения.

Статья [34] представляет собой часть одной из глав докторской диссертации ученого. Эта глава была включена во второе издание монографии [11] в качестве первого добавления. Кроме того, перевод этой статьи с французского языка, выполненный А.Н. Обморшевым, является приложением к монографии [31].

Это научное исследование Булгакова получило широкий отклик в нашей стране и за рубежом. В издаваемом Американским математическим обществом журнале "Mathematical Review" был помещен реферат Д.С. Льюиса [99], посвященный данной работе.

Развитию того же вопроса посвящена вышедшая из печати в 1942 г. работа Булгакова "О применении метода ван-дер-Поля к псевдолинейным колебательным системам со многими степенями свободы" [13]. В 1946 г. был опубликован ее перевод на английский язык [36]. В этой статье, основываясь на принципе осреднения, ученый построил приближенные дифференциальные уравнения механической или электрической системы в предположении, что затухание является незначительным и отсутствуют внешние возмущения.

Работа [13] представляет собой расширение результатов Н.М. Крылова и Н.Н. Боголюбова, которыми был исследован частный случай системы, характеризующейся после исключений псевдолинейным уравнением любого конечного порядка с нелинейным выражением, зависящим лишь от одной координаты. Булгаков перенес метод Ван-дер-Поля на системы со многими степенями свободы и многими нелинейными функциями. При этом использовано найденное им эффективное преобразование к нормальным координатам.

---

\* Сохранена авторская орфография.

Автор рассмотрел первоначальные дифференциальные уравнения вида

$$\sum_{k=1}^n f_{jk}(D, \mu)x_k = \mu\varphi_j(x_1, \dots, x_n), \quad j = 1, \dots, n, \quad (5)$$

где  $D$  – дифференциальный оператор;  $f_{jk}(D, \mu) = f_{jk}(D) + \mu\beta_{jk}(D)$ .

Эта система содержит малый параметр  $\mu$  и называется псевдолинейной. Булгаковым получены приближенные уравнения, которые могут быть использованы для исследования колебательного процесса.

Статья содержит в качестве примера такого исследования приложение метода к конкретной задаче учета влияния вязкого сопротивления воздуха и сухого трения в опорах карданова подвеса на прецессию и нутацию гироскопического маятника. Применение предложенной ученым специальной формы метода Ван-дер-Поля приводит к хорошо известному из практики факту, что под действие сил сопротивления, как вязких, так и сухих, нутационное движение, имеющее высокую частоту затухает быстрее, чем более медленная прецессия. Причем в случае сухого трения характерным является то, что как нутационные, так и прецессионные колебания полностью погашаются за конечный промежуток времени.

Другим самостоятельным методом нелинейной механики является метод малого параметра, разработанный Анри Пуанкаре. Суть его в том, что вместо исходной нелинейной системы уравнений вводится некая “рождающая” линейная система, являющаяся первым приближением исходной системы по малому параметру  $\mu$ . Периодическое решение этой линейной системы, описывающее колебательный процесс, рассматривается как первое приближение искомого периодического решения исходной нелинейной системы, т.е. получается из последнего при  $\mu \rightarrow 0$ . К сожалению, область применения этого метода на практике, так же как и метода Ван-дер-Поля, довольно узка из-за его излишней сложности.

В трудах отечественных ученых Л.И. Мандельштама и Н.Д. Папалекси [67], А.А. Андропова и А.А. Витта [50] в конце 20-х – начале 30-х гг. метод Пуанкаре был впервые применен к систематическому исследованию слабонелинейных колебаний, дифференциальные уравнения которых отличаются от линейных с постоянными коэффициентами лишь на малую величину.

В статье “О применении метода А. Пуанкаре к свободным псевдолинейным колебательным системам” [12], опубликованной в 1942 г., Булгаков распространил метод малого параметра на псевдолинейные системы со многими степенями свободы и многими нелинейными функциями. Он рассмотрел механическую, или электрическую колебательную систему, определяемую дифференциальными уравнениями

$$\sum_{k=1}^n f_{jk}(D, \mu)x_k = \mu\varphi_j(x_1, \dots, x_n, \mu), \quad j = 1, \dots, n, \quad (6)$$

где, по-прежнему,  $D$  – дифференциальный оператор;  $f_{jk}(D, \mu)$  – полиномы относительно  $D$  конечных степеней. Нелинейные члены в правых

частях содержат малый множитель  $\mu$  и рассматриваемая система является псевдолинейной.

На основании теории Пуанкаре ученый нашел периодическое решение дифференциальных уравнений, описывающих колебания системы, представляющее важный тип установившихся колебаний.

Эта работа является обобщением результатов, полученных Г. Бернгаузеном и Г. Мёллером, а также Н.М. Крыловым и Н.Н. Боголюбовым, которые разными путями исследовали частный случай поставленной выше задачи. Ими было получено периодическое решение такой псевдолинейной колебательной системы, когда лишь одна из функций  $\varphi_j$  отлична от нуля и зависит только от одной неизвестной  $x_k$ .

Булгаковым найдена эффективная форма метода Пуанкаре, которая позволяет находить периодическое решение псевдолинейных дифференциальных уравнений со многими нелинейными функциями. При этом определение “порождающих амплитуд”, т.е. амплитуд периодического решения упрощенной “порождающей” линейной системы, сводится к графическому построению, которое позволяет судить и об устойчивости периодического решения.

Совершенно новым представляется также применение этого метода к объяснению угловых автоколебаний следящих систем, приведенное автором в заключение данной работы. Такие системы представляют собой устройства, целью которых является воспроизведение некоторой “следящей” осью всех угловых движений другой, “дающей” оси с минимальным запаздыванием. Следящая система устроена так, что как только рассогласование углового поворота следящей и дающей осей превышает по абсолютному значению некоторую малую величину, замыкается электрический контакт. В результате начинает действовать электромотор, который вращает следящую ось так, чтобы рассогласование уменьшалось. Такие системы используются, например, в опорах чувствительных элементов гирокомпасов для того, чтобы уменьшить силы трения и позиционные силы, противодействующие движению чувствительного элемента. Из опыта известно, что при следовании системы за дающей осью всегда возникают угловые автоколебания. Теоретическое обоснование этого факта приведено Борисом Владимировичем в настоящей работе.

Полученные им результаты позволяют судить об устойчивости периодических колебаний. Автором выяснено, что затухающие колебания могут быть вызваны только очень малыми начальными возмущениями системы. На практике всегда могут встретиться умеренные возмущения, результатом которых будет возникновение колебаний, раскачивающихся до некоторой постоянной предельной амплитуды. Такие незатухающие колебания в следящих системах гирокомпасов приводят к добавочному снижению действия сил трения в опорах, и поэтому считаются полезными. При более значительных начальных возмущениях следящих систем приводится в действие мотор, вследствие чего колебания затухают, но лишь до той же самой предельной амплитуды.

Эта работа Булгакова была переиздана на английском языке в 1943 г. [35].

В первой половине нашего века получила широкое развитие теория автоматического регулирования и управления движением различных механизмов и агрегатов. Этой тематике было посвящено множество статей. Но, как правило, в них был использован исключительно аппарат линейных дифференциальных уравнений. Несмотря на то, что он позволял получить многие существенные результаты и расчетные формулы, ряд важных явлений, связанных с нелинейностью, оставался необъясненным. Б.В. Булгаков был одним из первых ученых, осознавших существенность нелинейности дифференциальных уравнений движения таких систем и проследивших характер ее влияния на примерах конкретных задач.

Например, в работе “Автоколебания регулируемых систем” Борис Владимирович исследовал автоматически регулируемые системы с сервомотором, приводящим в действие орган управления, а также с обратной связью и искусственным демпфированием. Эта статья была издана дважды. Сначала в “Докладах Академии наук СССР” в 1942 г. вышел сжатый отчет об этой работе [14]. Более полная редакция, включающая все выкладки и рассуждения, была опубликована в следующем году в журнале “Прикладная математика и механика” [16].

Регулятором называется подсоединенное к некоторой механической системе устройство, которое управляет источником энергии этой системы так, чтобы некоторые ее координаты оставались вблизи заданных значений. Теория автоколебаний рассмотренных Борисом Владимировичем систем тесным образом связана с нелинейностью дифференциальных уравнений движения, в особенности уравнения, описывающего поведение сервомотора. Поэтому для изучения этих автоколебаний, ухудшающих работу регулятора, Булгаков применил метод Пуанкаре в специальной форме, предложенной им в статье [12] для вседолинейных систем. В результате исследования удается выяснить условия возникновения автоколебаний и способы их устранения. Впервые получено критическое значение коэффициента искусственного демпфирования, при котором работа регулируемого устройства будет наиболее эффективной. Знание этого критического значения существенно при проектировании таких систем. Эта работа является первым серьезным исследованием, в котором учтена нелинейность дифференциального уравнения, характеризующего состояние сервомотора и принято во внимание искусственное демпфирование.

В вышедшей в 1943 г. работе “К задаче о вынужденных колебаниях псевдoliniейных систем” [15] рассмотрен вопрос о вынужденных колебаниях консервативных систем с нелинейной характеристикой восстанавливающей силы. Показано, что в данном случае представляется удобным приведение укороченных уравнений Ван-дер-Поля к канонической гамильтоновой форме. Так как система консервативна, и функция Гамильтона не зависит от времени, то это позволяет получить обобщенный интеграл энергии, который дает возможность детально исследовать установившиеся колебания, приближенно определить их амплитуду и проверить устойчивость, а также изучить явления нелинейного резонанса и биений.

В вышедшей в 1944 г. работе “О преобразовании уравнений движения неконсервативных систем” [18] Борис Владимирович исследовал применение к неконсервативным системам сначала канонических, а затем произвольных преобразований. При этом он выводит преобразованные уравнения и показывает, используя метод вариации постоянных, каким образом они могут быть применены к вычислению возмущений. Результаты этой статьи позволяют перенести очень многие методы небесной механики на область технических колебаний и теории автоматического регулирования.

