

УДК 527.62

DOI 10.51691/2541-8327_2021_9_3

РАЗВИТИЕ НАУКИ АЭРОНАВИГАЦИИ В РОССИИ

Скуднева О В,

старший преподаватель

Кафедра «Вычислительная математика и математическая физика»

Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана

Москва, Россия.

Аннотация. В статье приведена история науки аэронавигации, дающей возможность без визуального контакта с известными ориентирами определять своё местоположение. Показана роль древних мореплавателей, использующих свойства магнита, звёздное небо и солнце для определения маршрута корабля при морских путешествиях. Описано дальнейшее бурное развитие навигационных и пилотажных систем в авиации и мореплавании после изобретения гироскопа. В тексте статьи рассматривается анализ этапов становления и развития, показаны цели и задачи отечественной и зарубежной науки аэронавигации для выполнения навигационных задач летательных аппаратов в настоящее время, отмечено особое место в развитии самолётной навигации курсовых систем, работающих от датчика магнитного курса, и систем измерения воздушной скорости, а также автономных систем инерциальной навигации, основанных на использовании не возмущаемого ускорениями маятника Шулера.

Ключевые слова: летательный аппарат, курсовая система, инерциальная система, начальная выставка стояночного курса, навигационно-пилотажная система.

DEVELOPMENT OF THE SCIENCE AIR NAVIGATION IN RUSSIA***Skudneva O. V.,****Senior lecturer**Department of Computational Mathematics and Mathematical Physics,**Bauman Moscow State Technical University**Moscow, Russia*

Annotation. The article presents the history of the creation of the science of air navigation, which allowed a person in the process of evolution to develop a mechanism that makes it possible to determine his location without visual contact with known landmarks. The role of navigators to use the properties of a magnet, the starry sky and the sun to determine the route of the ship's movement to the intended goal during sea voyages is shown. The lack of objective information about the location significantly hindered the development of aviation and navigation. The main role in the creation of navigation systems was played by scientists of mathematics and physics, and the creation of the gyroscope by the inventors determined the further rapid development of navigation and aerobatic systems in aviation. The text of the article analyzes the stages of development, shows the goals and objectives of the formation of domestic and foreign science of air navigation for performing navigation tasks of aircraft at the present time. A special place in the development of aircraft navigation has been acquired by course systems operating from a magnetic course sensor and airspeed measurement systems. Later, autonomous systems of inertial navigation appeared, based on the creation of a pendulum undisturbed by accelerations. The further development of which was the appearance of integrated navigation systems that use the correction of accumulated errors from ground-based radio-distance and satellite navigation systems. The development of unmanned aerial vehicles (UAVs) will require the creation of automatic navigation and aerobatic systems (NPS) that fully solve the issues of unmanned take-off, flight and automatic safe landing. The development of such NPS

is based on knowledge of the laws of applied mathematics and the ability to implement this knowledge in the development of software and mathematical support (PMO) as part of the on-board digital computer of the aircraft.

Keywords: aircraft, course system, inertial system, initial exhibition of the parking course, navigation and aerobatic system.

История и анализ этапов развития отечественной и зарубежной науки аэронавигации. Навигация (от лат. *navigo* – плыву на судне), интересная людям с древних времён, ранее не выделялась как самостоятельное научное направление, а «аэронавигация» (от греч. *aer* – воздух и лат. *navigo*), т. е. воздухоплавание, формировалась уже как наука о методах и средствах вождения летательных аппаратов и определения их координат в пространстве в более близкие к нам времена. [1]. Для древних путешественников навигационными средствами служили, прежде всего, естественные земные ориентиры (например, горы), также очень важное значение имели искусственные навигационные ориентиры - прибрежные маяки, и один из них, Александрийский маяк, считался одним из семи чудес света. Для дальних морских путешествий эти средства становились недоступными, и тогда днём приходилось ориентироваться по Солнцу, а ночью - по звездам, в первую по альфе Малой Медведицы – Полярной звезде, при этом для грубого определения местоположения и оценки широты определяли угол между направлением на Полярную и плоскостью местного горизонта.

