

В. В. Рождественский

Динамика подводной лодки

Часть первая

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 656
ББК 39.1
В11

В11 **В. В. Рождественский**
Динамика подводной лодки: Часть первая / В. В. Рождественский – М.: Книга по Требованию, 2013. – 353 с.

ISBN 978-5-458-28273-4

Для студентов специальностей и "Гидроаэродинамика" и "Судостроение и судоремонт" кораблестроительных вузов и факультетов, аспирантов, инженерно-технических работников конструкторских бюро и институтов судостроительной промышленности. Вопросы динамики ПЛ при ручном и автоматическом управлении в погруженном положении. Силы, действующие на ПЛ, уравнения движения, методы их решения, критерии устойчивости и маневренности. Автоматическая стабилизация кинематических параметров ПЛ, принципы действия автоматических систем управления движением.

ISBN 978-5-458-28273-4

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2013

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2013

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

ПРЕДИСЛОВИЕ

Возросшие требования к динамическим качествам подводных лодок явились толчком для разработки способов определения в стадии проектирования характеристик управляемости. Ввиду сложности математического аппарата, а также многообразия задач динамики подводного плавания к практическому решению этих задач привлекаются высококвалифицированные инженеры, имеющие кораблестроительное образование. Для подготовки таких специалистов в течение последних десяти лет на кораблестроительном факультете читается курс динамики подводных лодок, в котором излагаются основные методы решения задач, встречающихся в практике проектирования и эксплуатации подводных лодок, и формулируются требования, предъявляемые к их динамическим качествам.

Начиная с 1963 г., курс динамики подводных лодок был расширен и дополнен результатами большого числа новых исследований в этой области. Одним из таких дополнений является введение раздела автоматического управления движением, в котором рассматривается поведение подводных лодок, оборудованных автоматическими системами управления.

В последние годы появилось большое число исследований в области динамики подводных лодок как при ручном, так и при автоматическом управлении движением, опубликованных в отдельных ведомственных изданиях. Однако систематического описания вопросов динамики подводной лодки с учетом результатов указанных исследований в данное время не имеется.

Сказанное выше обусловило необходимость создания учебника по динамике подводных лодок для кораблестроительных вузов.

В основу настоящего учебника положены курсы лекций, читаемые автором на протяжении ряда лет для студентов кораблестроительного факультета специальностей «Гидроаэродинамика» и «Судостроение и судоремонт» (специализация — Проектирование и постройка подводных лодок).

При составлении учебника были использованы исследования в области динамики подводных лодок, выполненные различными

авторами в ЦНИИ им. А. Н. Крылова, ЦАГИ, ЛКИ и Централь-
ных конструкторских бюро подводного судостроения.

Автором сделана попытка систематизировать данные по ди-
намике подводных лодок при автоматическом управлении дви-
жением и разобраны примеры их поведения при использовании
автоматических систем управления.

Учебник содержит 9 глав и по производственным причинам
разбит на две части.

В первой части — введение, главы I, II, III, IV; во второй —
главы V, VI, VII, VIII, IX. В главах I—V и § 1 гл. VII рассмот-
рены вопросы динамики ПЛ при ручном управлении. В гла-
вах VI, VII (кроме § 1), VIII излагаются законы автоматиче-
ского управления движением и исследуются кинематические па-
раметры подводной лодки при наличии автомата, а также основ-
ные принципы работы автоматических систем управления в том
объеме, в каком они необходимы инженеру-кораблестроителю
при составлении требований к автоматическим системам и оценке
поведения подводной лодки при их работе. При этом предпола-
гается, что читатель знаком с общим курсом «Основы автома-
тики», излагаемым на кораблестроительном факультете.
В главе IX кратко изложены методы определения гидродинами-
ческих сил и моментов, действующих на ПЛ в натуральных усло-
виях.

Для студентов специальности «Судостроение и судоремонт»
§§ 8, 9 гл. I; §§ 1, 2, 5 гл. II; § 4 гл. III; § 3 гл. IV при изучении
курса необязательны.

Автор выражает признательность научному редактору к. т. н.
Е. Б. Юдину, рецензентам — к. т. н. Я. Т. Пугачеву и к. т. н.
Я. Я. Балицкому за большую работу, сделанную ими при на-
учном редактировании и рецензировании книги.

ВВЕДЕНИЕ

В течение последних двух десятилетий коренным образом изменились тактические требования, предъявляемые к подводным лодкам. Тактико-технические данные современных атомных подводных лодок (ПЛ) таковы, что они могут находиться в погруженном положении непрерывно в течение двух-трех месяцев, дальность их плавания в погруженном положении составляет 25—30 тысяч миль, глубина погружения достигает 400 м.

Благодаря ряду новых качеств ПЛ широко используются в арктических районах и могут длительное время находиться в подледном плавании.