Большое значение имеет статья “О нормальных координатах” [19], опубликованная в 1946 г. В ней Булгаков строит эффективное преобразование исходных координат к нормальным координатам, в которых уравнения имеют наиболее удобный для исследования вид. Он реализует такое преобразование для линейных дифференциальных уравнений в самой общей их форме. До появления в печати этой работы были известны только общие условия существования нормальных координат, а форма самого преобразования еще не была получена. Булгаков рассмотрел систему линейных дифференциальных уравнений, взятых в форме Рауса–Айнса

$$\sum_{k=1}^n f_{jk}(D)x_k = y_j(t), \quad j = 1, \dots, n. \quad (7)$$

Относительно этих уравнений сделано только два общих предположения: а) определитель операционной матрицы  $\| f_{jk}(D) \|$  не равен тождественно нулю и б) все элементарные делители этого определителя линейны.

Булгаковым получены конечные формулы как для самого преобразования к нормальным координатам, так и для преобразованных уравнений. Им даны также полезные формулы для системы неизвестных, представляющих собой амплитуды и угловые переменные.

Для дальнейшего развития нелинейной теории, т.е. теории нелинейных колебаний, особенно важна та часть рассматриваемой работы, в которой результаты, полученные для системы линейных дифференциальных уравнений, перенесены на более широкий класс систем. Ученый нашел преобразование к нормальным координатам систем, отличающихся от системы (7) тем, что в них правые части заменены некоторыми вообще нелинейными функциями, зависящими не только от  $t$ , но также от неизвестных  $x_k$  и их производных. Преобразование таких систем к нормальным координатам доведено до конечных формул, которые могут быть применены при исследовании движения нелинейных систем, находящихся под воздействием возмущающих сил, в нормальных координатах.

Показано также, что в частном случае канонической системы рассматриваемое преобразование совпадает с тем, которое изучалось А.М. Ляпуновым, Т.Дж. Бромвичем и Е.Т. Уиттекером, а также Дж.Ф. Биркгоффом в основном в связи с астрономическими проблемами.

Полученное преобразование к нормальным координатам имеет большое значение для различных приложений, так же как и его более частная форма, рассмотренная Борисом Владимировичем в статье [20], целью которой было обобщение с помощью этого преобразования метода осреднения Ван-дер-Поля на нелинейные колебательные системы со многими степенями свободы и многими нелинейными функциями.

Работа [20] состоит из двух частей. В первой, теоретической части уравнения нелинейной колебательной системы сначала приводятся к нормальной форме, на основе которой затем получаются более простые приближенные уравнения.

Во второй части работы полученные теоретические результаты применены к системе, обладающей инерцией и естественной направляющей силой. Аргумент управления, пропорциональный открытию реле сервомотора, предполагается линейно зависящим от отклонения системы от желаемого состояния, скорости и ускорения этого отклонения, а также координаты органа управления, приводимого в действие сервомотором. Эффект силы инерции сервомотора и возмущающих внешних сил также частично рассмотрен. Принимаются во внимание не только установившиеся колебания, но и переходные процессы в их окрестности. С помощью уравнений движения показано, что регулирование по ускорению в некотором роде заменяют отсутствующую материальную обратную связь.

Основной целью этой части является исследование возможных устойчивых колебаний и установление областей допустимых значений параметров, которые обеспечивают удовлетворительную работу системы. Полученные результаты сведены в наглядную диаграмму. Расчет произведен, главным образом, с помощью приближенных уравнений Ван-дер-Поля, но для простой формы характеристики сервомотора приведены также точные периодические решения.

Работа "Об одной задаче автоматического регулирования с нелинейной характеристикой" [24] была написана Б.В. Булгаковым совместно с М.З. Литвиным-Седым. В ней рассмотрена задача автоматического регулирования с трехчленным аргументом управления и нелинейной характеристикой сервомотора. При этом важным шагом вперед является учет инерции сервомотора. Поставленная задача решается путем применения разработанного Булгаковым в [12] модификации метода малого параметра А. Пуанкаре. При конструировании автоматического регулятора большое значение имеют области его параметров, в которых система является абсолютно устойчивой. Поэтому на плоскости определенным образом выбранных параметров авторами построены области абсолютной устойчивости, абсолютной неустойчивости и периодических движений авторегулируемой системы, а также исследована устойчивость ее периодических движений.

Во многих вопросах синтеза регуляторов находит применение задача определения области, в которой все парциальные колебания линейной колебательной системы затухают по показательному закону. Эта область была названа Булгаковым областью аperiodической устойчивости. Разработанный им метод решения этой задачи изложен в

статье “Дискриминантная кривая и область аperiodической устойчивости” [25].

Суть метода в том, что на плоскости некоторых двух параметров, определенным образом связанных с коэффициентами характеристического уравнения рассматриваемой колебательной системы, выделяются области, соответствующие вещественности и отрицательности всех корней характеристического уравнения. Последняя и есть искомая область аperiodической устойчивости. Для этого на плоскости параметров строится такая кривая, что пары комплексных корней могут появляться и исчезать только в ее точках. Автор называет эту кривую дискриминантной, поскольку ее уравнение является следствием условия обращения в нуль дискриминанта исходного характеристического уравнения. Эта кривая разбивает плоскость параметров на области, в каждой точке которых рассматриваемый полином имеет одно и то же количество пар комплексных корней. Для того чтобы знать количество пар корней в каждой такой области, необходимо как-либо вычислить его в одной из областей, а также определить правило штриховки дискриминантной кривой, при котором переход с нештрихованной стороны на штрихованную обеспечивает обращение пары комплексных сопряженных корней в кратный действительный. Установлением такого правила штриховки и завершается статья [25].

В работе Б.В. Булгакова [27] изучены системы регулирования движения сложных звеньев, имеющих по несколько степеней свободы. Регулируемую систему можно представить в виде цепи, звеньями которой являются поле регулирования и части регулирующего устройства. Эта цепь будет не замкнута, если регулятор функционирует независимо от состояния поля регулирования. Однако в большинстве случаев состояние системы регистрируется специальными чувствительными элементами, а регулятор действует в соответствии с их показаниями, и цепь регулирования является замкнутой. В связи с этим одноконтурные замкнутые цепи рассмотрены особенно подробно. Для них получены матричные уравнения в вариациях и характеристический определитель, представляющий сумму характеристического определителя разомкнутой цепи и некоторого полинома. Полученное выражение для характеристического определителя позволяет изучать устойчивость системы обычным способом с помощью обобщенных для матричных цепей частотных критериев Найквиста и А.В. Михайлова или неравенства Рауса–Гурвитца.

В качестве примеров приложения теоретических выкладок приводятся автоматическое управление курсом корабля и гироскопический стабилизатор, рассмотренный Я.Н. Ройтенбергом в его статье [80]. Этот прибор, представляющий собой гироскоп с тремя степенями свободы, служит для удержания некоторой платформы в горизонтальном положении.

Большое значение имеют работы Б.В. Булгакова по синтезу корректирующих цепей, например работа [28]. В то время как работы других авторов, посвященные данному вопросу, были несколько односторонними – в них преобладающей являлась только одна точка зрения (тео-

ретическая либо практическая), тогда как другая сторона вопроса раскрывалась неполно, либо вообще не упоминалась – Булгаков впервые ставит и решает задачу проведения полного и всестороннего рассмотрения вопроса. При вполне общей постановке задачи работа содержит множество схем, представляющих интерес для техники. Таким образом, рассматриваемая статья представляет собой синтез исчерпывающего теоретического исследования, увязанного с потребностями инженерной практики, что, вообще, является характерным для всего творчества ученого.

В рассматриваемой статье дается эффективный метод реализации корректирующих цепей при помощи пассивных четырехполюсников, что является исключительно ценным в системах автоматического управления. Четырехполюсник представляет собой незамкнутый участок электрической цепи, имеющий две пары зажимов и преобразующий напряжения и токи на входе ( $x$ ) в некоторые значения этих величин на выходе ( $y$ ). Пассивным значением называется четырехполюсник, не содержащий источников энергии. В теории четырехполюсников не имеет значения внутренняя структура четырехполюсников, принимаются во внимание только соотношения между входными и выходными параметрами, выражаемые так называемой передаточной функцией. Поэтому теория четырехполюсников может быть применена не только к исследованию электрических цепей, но и в некоторых механических задачах.

Булгаковым доказана теорема о том, что любая рациональная функция  $P(D)/Q(D)$ , регулярная в замкнутой правой полуплоскости, может быть с точностью до постоянного множителя реализована как передаточная функция пассивного симметричного мостового (решетчатого) четырехполюсника или каскада таких четырехполюсников.

Передаточная функция каскада четырехполюсников равна произведению передаточных функций всех звеньев. Поэтому для реализации некоторой рациональной функции, удовлетворяющей условию указанной выше теоремы, можно представить ее в виде произведения дробных функций с числителем и знаменателем нулевой, первой или второй степени, а затем выбрать звенья каскада так, чтобы они реализовали соответствующие множители. Ученым были получены и указаны в виде таблиц все четырехполюсные звенья, реализующие дробные функции нулевого, первого и второго порядков.

Кроме того, им было показано каким образом симметричные решетчатые (мостовые) четырехполюсные звенья могут во многих случаях быть преобразованы к схеме симметричного решетчатого (мостового) Т-образного четырехполюсника. Таким образом, дается решение общей задачи. Очень важным для практики является и то обстоятельство, что в своем исследовании Борис Владимирович по возможности избегал идеальных элементов.

Весьма перспективной оказалась новая задача, относящаяся к теории оптимального управления. Она зародилась в процессе решения Б.В. Булгаковым конкретной навигационной проблемы и получила название “задачи Булгакова о накоплении возмущений” (она упоминалась выше). Эта задача возникает тогда, когда необходимо оценить



Борис Владимирович  
Булгаков

сверху возможное отклонение системы, находящейся под действием произвольных ограниченных по модулю внешних сил, от заданного положения.