Первые навигационные приборы представляют интерес и в наши дни благодаря оригинальности конструкции и принципам действия. Например, Китайская Колесница - немагнитный компас – устройство в виде колесницы с человечком, все время указывающим на юг. Считается, что год её изобретения 2634 до н.э.! В основе принципа действия Колесницы лежит геометрия Евклида, ее конструкция подвергалась усовершенствованию на протяжении всего исторического периода до наших дней. До изобретения

магнитного компаса появились антикитерский механизм, состоящий из тридцати бронзовых шестерен и предназначенный для астрономических расчётов, а также астролябия (370 г. до н.э.) и более простые устройства – квадрант, секстант и др, первоначально созданные для архитектурных расчётов, а позже применяемые для определения высоты небесных тел.

Мощнейшим толчком в развитии навигации стало изобретение магнитного компаса в Китае во времена правления династии Сун (960-1274 гг). По мнению итальянцев, компас изобрел Флавио Джойе в 1302 году. В Неаполе установлен памятник в его честь. Однако Флавио лишь усовершенствовал конструкцию компаса, и снабдил прибор делениями для измерений и расчётов. Позже намагниченную стрелку стали помещать в карданов подвес. Все вышеперечисленные средства и приборы обладали весьма невысокой точностью. Компас перестаёт работать вблизи металлических предметов, кроме того в магнитном поле Земли постоянно происходят возмущения, качка на корабле тоже сбивает работу приборов. Звезды и Солнце могут оказаться скрытыми за тучами. Поэтому дальнейшее развитие навигации требовало принципиально нового устройства, прежде всего не зависящего от внешних воздействий, для автономной работы на корабле, а позже – на воздушном судне. И таким устройством, открывшим новую страницу в навигации уже как в серьёзной науке, разделе теоретической механики, опирающейся на математику, стал гироскоп.

Принцип действия гироскопа, как тела, вращающегося вокруг неподвижной точки и способного сохранять в инерциальном пространстве направление оси собственного вращения, вначале был описан математиками: Эйлером (уравнение движения для частного случая, когда центр масс твердого тела совпадает точкой опоры, 1758 г.), Лагранжем (решил в 1788 г. задачу вращения волчка, центр масс которого расположен выше точки опоры, но находится на оси вращения), София Ковалевская в 1888 г. (решила задачу для центра масс волчка в произвольной точке). На основе разработанных

теоретических положений В 1742 г. английский инженер Серсон разработал искусственный горизонт в виде перевернутой быстровращающейся чаши, приводимой в движение шнуром. В 1886 г. адмирал Флерие разработал способ вращения искусственного горизонта сжатым воздухом со скоростью 10000 оборотов в минуту. Понятие «гироскоп» в 1852 году ввёл физик Л. Фуко для названия созданного им прибора.

После открытия и описания принципа работы гироскопа в Европе и России начались работы по конструкторской разработке гироскопических приборов. Был создан первый гироскопический компас, гироскопическую технику начали производить на промышленных предприятиях.

Перед началом Первой мировой войны в мире началось небывалое ускорение развития промышленности. Создавались новые образцы транспорта, летательные аппараты, корабли, военные машины. Вместе с ними резко возросла потребность в системах навигации и гироскопических приборах. В середине 20-го века человек устремился в космос, и навигационные приборы потребовались уже для спутников Земли и ракет.

Таким образом, в 20-ом веке стремительно развивалась прикладная гироскопия, создавались и внедрялись оригинальные инженерные разработки и технические решения, нацеленные на создание гироскопических приборов и систем, управляющих объектами на воде, под водой, в воздушном пространстве и в космосе. Становилось все более очевидным, что решение навигационных задач не менее важно для современных подвижных объектов, чем вопросы создания новых конструкций, двигателей и т. п. Поэтому развитие техники настоятельно требовало создания надежных навигационных приборов, способных работать не только на поверхности Земли, но и в дальнем космосе и морской пучине. Так появились новые сочетания “воздушная навигация”, “наземная навигация”, “космическая навигация”, “инерциальная навигация”.