В соответствии с новыми тактико-техническими требованиями изменились маневренные качества ПЛ. Если ПЛ ранней постройки способны были совершать только так называемые плоские маневры (в вертикальной и горизонтальной плоскостях), то современные ПЛ могут выполнять сложные пространственные маневры, которые используются для уменьшения вероятности обнаружения ПЛ противолодочными средствами противника. Отрабатываются такие пространственные маневры, как циркуляция с изменением глубины, движение по спиральной траектории с горизонтальной осью и т. д.

Появились новые требования к непотопляемости ПЛ. К подводным лодкам старой постройки предъявлялось требование обеспечения надводной непотопляемости (ПЛ должна была оставаться на плаву при затоплении одного отсека прочного корпуса и двух цистерн главного балласта, прилегающих к отсеку прочного корпуса с одного борта) и требование обеспечения возможности всплытия с грунта на поверхность при затоплении одного отсека прочного корпуса в погруженном положении. Последнее было вызвано тем, что отсутствовали средства спасения ПЛ при авариях на больших глубинах.

Маневрирование ПЛ в океанах потребовало нового подхода к задаче о подводной непотопляемости, а развитие противоаварийных средств способствовало решению этой задачи. Было выдвинуто и реализовано требование одержания по глубине и дифференту аварийной ПЛ на всех глубинах, вплоть до предельной,

с целью предотвращения ее гибели и вывода на новый балансировочный режим в погруженном положении (обычно на сравнительно небольшой глубине). Естественно, что в условиях боевого маневрирования ПЛ в погруженном положении по новому оценивается фактор времени. Ставится задача об оптимальном маневрировании с точки зрения быстродействия. Не менее важен фактор времени и при аварийном маневрировании, когда возможность спасения ПЛ оценивается секундами.

Положение ПЛ определяется в каждый момент времени кинематическими параметрами. Динамика подводного плавания подразумевает исследование этих параметров при различных видах движения ПЛ. Во всех случаях для упрощения задачи кинематические параметры относятся к центру тяжести. Их определение позволяет построить траекторию движения и положение на ней подводной лодки.

Кинематические параметры ПЛ зависят от ряда факторов, таких как внешние импульсные воздействия, перекладка горизонтальных и вертикальных рулей, действие остаточной плавучести и т. д. Гидродинамическая реакция ПЛ на эти возмущения различна, она в значительной степени определяется формой и размерами корпуса и оперения ПЛ. Способность подводной лодки сохранять движение по заданной траектории или изменять его под воздействием органов управления называется управляемостью.

Управляемость представляет собой сочетание двух противоположных свойств: маневренности и устойчивости. Маневренностью называется способность ПЛ изменять направление своего движения под воздействием рулей или какого-либо другого органа управления. Устойчивостью называется способность ПЛ сохранять направление своего движения. Их разумное сочетание создает благоприятные условия для нормальной эксплуатации подводной лодки.

Кинематические параметры, определяющие положение ПЛ, в значительной степени зависят от режима ее движения. При нормальных эксплуатационных режимах движения в вертикальной плоскости ПЛ имеет небольшие углы атаки ($0-3^\circ$), в то же время аварийные режимы характеризуются большими углами атаки, величины которых находятся в диапазоне значений от 0 до 360° .

Исследование кинематических параметров необходимо для выяснения возможности безаварийного выполнения того или иного маневра. Особенно это касается глубины погружения, углов крена и дифферента, так как максимальные значения их обуславливаются требованиями безопасности плавания ПЛ в погруженном положении. Изменение глубины при маневрах ПЛ ограничивается предельной глубиной погружения; при углах крена, больших 45° , дифферента свыше 30° нарушается нормаль-

ная работа механизмов, систем и устройств подводной лодки. В стадии проектирования такие элементы движения ПЛ, как радиус циркуляции, углы крена и дифферента, изменение глубины при маневрировании в различных условиях могут быть определены по результатам решений дифференциальных уравнений движения ПЛ.

В большинстве случаев представляет интерес рассмотрение траектории неустановившегося движения, так как часто из-за кратковременности того или иного режима установившееся движение не достигается. Кроме того, из-за проявления инерционных свойств ПЛ параметры неустановившегося движения в начальные моменты времени значительно отличаются от соответствующих параметров установившегося движения. Следует также отметить, что установившееся движение, как правило, имеет место при длительных режимах, оцениваемых минутами и часами. Такими, например, являются горизонтальное установившееся движение (балансировочный режим), установившаяся циркуляция ПЛ в горизонтальной плоскости и циркуляция с изменением глубины.

Большое значение для характеристики динамических качеств ПЛ имеет оценка устойчивости ее движения. Очевидно, что увеличение степени устойчивости при неизменной эффективности органов управления ухудшает маневренные качества ПЛ, и наоборот, уменьшение степени устойчивости улучшает маневренность. Движение ПЛ характеризуется несколькими кинематическими параметрами, поэтому следует рассматривать устойчивость каждого параметра в отдельности.