В 1946 г. в “Докладах АН СССР” вышла представленная академиком Л.С. Лейбензоном работа Б.В. Булгакова [21], в которой была поставлена задача о накоплении возмущений в линейных колебательных системах с постоянными коэффициентами, находящихся под действием конечных сил. Аналогичная задача уже решалась Булгаковым при определении максимальной погрешности некоторых гироскопических измерительных приборов. Она встречается также при отыскании максимального отклонения от желаемого состояния автоматических регулируемых систем. Решая поставленную задачу, ученый находит наибольшие воз-

можные отклонения, когда лишь одна из возмущающих сил отлична от нуля. Вследствие независимости этих сил сумма найденных значений и дает общее решение.

Аналогичная задача для линейных систем с переменными параметрами исследована в статье [26], написанной Булгаковым в соавторстве с Н.Т. Кузовковым. Решение представлено в виде формулы, в которой результат действия всех возмущающих сил складывается из отклонений вследствие начальных возмущений и наибольшего отклонения за счет непрерывно действующих сил.

Следует отметить, что эта задача была первой задачей математической теории оптимального управления. Только в 1956 г. Л.С. Понтрягинным были получены более общие результаты. Впервые Б.В. Булгаковым было дано описание функционального множества кусочно-непрерывных функций, ограниченных по модулю, являющегося математической моделью возмущающих сил. В дальнейшем учеными это же описание было применено при постановке задач оптимального управления динамическими системами. Это же описание Б.В. Булгаков применил и для математического моделирования неопределенностей, возникающих при формировании управляющих сил [26], что привело к созданию теории абсолютной устойчивости.

В изложении теории колебаний Борис Владимирович часто использует операционное исчисление в сочетании с матричными обозначениями. Это дает в руки ученого удобный аппарат, позволяющий эффективно получать и компактно записывать решения дифференциальных

уравнений с постоянными коэффициентами с заданными начальными значениями. В статье “Об операционных решениях систем линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами” [17] он впервые в литературе приводит полное операционное решение таких систем самого общего вида, которые встречаются, например, в теории регулирования.

Опубликованная в 1952 г. в “Докладах АН СССР” работа [29] относится к исследованиям Бориса Владимировича по теории матричного исчисления. В ней доказаны некоторые теоремы о делении прямоугольных матриц.

В том же году, но уже посмертно вышла статья [30], в которой получены некоторые общие теоремы о равносильности и совместности систем линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. При этом предполагается, что число уравнений может быть не равным числу неизвестных. Случай их совпадения рассматривался Н.Н. Лузиным [66], однако, при выводе одной из теорем совместности таких уравнений им была допущена ошибка, которая исправляется Б.В. Булгаковым при помощи измененного определения ранга расширенной матрицы.

Как мы уже упоминали, последние шесть лет своей недолгой жизни Борис Владимирович Булгаков посвятил написанию фундаментальной монографии, содержащей полную и строгую теорию колебаний. Неоспоримой заслугой ученого является оригинальное изложение теории колебаний и автоматического регулирования, основанное на последовательном применении методов матричного и операционного исчисления, что позволило получить компактную общую форму описания теории линейных колебаний. Кроме того, специфической чертой этой книги является механический подход к объяснению теории, множество конкретных примеров, взятых из инженерной практики.

В 1949 г. Борис Владимирович завершил написание первых двух частей этого грандиозного труда, которые в том же году и были опубликованы. В них была изложена теория колебательных систем с одной степенью свободы. Несмотря на тяжелую болезнь, Булгаков продолжал работать над третьей частью своей книги, посвященной колебательным системам со многими степенями свободы, до конца своей жизни, но, к сожалению, вполне закончить ее так и не успел. Ученый совет механико-математического факультета Московского университета поручил возглавить работу по обработке оставшихся рукописей и подготовке монографии “Колебания” к опубликованию профессору Якову Наумовичу Ройтенбергу, ближайшему ученику и помощнику Б.В. Булгакова, принявшему после его кончины заведование кафедрой прикладной механики. При выполнении этой работы значительную часть вычислений, требовавшихся для построения графиков и таблиц первых двух частей, выполнил И.З. Пирогов. Неоценимую помощь при подготовке к печати третьей части книги оказала кандидат физико-математических наук И.А. Балаева. Следует отметить, что Борис Владимирович излагал материал очень лаконично, как по содержанию, так и по форме, часто использовал сложные математические выкладки, по-

этому на обработку записей, оставшихся после его смерти, потребовалось два года напряженного труда всей кафедры прикладной механики.

Полная редакция монографии “Колебания”, в которую вошли все три части, вышла в 1954 г. В это издание было также включено приложение “О движении, возмущаемом силами большой частоты”, представляющее собой выполненный А.Н. Обморошевым перевод упоминавшейся ранее статьи [34], опубликованной в 1940 г. в журнале “Compositio Mathematica” на французском языке. Монография Б.В. Булгакова сразу же заслужила признание широкого круга специалистов по различным областям механики, а также физики и математики. В наше время эта книга стала уже библиографической редкостью.

Перейдем к изложению содержания монографии “Колебания” [31].

Часть I, озаглавленная “Смежные вопросы математики и общей механики”, является вводной и содержит хорошо известные из алгебры, теории операционного исчисления и теоретической механики сведения, на которых основано изложение дальнейших разделов книги. Состоит эта часть из трех глав.

Первая глава посвящена основам матричного исчисления. Сначала даются основные определения. Затем приводятся элементы теории полиномиальных матриц, т.е. полиномов от скалярной матрицы, коэффициенты которых являются прямоугольными матрицами общего вида. Излагаются их основные свойства; математические действия, производимые с полиномиальными матрицами; их эквивалентность и канонические формы. В заключение первой главы, рассматриваются аналитические функции матриц. Даются определения пределов и рядов матриц, условия сходимости этих рядов и производимые над матрицами аналитические операции.

Во второй главе даются основы теории операционного исчисления, которое позволяет решать дифференциальные уравнения, а также уравнения в частных производных и уравнения в конечных разностях путем некоторой алгебраизации анализа. В ее основе лежит свойство оператора дифференцирования подчиняться тем же законам коммутативности, ассоциативности и дистрибутивности, что и обычные числа. Это позволяет заменить оператор дифференцирования по времени  $d/dt$  символом  $D$ , а производные некоторой переменной  $x$  – символическими произведениями степеней оператора  $D$  на переменную  $x$ . Таким образом, линейные дифференциальные уравнения формально сводятся к линейным алгебраическим уравнениям. Применение символического метода, т.е. операционного исчисления, к системам линейных уравнений в частных производных с постоянными коэффициентами также дает существенное упрощение, так как позволяет получить дифференциальные уравнения с числом независимых переменных на единицу меньше.

Методика операционного исчисления заключается в том, чтобы по “символическому решению”, т.е. решению упрощенной с помощью введения символа для оператора дифференцирования системы уравнений, восстановить решение исходной системы. При этом используется пре-

образование Карсона

$$\frac{\xi(p)}{p} = \int_0^{\infty} x(t) e^{-pt} dt, \quad (8)$$

которое ставит в соответствие функции действительного переменного  $x(t)$ , принадлежащей довольно широкому классу функций и называемой оригиналом, некоторое ее изображение  $\xi(p)$  на плоскости комплексного переменного  $p$ . Интеграл в правой части (8) называется интегралом Лапласа. При соблюдении ряда ограничений возможно произвести обратное преобразование и восстановить оригинал  $x(t)$  по изображению  $\xi(p)$ .

Преобразование Карсона позволяет свести решение дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами к некоторой алгебраической задаче по нахождению рациональной функции параметра  $p$ , после чего с помощью готовых таблиц находится оригинал.

Операционное исчисление сформировалось как самостоятельный метод в конце XIX в. в работах Хевисайда. Но сначала оно вызывало некоторые сомнения у ученых. Б.В. Булгаков пишет: “Недоверие, которым вначале было встречено новое исчисление, объяснялось, с одной стороны, представлением, что оно не дает ничего, кроме стенографии, служащей для записи результатов, легко получаемых классическими методами, а с другой стороны – отсутствием строгих обоснований. Первое возражение изживается по мере того, как развитие и разнообразные физические и технические приложения обнаруживают плодотворность принципов и силу формального аппарата операционного исчисления” [31, с. 114]. Второе возражение потеряло свою силу после того, как символический метод был математически обоснован и развит в работах таких ученых как Н.М. Крылов и Н.Н. Боголюбов, А.М. Эфрос и А.М. Данилевский. Сам Б.В. Булгаков широко использовал операционное исчисление как при изложении теории колебаний, так и при решении прикладных задач.

Во вводной части второй главы Борис Владимирович приводит основные определения и свойства преобразования Карсона. Дается вывод основных правил, по которым следует производить математические операции над оригиналом и изображением, приводится таблица изображений простейших функций.

После этого исследуются линейные дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами, решение которых удобно получать, используя методы операционного исчисления, особенно если требуется удовлетворить заданным начальным условиям. Здесь приводится материал статьи [17], в которой впервые было получено общее операционное решение таких систем. В качестве приложения полученных теоретических результатов рассматриваются скалярные уравнения с постоянными коэффициентами. Затем рассматривается приложение метода операционного исчисления к решению уравнений в конечных разностях. В заключительной части второй главы выводится формула, позволяющая находить оригинал по его изображению.

В третьей главе приводятся необходимые для дальнейшего изложения сведения из теоретической механики: уравнения Лагранжа первого и второго рода, канонические уравнения, вариационное уравнение, теорема Гамильтона–Якоби и др. В частности, здесь использован материал статьи “О преобразовании уравнений движения неконсервативных систем” [18], в которой к таким уравнениям применены канонические, а затем и произвольные преобразования. Во второй части главы рассматриваются свободные и вынужденные колебания систем с одной степенью свободы.