Автономная навигация. Методы определения местоположения объекта и его курса, с использованием звездного неба имеют большое значение, тем не менее более привлекательным является использование автономной системы счисления пути. В качестве примера можно указать на самолетную навигацию, где для определения изменений местоположения и данные о курсе, получаемые от корректируемого магнитного компаса, комбинируются с измерениями воздушной скорости. В результате инструментальных погрешностей и местных изменений воздушных потоков (ветра) по высоте, с течением времени возникает ошибка, неприемлемая с точки зрения современных требований навигации. Некоторые улучшения могут быть достигнуты путем использования доплера радиолокатора; сдвиг частот, создаваемый в радиолокаторе при возвращении отраженного от Земли сигнала, используется для определения относительной скорости движения объекта. Хотя таким образом исключаются ошибки, связанные с ветром, остаются погрешности в определении курсового угла даже при использовании гирокомпаса. Проблема определения курса становится очень трудной в районах высоких широт из-за сложности определения направления малой величины горизонтальной составляющей вектора магнитного поля Земли (МПЗ), что не позволяет выполнять требования по точности навигации. Все эти несовершенства могут быть исключены или сведены до минимума при использовании правильно спроектированной инерциальной системы навигации.

Инерциальная навигация. Автономные системы инерциальной навигации, не зависящие от электромагнитного излучения и магнитного поля Земли, являются результатом развития современной техники навигационного оборудования, используемого для счисления пути. Эти системы не требуют данных о ветровых или морских течениях, не излучают энергии, не нуждаются в магнитном компасе, радиосредствах, специальных картах. Их точность, не

зависящая от высоты полета и характеристик рельефа, почти полностью определяется соответствующими характеристиками элементов аппаратуры.

Принципы инерциальной навигации, простые и легко понятные, были установлены почти 300 лет назад Ньютоном. Законы механики, на которых основываются, системы инерциальной навигации, стали известными после опубликования его труда «Математические основы натуральной философии». Для осуществления навигации нет необходимости в привлечении каких-либо других основных принципов, однако прошло почти три столетия, прежде чем первая инерциальная система наведения была успешно реализована на практике. Как это часто бывает, принципы являются простыми, но создание реальной аппаратуры требует сложной технологической базы.

Первые работы, касающиеся построения системы инерциальной навигации, были опубликованы в классической работе Шулера (1923 г.), где описан принцип маятника с длиной нити, равной радиусу Земли, там же показана возможность инерциального измерения скорости. Физическая идея, лежащая в основе системы, состоит в том, что если построить математический маятник, длина которого от точки подвеса до колеблющейся материальной точки равна радиусу Земли, то ускорение по касательной к поверхности Земли не заставит невесомую нить маятника отклониться от радиуса, проведенного от объекта к центру Земли. Тогда такой маятник, настроенный на период 84 мин., всегда будет указывать направление местной вертикали даже в процессе резких маневров объекта. Хотя о физической реализации такого маятника не может быть и речи, маятник, реализованный с помощью схмотехники любым путем и имеющий период 84 мин, будет служить этой цели.

Приборы, на работе которых основан принцип действия инерциальной навигационной системы это акселерометры - приборы, реагирующие на ускорение и датчики угловой скорости, измеряющие центробежное ускорение. [3,4,5]. С их помощью определяют угловые взаимные отклонения систем координат: связанной с корпусом прибора и географической системы

координат (связанной с Землёй, с осями, ориентированными на север, по местной вертикали и на восток), получив углы ориентации: рыскание (курс), тангаж и крен. Интегрируя показания акселерометров в бортовых вычислительных машинах, получают необходимые для навигации данные широту, долготу и высоту. В ИНС входит курсовертикаль и система определения координат. Курсовертикаль обеспечивает возможность определения ориентации в географической системе координат, что позволяет правильно определить положение объекта.

Инерциальные навигационные системы делятся на платформенные, имеющие гиросtabilизированную платформу (ПИНС) и бесплатформенные (БИНС). В платформенной системе платформа, находящаяся в кардановом подвесе, непрерывно стабилизируется по местному горизонту – по силе тяжести или по силе гравитации. На платформе устанавливаются гироскопы и акселерометры. Параметры пространственной ориентации - углы курса, крена и тангажа снимаются непосредственно с датчиков углов, находящихся на осях кардановых рам. Координаты летательного аппарата определяются в вычислителе, расположенном вне платформы. В БИНС акселерометры и гироскопы жестко связаны с корпусом прибора. БИНС на базе таких гироскопов не имеет подвижных частей. В БИНС гиросtabilизированная платформа и углы пространственной ориентации моделируется виртуально внутри компьютера, а гироскопы и акселерометры устанавливаются непосредственно на борту движущегося объекта. Весьма плодотворной оказалась идея использования в алгоритмах систем инерциальной навигации дополнительной информации, учитывающей неоднородность гравитационного поля Земли. Приборы, измеряющие градиенты гравитационного поля Земли, называются градиентометрами. Это направление называется навигацией по геофизическим полям. В настоящее время большинство навигационных задач с очень высокой точностью (доли

метра) решается с помощью систем спутниковой навигации GPS (Global Position System) и ГЛОНАСС [4,5,6,7].

Интегрированные системы навигации. Интегрированные системы навигации используют данные навигационных систем различных принципов действия, таких как СНС – спутниковых систем навигации, систем РСДН и РСБН – радиосистем ближней и дальней навигации, магнитных средств определения курса, измеряющих параметры магнитного поля Земли, одометров (приборов с многовековой историей для счисления пройденного пути). Обработка полученных данных происходит в бортовых вычислительных машинах в составе навигационных систем летательного аппарата или морского судна. Алгоритмы обработки данных имеют в своей основе, как правило, фильтр Калмана. Основным направлением по совершенствованию таких систем в настоящее время является уменьшение весовых и габаритных характеристик.

Современная классическая навигация обеспечивает потребности пилотируемой и беспилотной авиации, потребности военно-промышленного комплекса и имеет в настоящее время десятки потребителей в различных областях промышленности и бытовой техники.

В настоящее время Теория систем инерциальной навигации является вполне сформировавшейся наукой. Однако последние достижения в области прикладной математики, теоретической механики, электроники, информатики внушают нам надежду на появление принципиально новых типов гироскопов и навигационных комплексов.

На сегодняшний день наиболее перспективной воздушной навигацией является инерциальная навигация, как полностью автономная и обладающая особенно высокой динамической точностью в определении пространственной ориентации – измерении углов крена, тангажа, курса и изменений скорости, что необходимо для высокоманевренных ЛА.

Интегрированные радио-инерциальные системы навигации позволяют использовать преимущество каждой системы и обеспечивать выполнение всего объема навигационно-пилотажных задач.

Создание **автономной навигационной аппаратуры** стало одним из важнейших направлений в развитии авиационной техники. Первым применением инерциальных методов в навигации можно считать появление корабельных гирокомпасов. Одновременно возникла идея создания систем инерциальной навигации, в которых текущее местоположение движущегося объекта определяется интегрированием измеряемых на борту ускорений. При этом отмечается замечательное свойство – полная автономность систем инерциальной навигации и важная роль, какую играет теоретическая механика и математика при решении практических задач в истории рождения и становления инерциальной навигации [2,3,7].

Исследование цели и задач изучения истории науки становления отечественной и зарубежной аэронавигации в 20 веке.

Разработка основ инерциальной навигации относится к 1930-м годам. Большой вклад в неё внесли: в СССР – Б. В. Булгаков, А.Ю. Ишлинский, Е.Б. Левенталь, Г.О. Фридлендер, в Германии – М. Шулер и в США – Чарльз Дрейпер. Значительную роль в теоретических основах инерциальной навигации играет теория устойчивости механических систем, большой вклад в которую внесли российские математики Ляпунов и Михайлов.