Четвертая глава, состоящая из трех разделов, озаглавлена “Постановка задачи. Линейные системы”.

Раздел А этой главы посвящен выводу дифференциальных и интегральных уравнений движения.

В разделе Б рассматриваются линейные системы с постоянными коэффициентами. К физическим системам, описываемым с помощью таких уравнений, можно при некоторых упрощающих предположениях отнести регуляторы, т.е. устройства, воздействующие на какую-либо физическую систему так, чтобы некоторые ее координаты всегда оставались вблизи желаемого значения, а также следящие системы – системы автоматического регулирования положения, в которых некоторое следящее тело должно повторять все движения другого тела, называемого задающим.

Рассмотрено общее решение уравнений движения линейной системы и приведены некоторые критерии качества регулирования, позволяющие дать количественную оценку скорости затухания колебательного процесса.

В этом разделе Булгаковым ставится и решается ставшая классической задача о накоплении возмущений в линейных колебательных системах с постоянными параметрами, целью которой является нахождение верхних пределов отклонений системы, подвергающейся воздействию произвольных внешних сил, ограниченных по абсолютной величине. Решение этой задачи приводилось Булгаковым в статье [21].

Раздел В озаглавлен “Линейные системы с постоянными коэффициентами и запаздывающими силами”. Такие системы более близки к реальным системам автоматического регулирования, так как для срабатывания отдельных элементов регулирующего устройства необходимо некоторое время, что и учитывается в уравнениях, рассматриваемых в данном разделе систем.

Пятая глава посвящена собственным колебаниям нелинейных систем. Собственными колебаниями называются колебания, описываемые каноническими уравнениями, в правые части которых не входит явно время. В этом случае поле скоростей на фазовой диаграмме постоянно и скорость изменения состояния системы полностью определяется самим состоянием.

Сначала в разделе А пятой главы рассматриваются консервативные системы. Построение фазовой диаграммы позволяет произвести классификацию возможных движений консервативных систем: 1) положения устойчивого и неустойчивого равновесия; 2) лимитационные движения –

координата  $q$  которых стремится к конечному пределу при  $t \rightarrow +\infty$ , при  $t \rightarrow -\infty$  или в обоих этих случаях; 3) либрационные – движения, фазовые траектории которых не сводятся и не стремятся к особым точкам, а являются замкнутыми, окружающими одно или несколько положений равновесия; 4) дважды инфинитные движения, ветви фазовых траекторий которых уходят в бесконечность, когда  $t \rightarrow +\infty$ , и  $t \rightarrow -\infty$ .

Затем для либрации и ротации вводятся новые канонические переменные: угловые и переменные действия, одна из которых – угловая – является линейной функцией времени, а другая – переменная действия – постоянна.

В заключение приводится метод Ньюкома и Линдстедта, позволяющий при некоторых условиях получать решение, описывающее либрационные движения в некоторой окрестности положения устойчивого равновесия, имеющие форму ряда по степеням амплитуды и сходящиеся при достаточно малых ее значениях.

В разделе Б рассматриваются диссипативные системы, т.е. системы для которых некоторая добавочная сила имеет характер сопротивления, так что ее элементарная работа отрицательна или равна нулю при положительном  $dt$ ; причем эта сила не обращается в нуль, если импульс  $p \neq 0$ . К таким системам относятся рассматриваемые в этом разделе различные системы с кулоновым трением. Показано, что движение диссипативных систем стремится к состоянию равновесия и является затухающим.

В разделе В пятой главы рассматриваются автоколебательные системы. Для этих систем характерно конечное или дискретное множество возможных либрационных и ротационных движений (в отличие от консервативных систем, для которых периодических колебательных режимов будет множество мощности континуум, при условии существования таких режимов). При этом автоколебания имеют место лишь в том случае, когда соответствующий режим асимптотически устойчив по Ляпунову, т.е. когда близкие неперiodические колебания стремятся к нему при  $t \rightarrow \infty$ .

Теория автоколебательных систем была широко развита московской школой теории колебаний, созданной Л.И. Мандельштам, Н.Д. Папалекси и А.А. Андроновым. В результате работ ученых этой школы отдельные известные ранее решения были дополнены новыми, приведены в общую систему и связаны с общей качественной теорией дифференциальных уравнений. В качестве примеров автоколебательных систем рассмотрены часы, электронный генератор, следящая система с люфтом, паровая машина.

В разделах Г и Д приводятся метод Пуанкаре и метод осреднения Ван-дер-Поля, позволяющие исследовать нелинейные системы, а также некоторые приложения этих методов.

Следующая шестая глава посвящена вынужденным колебаниям нелинейных систем, для исследования которых Булгаковым применен приближенный метод осреднения. Рассматривая системы с нелинейной восстанавливающей силой, Борис Владимирович использует материал статьи [15], в которой укороченные уравнения Ван-дер-Поля, описыва-

ющие вынужденные колебания псевдолинейных систем, приводятся к канонической гамильтоновой форме.

Заключительная третья часть, озаглавленная “Системы с конечным числом степеней свободы”, является не только самой обширной (она занимает более половины монографии), но и наиболее содержательной. В этой части рассматривается наиболее сложный случай колебательных систем. Она полна новых оригинальных находок ученого, относящихся как к общетеоретической части, так и области приложений.

Начинается третья часть рассмотрением линейных задач, к которым обычно приводит метод малых колебаний. Этой проблеме посвящена седьмая глава под названием “Малые колебания около данного состояния”. В ней выводятся уравнения в вариациях, приводящие к линейным уравнениям, рассматривается устойчивость некоторого процесса или состояния равновесия. Приложение общей теории иллюстрируется значительным количеством примеров, относящихся к области теории регулирования, вводятся в рассмотрение электрические цепи.

В восьмой главе рассматриваются линейные системы с постоянными коэффициентами. Глава состоит из шести разделов.

В разделе А приводятся общие свойства рассматриваемых систем. Здесь, в частности, использованы материалы статьи [30], посвященной проблемам равновесности и совместности систем линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами.

Раздел Б посвящен собственным колебаниям систем с постоянными коэффициентами. Решение неособого однородного матричного уравнения строится с помощью нормальных колебаний, т.е. в виде переменного вектора в  $n$ -мерном пространстве, равного геометрической сумме некоторых составляющих векторов, численная величина каждого из которых переменна, но направление совпадает с направлением постоянного собственного вектора. Такой подход дает некоторые преимущества при общем анализе структуры и устойчивости системы и в некоторых других вопросах.

В разделе В рассматривается устойчивость и быстрота затухания собственных колебаний. Сначала приводятся различные категории их устойчивости. Затем вводится понятие области устойчивости в пространстве коэффициентов характеристического многочлена. В качестве приложения решается задача устойчивости следящей системы.

Затем приводится метод Неймарка для исследования устойчивости решений некоторого алгебраического уравнения, позволяющий выделять на плоскости параметров области, соответствующие определенному числу корней с действительной частью, большей некоторой установленной величины. Далее Булгаков указывает на разработанное им видоизменение этого метода, с помощью которого можно найти на той же плоскости параметров область, в которой все корни уравнения отрицательны. Эта область названа им областью аperiodической устойчивости. Рассмотренный метод был изложен ученым в статье [25].

Раздел Г посвящен вынужденным колебаниям и волнам при гармонических возмущениях, что имеет большое прикладное значение. Зна-

чительное внимание уделено применению теоретических выкладок к практическим задачам из теории электрических цепей.

В разделе Д рассматривается общий случай вынужденных колебаний. Здесь вводится важное понятие нормальных координат, в которых уравнения колебательного процесса имеют более простой вид. После этого приводится полученное в работе [19] преобразование к нормальной форме системы первого порядка, к которой, в принципе, может быть сведена любая система.

В следующем разделе – “Устойчивость при длительных возмущениях” – рассматривается задача, с которой часто приходится сталкиваться при решении проблем автоматического регулирования, когда необходимо отыскать максимальное отклонение регулируемой системы от требуемого состояния или наибольшую возможную погрешность какого-либо измерительного устройства. Дело в том, что хотя линейная демпфированная система под действием конечных возмущенных сил не может получить неограниченных вынужденных колебаний, все же при некоторых условиях возмущения могут быть довольно значительны. Поэтому приобретает актуальность задача определения верхних пределов отклонений системы, на которую действуют произвольные ограниченные по модулю внешние силы. Решение этой задачи приводилось Борисом Владимировичем в работе “О накоплении возмущений в линейных колебательных системах с постоянными параметрами” [21]. Кроме того, в данном разделе указанная задача решается для систем с переменными параметрами. Это уже было сделано Булгаковым совместно с Н.Т. Кузовковым [26].

В девятой главе монографии рассматриваются пассивные системы.

Раздел А посвящен линейным консервативным системам с постоянными коэффициентами. Сначала приводится краткая предыстория вопроса о малых колебаниях склерономных консервативных механических систем около положения равновесия, которые описываются линейными системами дифференциальных уравнений или уравнений с частными производными с постоянными коэффициентами. Проблема исследования таких движений систем со многими степенями свободы была первой в истории теории колебаний и рассматривалась Б. Тейлором, Ж. Даламбером, Л. Эйлером, Д. Бернулли, Ж. Лагранжем. Возникновение теории регулирования поставило новые проблемы, приведшие к обобщению теории линейных колебаний, изложению чего и посвящен раздел А.

В качестве приложения общей теории рассмотрена классическая задача о поперечных колебаниях натянутой нити с закрепленными концами, нагруженной сосредоточенными массами.

Затем приведены некоторые свойства характеристических чисел, т.е. корней характеристического уравнения системы, после чего излагается обратный метод, состоящий в переходе от линейных алгебраических уравнений к интегральному уравнению. Несмотря на то, что получаемые в результате такого перехода уравнения представляют лишь иную форму первоначальных, во многих случаях обратный метод оказывается очень удобным, что демонстрируется Борисом Владимирови-

чем на различных примерах, относящихся к области строительной механики.

В связи с тем, что выведение характеристического уравнения приводит к задаче развертывания характеристического определителя, что представляется весьма затруднительным при значительных степенях исходной системы, Булгаков указывает на изящный метод Леверье, впоследствии улучшенный А.Н. Крыловым, который позволяет облегчить процедуру получения характеристического уравнения путем нахождения коэффициентов характеристического многочлена (с помощью итераций).

В конце раздела А приведен метод последовательных умножений, при помощи которого путем итераций можно получить приближение характеристического числа с максимальным модулем и соответствующей собственной формы.

Раздел Б посвящен синтезу пассивных двухполюсников, т.е. незамкнутых участков электрической цепи, заканчивающихся двумя зажимами. Показано, что для произвольной рациональной действительной положительной функции<sup>1</sup> может быть построен такой двухполюсник, что эта функция равна его сопротивлению. Булгаков иллюстрирует изложение множеством схем двухполюсников, реализующих различные функции, а в заключение описывает общую процедуру построения двухполюсников по заданному импедансу.

В разделе В рассматривается синтез четырехполюсников и его приложения. Сначала исследуются различные электрические фильтры, предназначенные для того, чтобы пропускать переменные токи только в некоторых желательных диапазонах частот, а остальные задерживать. Эти устройства широко применяются в автоматике, телемеханике и технике связи и представляют собой каскады<sup>2</sup> реактивных<sup>3</sup> четырехполюсников.

Особенно важна часть раздела В, в которой рассмотрены вопросы синтеза корректирующих цепей. Излагаемый здесь материал был опубликован [28]. Показано, что любая дробно-рациональная функция, регулярная в замкнутой правой полуплоскости, может быть реализована как передаточная функция каскада пассивных симметричных мостовых четырехполюсников. Булгаковым были составлены таблицы четырехполюсных звеньев, реализующих дробные функции нулевого, первого и второго порядков. Полученные результаты имеют большое значение, так как корректирующие цепи получили широкое распространение: они применяются в различных автоматических регуляторах и сервомеханизмах.

---

<sup>1</sup> Положительной функцией называется такая функция комплексного переменного, действительная часть которой положительна при положительной действительной части ее аргумента.

<sup>2</sup> Два четырехполюсника соединены каскадом, если выходные зажимы первого соединяются с входными зажимами второго.

<sup>3</sup> Реактивными называются пассивные, т.е. не содержащие источников энергии, четырехполюсники, не содержащие активных сопротивлений.

В разделе Г даются некоторые не рассмотренные выше приложения пассивных систем: динамический поглотитель колебаний без демпфера, предложенный Фрамом в 1909 г., и динамический поглотитель колебаний с демпфером.

В десятой главе рассматривается приложение линейной теории к процессам регулирования, которые служат полем применения теории колебаний наряду с колебаниями упругих тел и колебательными явлениями в электрических цепях.

В первой части главы излагается материал статьи [27], в которой Булгаковым построена теория линейных регулируемых систем. Применение методов матричного исчисления позволило представить структурную схему такой регулируемой системы в виде замкнутой матричной одноконтурной цепи. Дается обобщение частотных критериев исследования регулируемых систем на случай матричных цепей. В качестве примеров рассмотрены автоматическое управление курсом судна и гироскопический стабилизатор.

В небольшой по объему одиннадцатой главе излагается теория линейных систем с периодическими коэффициентами. Изучение таких систем представляет значительный интерес, так как к ним сводятся уравнения о вариациях для периодических решений нелинейных уравнений. Поэтому к этому классу принадлежат также многие задачи теории движения небесных тел и другие проблемы, связанные с исследованием малых движений вблизи некоторого состояния равномерного вращения. Помимо этого, форма общего решения уравнения в вариациях позволяет судить об устойчивости периодического решения.

В данной главе приводится теорема Флоке, определяющая форму общего решения системы, описываемой матричным линейным уравнением с периодическими коэффициентами. Кроме того, дается критерий устойчивости положения равновесия такой системы.

Заключительная двенадцатая глава монографии излагает теорию нелинейных систем с конечным числом степеней свободы. Глава состоит из двух разделов, посвященных двум основным методам изучения таких систем.

В разделе А излагается разработанная Б.В. Булгаковым эффективная форма метода малого параметра Пуанкаре. Впервые она была опубликована в 1942 г. [12] и получила живой отклик в научном мире. Эта модификация позволяет получать периодическое решение псевдolineйной системы со многими степенями свободы и многими нелинейными функциями, соответствующее важному типу установившихся колебаний. Общий метод был применен для объяснения автоколебаний следящей системы.

При написании раздела Б, посвященного методу осреднения Ван-дер-Поля, был использован материал статьи [20]. С помощью выведенного Булгаковым в работе [19] преобразования к нормальным координатам ученый распространил этот метод на нелинейные системы со многими степенями свободы и многими нелинейными функциями. При этом оказалось возможным исследовать не только периодические и квазипериодические движения, но и переходные процессы в таких системах.

В качестве примера приложения метода осреднения приводится решение задачи о влиянии сил сухого трения на движение плоского гироскопического маятника, впоследствии включенное в 3-е издание монографии Б.В. Булгакова “Прикладная теория гироскопов” [11] в качестве четвертого добавления. Исследование укороченных уравнений показало, что для быстрого вращения гироскопа эффект присутствия сухого сопротивления такой же, как и в случае вязкого сопротивления. Под действием этих сил нутация затухает быстрее прецессии. “Характерной особенностью рассматриваемого случая сухого трения является то, что полное погашение как прецессионного, так и нутационного движений завершается в конечное время” [31, с. 838].

В заключение хочется отметить, что материал монографии хорошо проиллюстрирован. Количество графиков поражаало воображение современников. Конечно, современного читателя, знакомого с компьютерной техникой, трудно этим удивить. Вспомним, однако, когда была написана книга. В конце 40-х гг. для создания каждого графика требовалась масса вычислений, которые выполнялись вручную с помощью механического арифмометра и логарифмической линейки. И только глубокое понимание механизма действия описываемого явления помогало тяжело больному человеку получать точные и наглядные графики, имея такие подручные средства.

Подводя итоги, вспомним, какие достижения теории колебаний и автоматического регулирования связаны с именем Булгакова.

1. Борис Владимирович развил метод “укороченных” уравнений Ван-дер-Поля путем построения бесконечного процесса, сходящегося к точному решению. Такой подход дает возможность уточнять результаты, получаемые с помощью метода Ван-дер-Поля, который позволяет найти только первое приближение.

2. Им были созданы эффективные модификации метода осреднения Ван-дер-Поля и метода малого параметра А. Пуанкаре для псевдолонейных систем со многими степенями свободы и многими нелинейными функциями, с помощью которых Булгаков решил множество прикладных задач.

3. Булгаков разработал метод определения области, в которой все парциальные колебания линейной колебательной системы затухают по показательному закону. Эта задача находит применение во многих процессах синтеза регуляторов.

4. Ученый изучил системы регулирования движения сложных звеньев, имеющих по несколько степеней свободы и доказал теорему о том, что любая рациональная функция  $P(D)/Q(D)$ , регулярная в замкнутой правой полуплоскости, может быть с точностью до постоянного множителя реализована как передаточная функция пассивного симметричного мостового (решетчатого) четырехполюсника или каскада таких четырехполюсников.

5. Борис Владимирович обобщил “задачу о накоплении возмущений”, поставив и решив ее для линейных колебательных систем с постоянными и переменными коэффициентами, находящихся под действием конечных сил. В постановке этой задачи Б.В. Булгаковым было

впервые дано описание функционального множества кусочно-непрерывных функций, ограниченных по модулю, являющегося математической моделью возмущающих сил.

Ученым был получен ряд важных математических результатов, примененных им к решению механических задач.

1. Построено эффективное преобразование к нормальным координатам для линейных дифференциальных уравнений в самой общей их форме и некоторых классов нелинейных систем.

2. Впервые приведено полное операционное решение систем дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами и заданными начальными значениями самого общего вида.

3. Доказаны некоторые теоремы о делении прямоугольных матриц, а также о равносильности и совместности систем линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами в предположении, что число уравнений может быть не равным числу неизвестных.

4. Исследовано применение к неконсервативным системам сначала канонических, а затем произвольных преобразований, что позволило перенести очень многие методы небесной механики на область технических колебаний и теории автоматического регулирования.

Все эти результаты были подытожены в монографии "Колебания", содержащей теорию колебательных систем с одной степенью свободы и многими степенями свободы. Специфической чертой этой книги является механический подход к объяснению теории, множество конкретных примеров, взятых из инженерной практики.

## Заключение

Борис Владимирович Булгаков – фигура замечательная в отечественной и мировой науке. Так получилось, что годы его научных исследований совпали с годами формирования зарождающейся советской науки и промышленности. Он прошел все ключевые этапы развития нашей страны: перенес в юности голодное время, участвовал в многочисленных реформах молодой власти, ищущей новые формы организации общественного устройства и системы образования. В зрелые годы стойчески переносил все лишения Великой Отечественной войны, проводил ценные актуальные исследования для оборонной промышленности, не прекращая напряженной научной и педагогической деятельности до самой своей смерти.

Результаты этой работы нашли выражение в разнообразных, весьма содержательных статьях и двух основополагающих монографиях: “Прикладная теория гироскопов” [11] и “Колебания” [31], ставших настольными не только для ученых-механиков различных специальностей, но также для инженеров и математиков.

Нельзя не отметить тесную связь теоретических исследований Бориса Владимировича с техническими приложениями, присущую всему творчеству этого ученого. Многие его работы по теории гироскопов имели большое практическое значение, так как касались исследования таких приборов как гирогоризонты, одно- и полигироскопные гироскопсы, гироскопические стабилизаторы и многих других, нашедших широкое применение, например в целях навигации в условиях, когда линия горизонта не видна. Для многих из них Булгаковым была впервые детально разработана теория, основанная на точных уравнениях, и рассчитаны их погрешности, что позволило произвести их конструктивное улучшение.