Принцип силовой гироскопической стабилизации в отечественной инерциальной навигации был предложен С.А. Ноздровским в 1924 году. Идею определения местоположения объекта с помощью двукратного интегрирования по времени проекций вектора ускорения, измеряемого на борту, запатентовал Рейнгард Вуссов в 1905 году. Указанная заявка в своей основе содержала идею метода навигации, в дальнейшем названного инерциальным. Суть этого метода состоит в определении координат объекта

посредством расположенных на нем гироскопов, маятников (акселерометров) и часов без использования во время движения сторонней информации. Кроме того, практически одновременно с Вуссовым была запатентована идея американского и русского изобретателей М. Керри (1903) и В. В. Алексеева (1911) инерциальных систем геометрического типа, которые должны обеспечивать определение координат объекта, движущегося по поверхности вращающегося земного шара. В 1932 году инженеры Л.М. Кофман и Е.Б. Левенталь предложили новую схему инерциальной системы для навигации объектов, движущихся вблизи поверхности Земли. Оказалось, что если период свободных колебаний платформы, управляемой акселерометрами, выбрать равным $83,3$ мин (R – радиус Земли, g – ускорение свободного падения, T – период Шулера – период колебаний математического маятника, длина нити которого равна радиусу Земли), то платформа приобретает удивительное свойство невозмущаемости, когда ее угловое положение не зависит от ускорений объекта, на котором установлена платформа. Идея Кофмана и Левенталья как бы соединила в одном устройстве два упомянутых ранее метода навигации: метод, по которому с помощью гироскопа и маятника моделируется астрономическое определение места, и метод вычисления пройденного объектом пути двойным интегрированием показаний акселерометров. После второй мировой войны работы по созданию ИНС энергично проводились в СССР, США и некоторых странах Западной Европы. Прогресс в создании систем инерциальных систем был тесно связан с математическими работами в области небесной механики, так как дифференциальные уравнения пространственных систем инерциальной навигации совпадают с уравнениями движения небесных тел. Решение задачи Коши уравнений движения небесных тел является неустойчивым по Ляпунову, поэтому создание работоспособных алгоритмов обработки информации в системах инерциальной навигации потребовало больших усилий от целых научных коллективов математиков и механиков. Известны

многочисленные и очень остроумные технические решения, предложенные при разработке систем инерциальной навигации. Практическая реализация методов инерциальной навигации была связана со значительными трудностями, вызываемыми необходимостью обеспечить высокую точность и надёжность работы всех устройств при заданных весах и габаритах. Преодоление этих трудностей становится возможным благодаря созданию специальных технических средств – малогабаритных базовых элементов и электро-радио изделий (ЭРИ) для инерциальной навигационной системы управления летательным аппаратом (ЛА).

Аэронавигация в 21 веке. Оценка перспективы и возможности развития науки аэронавигации на различных типах летательных аппаратов. В настоящее время получает все более широкое применение беспилотные летательные аппараты (БПЛА), используемые, в основном, как средство разведки и боевого применения, работающие в условиях радиоуправления [4]. Эксплуатация таких транспортных (без пассажиров) БПЛА должна выполняться в условиях автономного полета при отсутствии или неустойчивой работе средств радиокоррекции и радиоуправления. Для решения задач навигации в составе бортового оборудования должны быть разработаны навигационно-пилотажные системы (НПС) на основе курсовых и инерциальных систем с решением в бортовой ЦВМ навигационно-пилотажных задач прикладной математики от взлёта до посадки ЛА. На первом этапе отладки такие НПС должны дублировать работу второго пилота и штурмана [6,7], а в дальнейшем обеспечивать беспилотный полёт транспортного БПЛА. В связи с этим приобретает особую роль знание точного значения курса, а значит и роль начальной выставки курса ЛА.

В настоящее время приходит понимание роли Арктики в дальнейшей судьбе страны и осознание ее роли в освоении природных ресурсов и дальнейшего развития промышленности и мировой экономики. Расширение работ по освоению Арктики потребует

значительного увеличения грузоперевозок, обострит требования по безопасности полетов ЛА и точности доставки грузов на место назначения. Поэтому точность прилета на конечный (контрольный) пункт маршрута и выполнение безопасной посадки пилотируемых и беспилотных ЛА в условиях Заполярья приобретает первостепенное значение.