Огромной заслугой ученого является систематическое изучение поведения этих устройств на неподвижном и, особенно, на подвижном основаниях. Особое внимание Булгаков уделял рассмотрению гироскопических устройств, период прецессии которых совпадает с периодом Шулера. Такие приборы представляют особый интерес для практики, поскольку они не имеют баллистических девиаций.

Для развития общей теории гироскопов послужили работы Бориса Владимировича, исследующие вынужденную прецессию гироскопа, влияние сил сопротивления на движение свободного гироскопа, устойчивость колебаний гироскопов. Получила широкое распространение введенная Булгаковым система фазовых координат, оказавшаяся весьма удобной при изучении гироскопических свойств движения.

Глубокое понимание функционирования сложного механизма действия гироскопических устройств позволило ученому сделать в 1936 г. два изобретения [6, 7]. Ввиду надвигающейся войны они имели большое оборонное значение и были засекречены. В них разрабатывались идеи зарождавшейся инерциальной навигации.

Не менее значительным представляется вклад Бориса Владимировича в теорию нелинейных колебаний. Созданные им модификации методов А. Пуанкаре и Ван-дер-Поля нашли немало практических применений. Самим Булгаковым эти методы были использованы при решении ряда прикладных задач. Ученым были всесторонне изучены процессы регулирования движения сложных систем, имеющих по несколько степеней свободы. Им были решены многие задачи синтеза регуляторов и автоматического регулирования движения сложных звеньев.

Борис Владимирович был превосходным математиком. Ряд результатов, полученных ученым в теории колебаний, базировался на доказанных им теоремах теории матричного и операционного исчисления. Свой талант вычислителя Булгаков успешно применял при решении механических задач, зачастую требовавших весьма громоздких выкладок.

Из некоторых проблем, поставленных и решенных Борисом Владимировичем, впоследствии развились обширные самостоятельные области механики. Так, в его бывшем долгое время засекреченном отчете [32] была построена теория гироскопической системы с интегральной коррекцией от ньютонометров, созданная под руководством Л.М. Кофмана и Е.Б. Левенталя – первый образец отечественной системы инерциальной навигации. Как известно, это направление получило интенсивное развитие уже в послевоенные годы, и работа [32] Булгакова является одной из ранних теоретических разработок по данной тематике.

Весьма перспективной оказалась и впервые поставленная Борисом Владимировичем задача о нахождении режима маневрирования основания, при котором отклонение гироскопического прибора от заданного направления было бы максимальным, и нахождение этого максимального отклонения. Эта задача, решенная для гироскопа и гироскопа, считается одной из первых постановок проблем теории оптимального управления, основной целью которой является отыскание закона изменения управляющих сил таким образом, чтобы некоторая характеристика движения системы достигала своего максимального (или минимального) значения. Впоследствии “задача о накоплении возмущений” была развита как в работах самого Б.В. Булгакова, так и в исследованиях других авторов.

Круг научных интересов Бориса Владимировича был весьма широк. Крупнейший специалист в области теории гироскопов и теории колебаний, он написал ряд работ по общей механике. Будучи прекрасным математиком, ученый успешно применял аппарат этой науки при решении актуальных прикладных проблем. Кроме того, он был и инженером, о чем говорят два сделанных им изобретения. Высокую ценность имели разработки Булгакова для оборонной промышленности.

Многие идеи Б.В. Булгакова не забыты. Они по-прежнему оказывают плодотворное влияние на развитие науки уже в трудах ученых основанной Борисом Владимировичем обширной школы гироскопистов и специалистов в области теории колебаний и автоматического управления.

Научная и педагогическая деятельность Бориса Владимировича Булгакова и его подвижнический образ жизни были высоко оценены всеми ведущими гироскопистами. О нем прекрасно отзывались Л.С. Лейбензон, А.Н. Крылов, Я.Н. Ротенберг [81], А.Ю. Ишлинский [56, 55, 56], И.В. Новожилов и И.З. Пирогов [76], В.Д. Андреев, И.Д. Блюмин, Е.А. Девянин, Д.М. Климов, В.Н. Щелкачев и все, кто его знали.

Работы Б.В. Булгакова по прикладной теории гироскопов и теории колебаний отличаются строгой последовательностью изложения и глубоким пониманием сути рассматриваемых явлений. Для ученого характерно умение становиться на новую оригинальную точку зрения и превосходное владение математическим аппаратом. Занимаясь актуальнейшими задачами механики, он находил в них ценные практические результаты. Глубокое принципиальное значение работ Булгакова делает его ведущим ученым первой половины нашего столетия. Обращение к трудам Б.В. Булгакова, их новое прочтение выстраивают представление о первостепенной роли отечественной механики в мировой науке.

## **Основные даты жизни и деятельности Б.В. Булгакова**

- 1900, 6 августа – в Москве в семье преподавателей родился сын Борис Владимирович Булгаков.
- 1908–1918 – учеба в 9-й московской гимназии.
- 1918–1920 – служба в Красной Армии, делопроизводитель с специальными полномочиями в Главном Комитете государственных сооружений.
- 1920–1924 – повышение по службе в армии: помощник начальника Отдела Штаба Красной Армии.
- 1923–1928 – учеба на физико-математическом факультете Московского университета.
- 1929 – женитьба.
- 1928–1930 – старший научный сотрудник Научно-исследовательского института математики и механики МГУ.
- 1930–1935 – ассистент кафедры теоретической механики МГУ.
- 1935, 1 февраля – доцент той же кафедры.
- 1933 – по совместительству преподает на кафедре авиационных приборов МВТУ.
- 1939–1952 – по совместительству (на полставки) заведует кафедрой авиационных приборов МВТУ.
- 1938, 10 февраля – назначен и.о. профессора на кафедре теоретической механики МГУ.
- 1939, 16 января – успешная защита докторской диссертации на тему "Прикладная теория гироскопов".
- 1939, 23 апреля – ВАК утвердил присуждение ученой степени доктора физико-математических наук и звание профессора (протокол № 18).
- 1939 – вышла в свет монография "Прикладная теория гироскопов".
- 1943 – исполняет обязанности заведующего кафедрой теоретической механики МГУ.
- 1944 – оставлен на полставки профессора на кафедре теоретической механики и тем же приказом (№ 28/6 от 10 марта 1944 г.) назначен заведующим кафедрой прикладной механики на полставки.
- 1946, 4 декабря – избран членом-корреспондентом АН СССР.
- 1949 – вышло первое издание монографии "Колебания".
- 1952, 29 апреля – умер после продолжительной болезни. Похоронен на Новодевичьем кладбище.

# Библиография

## Научные труды Б.В. Булгакова

1. Влияние отклонений формы трубы от круглой на ее сопротивление внешнему давлению // Нефт. хоз-во. 1929. Т. 17, вып. 8. С. 183–187.
2. Влияние отклонений формы трубы от круглой на ее сопротивление внешнему давлению. М.: Гостехиздат, 1930. 103 с. (Тр. Гос. исслед. нефт. ин-та; Вып. 7).
3. Влияние овальности на сопротивление труб внутреннему давлению // Нефт. хоз-во. 1930. Т. 18, вып. 2. С. 247–248.
4. К вопросу о кручении лопастей гребного винта // Техника воздушного флота. М., 1933. Т. 2. С. 34–39.
5. Две задачи из теории волчка // Мат. сб. 1934. Т. 41, № 1. С. 73–91.
6. Способ получения затухания в гироскопических горизонтах и полукомпасах. Заявка № 194833 от 7.06.36. А.с. (не подлежащее опубликованию) № 2850 от 28.04.38. Секретность снята 30.09.65.
7. Полугироскомпас с применением интеграторов. Заявка № 195385 от 7.06.36. А.с. (не подлежащее опубликованию) № 3600 от 2.10.40. Секретность снята 30.09.65. Совм. с Л.М. Кофманом.
8. Теория гироскопа Аншютца // Прикл. математика и механика. 1937. Т. 1, вып. 1. С. 32–42.
9. Теория гироскопа Сперри с маятниковой воздуходувной коррекцией // Учен. зап. МГУ. Механика. 1937. Вып. 7. С. 181–199. Совм. с С.С. Тихменевым.
10. Некоторые вопросы устойчивости движения в теории гироскопа // Там же. 1938. Вып. 24, кн. 2. С. 70–82.
11. Прикладная теория гироскопов. М.; Л.: ГОНТИ, 1939. 258 с.; 2-е изд. М.: Гостехиздат, 1955. 355 с.; 3-е изд. М.: Изд-во МГУ, 1976. 400 с.
12. О применении метода А. Пуанкаре к свободным псевдолинейным колебательным системам // Прикл. математика и механика. 1942. Т. 6, вып. 4. С. 263–280.
13. О применении метода ван-дер-Поля к псевдолинейным колебательным системам со многими степенями свободы // Там же. Вып. 6. С. 395–410.
14. Автоколебания регулируемых систем // Докл. АН СССР. 1942. Т. 37, № 9. С. 283–287.
15. К задаче о вынужденных колебаниях псевдолинейных систем // Прикл. математика и механика. 1943. Т. 7, вып. 1. С. 31–40.
16. Автоколебания регулируемых систем // Там же. Вып. 2. С. 97–108.
17. Об операционных решениях систем линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами // Докл. АН СССР. 1943. Т. 41, № 6. С. 248–251.
18. О преобразовании уравнений движения неконсервативных систем // Там же. 1944. Т. 44, № 3. С. 104–107.

19. О нормальных координатах // Прикл. математика и механика. 1946. Т. 10, вып. 2. С. 273–290.
20. Некоторые задачи теории регулирования с нелинейными характеристиками // Там же. Вып. 3. С. 313–332.
21. О накоплении возмущений в линейных колебательных системах с постоянными параметрами // Докл. АН СССР. 1946. Т. 51, № 5. С. 339–342.
22. К теории силовых гироскопических горизонтов // Изв. АН СССР. ОТН. 1948. № 3. С. 289–292. Совм. с Я.Н. Ройтенбергом.
23. Колебания. М.; Л.: Гостехтеориздат, 1949. Т. 1. 464 с.
24. Об одной задаче автоматического регулирования с нелинейной характеристикой // АиТ. 1949. Т. 10, № 5. С. 329–341. Совм. с М.З. Литвиным-Седым.
25. Дискриминантная кривая и область апериодической устойчивости // Докл. АН СССР. 1950. Т. 73, № 6. С. 1143–1144.
26. О накоплении возмущений в линейных системах с переменными параметрами // Прикл. математика и механика. 1950. Т. 14, вып. 1. С. 7–12. Совм. с Н.Т. Кузовковым.
27. Цепи регулирования со звеньями, имеющими по несколько степеней свободы // Там же. Вып. 6. С. 619–634.
28. Вопросы синтеза корректирующих цепей // Изв. АН СССР. ОТН. 1952. № 1. С. 21–40; № 5. С. 699–723.
29. Деление прямоугольных матриц // Докл. АН СССР. 1952. Т. 85, № 1. С. 21–23.
30. О равносильности и совместности систем линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами // Прикл. математика и механика. 1952. Т. 16, вып. 1. С. 15–22.
31. Колебания. Ч. 1–3. М.: Гостехтеориздат, 1954. 891 с.
32. Теория одной гироскопической системы навигации // Изв. АН СССР. МТТ. 1969. № 3. С. 14–23. То же // Прикл. теория гироскопов. 3-е изд. М.: Изд-во МГУ, 1976. С. 384–395.
33. Fehleranhäufung bei Kreiselapparaten // Ing.-Arch. 1940. Bd. 11, N. 6. S. 461–469.
34. Sur le mouvement troublé par des forces de haute fréquence // Compos. math. 1940. Vol. 7, fasc. 3. P. 390–427.
35. Periodic processes in free pseudo-linear oscillatory systems // J. Franklin Inst. 1943. Vol. 235, N 6. P. 591–619.
36. On the method of Van-der-Pol and its application to non-linear control problems // Ibid. 1946. Vol. 241, N 6. P. 31–54.

## **Материалы Архива Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова**

37. Ф. 2. Оп. 34 “Л”. № 1148. Булгаков Борис Владимирович.
38. Ф. 2. Оп. 10 “Л”. № 1135 (1931–1932 гг.).
39. Ф. 2. Оп. 2. № 1 (1933–1934 гг.).
40. Ф. 2. Оп. 8. № 3.
41. Ф. 2. Оп. 1. № 396 (1936 г.).
42. Ф. 2. Оп. 1. № 132 (1936–1937 гг.).
43. Ф. 2. Оп. 2. № 6.
44. Ф. 2. Оп. 8. № 14.
45. Ф. 2. Оп. 8. № 23.
46. Ф. 2. Оп. 34 “Л”. № 396. Артоболевский Иван Иванович.
47. Ф. 2. Оп. 1. № 171 (1940–1944 гг.).
48. Ф. 2. Оп. 8. № 27 (1944–1946 гг.).

## Цитируемая литература

49. *Алексеев В.* Привилегия в России. № 28451, выдана 30.04.16 по заявке 1911 г.
50. *Андронов А.А., Витт А.А.* К математической теории захватывания // Журн. прикл. физики. 1930. Т. 7, вып. 4.
51. *Беген А.* Теория гироскопических компасов Аншютца и Сперри и общая теория систем с сервосвязями / Пер. с фр. Я.Н. Ройтенберга. М.: Наука, 1967. 171 с.
52. *Боголюбов Н.Н.* О некоторых статистических методах в математической физике. Киев, 1945. 140 с.
53. Борис Владимирович Булгаков (1900–1952): Некролог: [Подписи]: Отд. техн. наук АН СССР, Ин-т механики АН СССР // Изв. АН СССР. ОТН. 1952. № 8. С. 1267: портр.
54. История Московского университета. М.: Изд-во МГУ, 1955. Т. 2. 456 с.
55. *Ишлинский А.Ю.* Теория гироскопических и инерциальных систем // История механики с конца XVIII века до середины XX века. М.: Наука, 1972. С. 138–189. Соавтор И.Д. Блюмин.
56. *Ишлинский А.Ю.* Механика: Идеи, задачи, приложения. М.: Наука, 1985. 624 с.
57. *Крылов А.Н.* О теории гирокомпаса Аншютца // Собр. тр. акад. А.Н. Крылова. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1943. Т. 2, ч. 1. С. 127–179.
58. *Крылов Н.М., Боголюбов Н.Н.* Общая теория меры в нелинейной механике. Киев, 1937. (Зап. каф. мат. физики; Т. 3).
59. *Кудревич Б.И.* Теория и практика гироскопического компаса: В 6 ч. Л.: Изд-во АН СССР, 1922, 1925, 1939, 1944, 1946. Ч. 6. 232 с.
60. *Кудряшова Л.В., Пирогов И.З.* К истории возникновения и развития кафедры прикладной механики (по материалам Архива МГУ) // История и методология естеств. наук. Математика, механика. 1982. Вып. 29. С. 159–165.
61. *Куликовский П.Г.* Павел Карлович Штернберг. М.: Изд-во МГУ, 1951. 54 с.
62. *Лаврентьев М.А.* Наука: Технический прогресс: Кадры: Сб. ст. и выступлений. Новосибирск: Наука, 1980. С. 66–70.
63. *Левенталь Е.Б., Кофман Л.М.* Навигационный прибор для регистрации пройденного пути и скорости. А.с. 184465 (СССР). Заявл. 26.12.32, № 120951/40-23; Оpubл. 21.07.66 / Бюл. изобрет. 1966. № 5.
64. *Летов А.М.* К задаче об автопилоте: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1945. 71 с.
65. *Литвин-Седой М.З.* Исследования автоматического курса самолета с учетом флюгерного момента: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1948. 70 с.
66. *Лузин Н.Н.* К изучению матричной теории дифференциальных уравнений // АИТ. 1940. № 5. С. 4–66.
67. *Мандельштам Л.И., Папалекси Н.Д.* О явлениях резонанса  $n$ -го рода // Журн. техн. физики. 1932. Т. 2, вып. 7/8.
68. *Мандельштам Л.И., Папалекси Н.Д.* Об обосновании одного метода приближенного решения дифференциальных уравнений // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1934. Т. 4. С. 117–122.
69. *Манукян М.М.* Гирогоризонт с несимметричным кардановым подвесом: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1940. 67 с.
70. Механика в Московском университете / Под ред. К.А. Рыбникова и др. М.: Изд-во МГУ, 1992. 168 с.
71. Механика в СССР за 50 лет (1917–1967). М.: Наука, 1969. Т. 1. 366 с.
72. *Мирославаев Е.Н.* О влиянии постоянных времени в нелинейных колебательных системах: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1952. 109 с.

73. *Николаи Е.Л.* О движении уравновешенного гироскопа в кардановом подвесе // Прикл. математика и механика. 1939. Т. 3, вып. 4. С. 3–34.
74. *Николаи Е.Л.* О влиянии трения на движение гироскопа в кардановом подвесе // Докл. АН СССР. 1943. Т. 38, № 2/3.
75. *Николаи Е.Л.* Гироскоп в кардановом подвесе. М.: Гостехиздат, 944. 2-е изд. М.: Наука, 1964. 399 с.
76. *Новожилов И.В., Пирогов И.З.* Борис Владимирович Булгаков: (К 90-летию со дня рождения) // Исследования по истории физики и механики. М.: Наука, 1990. С. 229–237.
77. *Огибалов П.М., Кудряшова Л.В.* О возникновении и развитии механико-математического факультета Московского университета // История и методология естеств. наук. 1980. Вып. 25. С. 3–22.
78. Развитие механики гироскопических и инерциальных систем. М.: Наука, 1973. 456 с.
79. *Ройтенберг Я.Н.* К теории многогироскопной вертикали: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1941. 113 с.
80. *Ройтенберг Я.Н.* Автоколебания гироскопических стабилизаторов // Прикл. математика и механика. 1947. Т. 11, вып. 2. С. 271–280.
81. *Ройтенберг Я.Н.* Прикладная теория гироскопов // Механика в СССР за тридцать лет (1917–1947). М.; Л.: Гостехтеоретиздат, 1950. С. 115–129.
82. *Сизов М.Б.* Колебания некоторых псевдолинейных систем: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1941. Ч. 1/2. 53 с.
83. *Тохмалян Г.М.* Бигироскопный горизонт Шулера: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1939. 47 с.
84. *Шушара Г.Н.* Вынужденные колебания нелинейной системы регулирования с двумя степенями свободы: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1951. 80 с.
85. *Anschütz-Kämpfe H.* Der Kreisel als Richtungsweiser auf der Erde mit besonderer Berücksichtigung seiner Verwendbarkeit auf Schiffen // Jb. Schiffbautechn. Ges. 1909. Bd. 10. S. 352–369.
86. *Boikow J.M.* Einrichtung zum Messen von Wegstrecken. Pat. 661822 (Germany). Kl. 420, Gr. 17. Publ. 9.07.38.
87. *Carrie M.E.* Gyroscopic compass. Pat. 1253666 (USA). Publ. 15.01.18; Appl. 24.03.03.
88. *Euler L.* Theoria motus corporum solidorum seu rigidorum. Rostochii et Gryphiswaldiae, 1765. 624 p.
89. *Föppl A.* Vorlesungen über technische Mechanik // 15 veränd. und erw. Aufl. München; Oldenburg, 1951. Bd. 3. 303 S.
90. *Föppl A.* Der Schlicksche Schiffskreisel mit verbesserter Wirkung // Ing.-Arch. B., 1935. Bd. 6, H. 5. S. 313–318.
91. *Foucault L.* Sur une nouvelle démonstration expérimentale du mouvement de la terre, fondée sur la fixité du plan de rotation // C. r. Acad. sci. 1852. T. 35, N 13. P. 421–424.
92. *Foucault L.* Sur les phénomènes d'orientation des corps tournants entraînés par un axe fixé à la surface de la terre // Ibid. P. 424–427.
93. *Foucault L.* Addition aux précédentes communications // Ibid. N 14. P. 469–470.
94. *Foucault L.* Sur la tendance de rotations au parallélisme // Ibid. N 17. P. 602–603.
95. *Geckeler J.W.* Kreiselkompass und Schiffsmannöver // Ing.-Arch. 1933. Bd. 4, H. 1. S. 66–83.
96. *Geckeler J.W.* Kreiselmechanik des Anschütz – Raumkompasses // Ibid. 1935. Bd. 4, H. 4. S. 229–252.
97. *Grammel R.* Der Kreisel: Seine Theorie und seine Anwendungen. Braunschweig, 1920. 318 S.