Основные трудности эксплуатации ЛА в Арктике заключаются в резкой непредсказуемой смене взлетно-посадочного минимума (вплоть до нулевого), в значительных отрицательных температурах, ураганных ветрах и обледенении, длительной полярной ночи, сложности поддержания требуемого качества взлетно-посадочных полос (ВПП), а также сложности определения магнитного и истинного курса ЛА вблизи магнитного и географического полюсов. Все это усиливает зависимость выполнения полетов от так называемого, «человеческого фактора».

Несмотря на сложности работы в экстремальных условиях Заполярья, следует ожидать расширения функций применения транспортных пилотируемых и беспилотных ЛА и совершенствование законов и способов решения навигационных задач на основе применения интегрированных НПС, использующих в своем составе курсовые, инерциальные системы, радиосистемы ближней (РСБН) и дальней (РСДН) навигации, спутниковые навигационные системы (СНС) и радиодальномерные системы (РДС).

Такие интегрированные НПС должны дублировать работу пилотов на всех этапах полета, вплоть до автоматической посадки ЛА.

Заключение. Исходя из изложенного, следует сделать вывод, что развитие современной науки и техники невозможно без навигации и одной из ее ведущих областей – инерциальной навигации. Развитие навигации прошло четыре основных этапа и охватывает довольно широкие временные рамки.

Первый этап (до 1930 г.) науки аэронавигации характеризовался научными достижениями, позволявшими выполнять полет на небольшие

расстояния при видимости горизонта и наземных ориентиров, в хороших метеоусловиях.

На *втором этапе* (начало 30-х — середина 50-х годов) науки аэронавигации созданы научные предпосылки, позволившие разработать оборудование для самолетовождения новых тяжелых самолетов, совершающих длительные полеты на большие расстояния в сложных метеоусловиях, был разработан ряд новых приборов: авиагоризонт, гирополукомпас, гировертикали, астрокомпасы, курсовые системы, РЛС, системы посадки, автопилоты, РСБН, РСДН, ДИСС, аналоговые вычислители.

Третий этап (середина 50-х – конец 60-х годов) науки аэронавигации связан с научной разработкой навигационных комплексов и характеризуется увеличением парка самолетов, ростом интенсивности воздушного движения, появлением самолетов с высокими техническими характеристиками, возникновением идеи о комплексировании, объединении отдельных датчиков, устройств и систем в пилотажно-навигационные комплексы.

Современный этап (начало 70-х годов – по настоящее время) науки аэронавигации позволяет создать на основе решения задач прикладной математики искусственный технический интеллект и характеризуется дальнейшим ростом интенсивности и регулярности воздушного движения повышением требований к пилотажно-навигационному оборудованию.

Развитие авиации в 21-м веке приведет к созданию новых видов ЛА – транспортных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), гибридных дирижаблей, экранопланов. Это свяжет задачи развития аэронавигации с решением навигационно-пилотажных задач, позволяющих выполнять автоматический взлет, полет и безопасную автоматическую посадку ЛА [6, 7, 8]. Это позволит реализовать практическое создание на борту ЛА искусственного технического интеллекта, решающего в полном объеме вопросы беспилотного взлета, полета с автоматической безопасной и точной посадкой ЛА.

Библиографический список

1. Авиация. Энциклопедия. – М.: Научное издательство «Большая Российская Энциклопедия», ЦАГИ, 1994.
2. Акиндеев Ю.А. и др. Аппаратура измерения курса и вертикали на воздушных судах гражданской авиации // Машиностроение. г. Москва. 1989.
3. Мелешко В. В. Инерциальные навигационные системы. Начальная выставка / В. В. Мелешко. - К.: Корнійчук, - 1999. – 126с.
4. Одинцов А. А. Ориентация объектов в магнитном поле Земли / А.А. Одинцов А. А., В. В. Мелешко, С.А. Шаров. - К.: Корнійчук, - 2007. – 152с
5. К.Ф. О`Доннел Инерциальная навигация / О`Доннел К.Ф. - М.: Наука. – 1969. – 592с.
6. Селезнев В. П. Навигационные устройства / В.П. Селезнев – М.:Машиностроение, – 1974. – 600с
7. Скуднева О.В. Курсовые системы летательных аппаратов// Авиакосмическое приборостроение. Научтехиздат. 2019 №3 с.3-4

Оригинальность 77%