98. *Klein F., Sommerfeld A.* Über die Theorie des Kreisels. Leipzig, 1903. H. 3. 966 S.
99. *Lewis D.C.* Sur le mouvement troublé par des forces de haut fréquence (par B.V. Bulgakov) // *Math. Rev.* 1940. Vol. 1, N 8. P. 236.
100. *Martienssen O.* Die Verwendbarkeit des Rotationkompasses als Ersatz des magnetischen Kompasses // *Phys. Ztschr.* 1906. N 15. S. 535–543.
101. *Martienssen O.* Die Entwicklung des Kreiselskompasses // *Ztschr. Vereines. Dt. Ing.* 1923. Bd. 67, N 8. S. 251–263.
102. *Martienssen O.* Technische Anwendung des Kreisels: Handbuch der physikalischen und technischen Mechanik / Hrsg. F. Auernach und W. Hort. Leipzig, 1930. Th. 2. S. 405–492.
103. *Noether F.* Über analytische Berechnung der Geschosspendelungen // *Nachr. Kngl. Ges. Wiss. Cöttingen. Math.-phys. Kl.* 1919. H. 3. S. 112–115.
104. *Rawlings A.L.* The theory of the gyroscopic compass and its deviations. L., 1929. 2nd ed. N.Y.: MacMillan, 1944. 289 p.
105. *Schlick O.* Gyroskopischer Einfluss Rotierender Schwungrader and Bord von Schiffen // *Ztschr. Vereines Dt. Ing.* 1906. Bd. 50, N 36. S. 231–236.
106. *Schlick O.* Versuche mit dem Schiffskreisel // *Ibid.* N 48. S. 478–481.
107. *Schmid E.* Angewandte Kreiseltheorie (Bulgakov B.V.) // *Zbl. Mech. und Werkstofforsch.* 1940. Bd. 10, H. 5. S. 198.
108. *Schuler M.* The Anschütz gyro compass: History, description, theory, practical use. Anschütz and co, 1910. P. 51–81.
109. *Schuler M.* Der Kreiselkompass unter Einfluss der Schiffsschwingungen // *ZAMM.* 1922. Bd. 2, H 4. S. 233–250.
110. *Schuler M.* Die Störung von Pendel und Kreiselapparaten durch die Beschleunigung des Fahrzeuges // *Phys. Ztschr.* 1923. Bd. 24, N 16. S. 344–350.
111. Sperry gyroscope company in Brooklin. Kreisel mit lotrechter Rotationsachse insbesondere ein Kreiselhorizont. Pat. 600257. (Deutsches Reich), Kl. 32c, Gr. 25.50; Ausgegeben am 25.07.34.
112. *Sweeny F.R.* Geographic position indicator. Pat. 1086246 (USA). Publ. 3.02.14; Appl. 22.06.11.
113. *Thomson W., Tait P.* Treatise on natural philosophy. 2nd ed. Cambridge: Univers. press, 1879. 508 p.

## Содержание

<b>Предисловие</b> .....	5
<b>К читателю</b> .....	6
<b>1. Жизнь и трудовая деятельность</b> .....	7
1.1. Обстановка в Московском университете в начале XX века .....	8
1.2. Юношеские годы .....	18
1.3. Начало трудового пути .....	19
1.4. Б.В. Булгаков на кафедре прикладной механики .....	22
<b>2. Научная деятельность</b> .....	26
2.1. Ранние труды .....	26
2.2. Исследования по теории гироскопов .....	28
2.3. Докторская диссертация: монография “Прикладная теория гироскопов” .....	41
2.4. Теория колебаний .....	54
<b>Заключение</b> .....	76
<b>Основные даты жизни и деятельности Б.В. Булгакова</b> .....	79
<b>Библиография</b> .....	80
Научные труды Б.В. Булгакова .....	80
Материалы Архива Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова .....	81
Цитируемая литература .....	82

Научно-биографическое издание

**Ким** Александра Антоновна,  
**Тюлина** Ирина Александровна

**Борис Владимирович Булгаков**  
**1900–1952**

*Утверждено к печати*  
*Редколлегией серии*  
*“Научно-биографическая литература” РАН*

Зав. редакцией *А.А. Фролова*  
Редактор *М.В. Грачева*  
Художественный редактор *Г.М. Коровина*  
Технический редактор *Т.В. Жмелькова*  
Корректор *З.Д. Алексеева*

Набор и верстка выполнены в издательстве  
на компьютерной технике

ЛР № 020297 от 23.06.1997

Подписано к печати 15.05.2000. Формат 60 × 90 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Гарнитура Таймс. Печать офсетная  
Усл.печ.л. 5,5. Усл.кр.-отг. 5,8. Уч.-изд.л. 5,9  
Тип. зак. 349

Издательство “Наука”  
117864 ГСП- 7, Москва В-485, Профсоюзная ул., 90  
Санкт-Петербургская типография “Наука”  
199034, Санкт-Петербург В-34, 9-я линия, 12

## В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ “НАУКА”

готовятся к печати:

*Михеев В.Р.*

ГЕОРГИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ БОТЕЗАТ

1882–1940

(Серия “Научно-биографическая литература”)

10 л.

Книга посвящена выдающемуся русскому ученому, талантливому конструктору и изобретателю Г.А. Ботезату. Г.А. Ботезат – основоположник науки о динамике полета летательных аппаратов, один из патриархов российской авиационной науки, руководитель Технического комитета Управления военно-воздушного флота. Находясь с 1918 г. в эмиграции, Г.А. Ботезат построил первый вертолет, основал в Нью-Йорке первую в мире вертолетно-строительную фирму. Г.А. Ботезат был профессором Новочеркасского и Петроградского политехнических институтов, преподавал в Мичиганском и Массачусетском университетах. Научная биография Г.А. Ботезата написана на основе изучения его работ и материалов из российских и американских архивов.

Для читателей, интересующихся историей мировой науки и техники.

*Онопrienко В.И.*

ФЛОРЕНСКИЕ

(Серия “Научно-биографическая литература”)

28 л.

Книга посвящена представителям известного рода Флоренских, внесших значительный вклад в развитие российской науки, особенно геологических знаний. Приведены очерки о А.И. Флоренском (1850–1908), П.А. Флоренском (1882–1937), А.А. Флоренском (1882–1937), В.П. Флоренском (1911–1956), К.П. Флоренском (1915–1982), М.П. Флоренском (1921–1961). На большом документальном материале прослежена история родовых связей и традиций, судьба Флоренских в XIX–XX вв. Значительное место занимают документы из личных архивов семьи Флоренских, избранное из переписки с В.И. Вернадским и другими учеными. Большая часть материалов публикуется впервые.

Для читателей, интересующихся историей науки и культуры.

**АДРЕСА КНИГОТОРГОВЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ  
ТОРГОВОЙ ФИРМЫ “АКАДЕМКНИГА”**

**Магазины “Книга—почтой”**

121009 Москва, Шубинский пер., 6  
197345 Санкт-Петербург, ул. Петрозаводская, 7

**Магазины “Академкнига” с указанием отделов “Книга—почтой”**

690088 Владивосток, Океанский проспект, 140 (“Книга—почтой”)  
620151 Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 137 (“Книга—почтой”)  
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, 289 (“Книга—почтой”)  
660049 Красноярск, ул. Сурикова, 45 (“Книга—почтой”)  
117312 Москва, ул. Вавилова, 55/7  
117192 Москва, Мичуринский проспект, 12  
103642 Москва, Б. Черкасский пер., 4  
630091 Новосибирск, Красный проспект, 51 (“Книга—почтой”)  
630090 Новосибирск, Морской проспект, 22 (“Книга—почтой”)  
142292 Пушкино, Московской обл., МР “В”, 1 (“Книга—почтой”)  
443002 Самара, проспект Ленина, 2 (“Книга—почтой”)  
199034 Санкт-Петербург, В.О., 9-я линия, 16  
191104 Санкт-Петербург, Литейный проспект, 57  
199164 Санкт-Петербург, Таможенный пер., 2  
194064 Санкт-Петербург, Тихорецкий проспект, 4  
634050 Томск, Набережная реки Ушайки, 18 (“Книга—почтой”)  
450059 Уфа, ул. Р. Зорге, 10 (“Книга—почтой”)  
450025 Уфа, ул. Коммунистическая, 49

---

*По вопросам приобретения книг  
просим обращаться также  
в издательство по адресу:  
117864, Москва, ул. Профсоюзная, 90  
тел. (095) 334-98-59*

---

НАУЧНО-БИОГРАФИЧЕСКАЯ  
ЛИТЕРАТУРА



*А. А. Ким*  
*И. А. Тюлина*

**Борис Владимирович**  
**БУЛГАКОВ**

## НАУЧНО-БИОГРАФИЧЕСКАЯ ЛИТЕРАТУРА

Книга приурочена к столетию со дня рождения выдающегося отечественного ученого Бориса Владимировича Булгакова (1900-1952) – автора классических трудов по прикладной теории гироскопов, теории колебаний и первых работ по теории оптимального управления