Необходимо отметить, что без применения специальных средств управления ПЛ всегда неасимптотически устойчива по глубине и курсу, неустойчива относительно бокового смещения. Неасимптотическая устойчивость означает, что после прекращения действия внешних импульсов ПЛ получает некоторые постоянные изменения глубины и курса. Это приводит к необходимости стабилизации этих параметров с помощью специальных средств управления.

При маневрировании в погруженном положении подводная лодка обычно находится на такой глубине, что можно рассматривать ее движение в безграничной жидкости. При проектировании управляемость обеспечивается именно для этого случая движения.

При движении ПЛ вблизи свободной поверхности (режимы РДП, РКП) или вблизи ледовой поверхности силовая картина существенно изменяется, что сильно сказывается на кинематических параметрах и степени их устойчивости.

Возросшие требования к скорости маневрирования, а также ограничение возможности ручного управления подводной лодкой привели к необходимости применения автоматических систем,

внедрение которых в настоящее время происходит весьма интенсивно. Автоматические системы управления ПЛ используются как для решения эксплуатационных задач, так и для аварийных случаев движения.

Автоматические системы применяются с целью стабилизации того или иного кинематического параметра, а также для выполнения ПЛ маневров в погруженном положении. Стабилизация производится в вертикальной, в горизонтальной и в поперечной плоскостях. В первом случае выполняется автоматическое поддержание постоянной глубины погружения подводной лодки либо дифферента, во втором и третьем случаях — стабилизация курсового угла и угла крена соответственно. Стабилизация глубины необходима как при ходе ПЛ, так и при отсутствии хода. В практике эксплуатации ПЛ существуют длительные режимы движения на постоянной глубине. Во время такого движения, как правило, появляются различные внешние возмущения импульсного характера, которые вызывают конечные изменения глубины погружения. При помощи горизонтальных рулей поддерживается постоянная глубина погружения.

Большое значение имеет поддержание постоянной глубины погружения без хода, это особенно важно в случае выхода из строя движителей.

Следует, однако, отметить, что автоматическая стабилизация глубины и курса одновременно с увеличением степени динамической устойчивости вызывает изменение характера движения подводной лодки. В частности, это приводит к появлению автоколебаний, т. е. колебаний, независимых от внешних возмущений. Автоколебания характеризуются определенными амплитудами и частотами, которые имеют заданные ограничения. Естественно, что большое влияние на эти параметры оказывает форма и размеры корпуса ПЛ и ее оперение.

Применение автоматических систем управления имеет большое значение и для маневрирования ПЛ, в частности для переходов ПЛ по глубине, изменения курса ПЛ и т. д. Автоматические системы дают возможность не только решать задачи управления вообще, но и получать оптимальные режимы движения с различных точек зрения (например, режимы оптимальные по времени). Пространственное маневрирование ПЛ невозможно без применения автоматических систем управления, которые позволяют осуществить движение по заданной траектории.

В задачу курса динамики подводного плавания входит: изучение сил и моментов, действующих на подводную лодку в различных условиях ее плавания; составление дифференциальных уравнений движения ПЛ и разработка математического аппарата для их решения; рассмотрение точных и приближенных методов определения кинематических параметров, исследование их устойчивости для различных случаев движения; оценка мане-

ренных качеств ПЛ; исследование кинематических параметров движения ПЛ в случае применения автоматических систем управления.

Первой работой, в которой были составлены дифференциальные уравнения движения подводной лодки, было исследование Б. М. Малинина и В. В. Новожилова, выполненное ими в 1940 г. Однако особое развитие динамика подводного плавания получила в послевоенное время, в связи с существенным изменением требований, предъявляемых к подводным лодкам.

В ранних исследованиях рассматривались в основном установившиеся движения подводной лодки. Большая заслуга в выполнении этих исследований принадлежит К. К. Федяевскому, который применил результаты, полученные им для дирижаблей, к случаю движения подводных лодок. В частности, К. К. Федяевским было рассмотрено явление потери управляемости ПЛ в линейной постановке при управлении горизонтальными рулями, введено понятие об инверсионной скорости для кормовых и носовых горизонтальных рулей, предложен графо-аналитический способ определения радиуса установившейся циркуляции, введены понятия об интенсивности управляемости и скороподъемности при установившемся движении ПЛ в вертикальной плоскости и др.

При проектировании скоростных подводных лодок в послевоенное время появилась необходимость в разработке методики выбора размеров горизонтального оперения, обеспечивающих заданную степень динамической устойчивости. В этом направлении заслуживает внимания работа С. С. Золотова (1948 г.), в которой установлены зависимости между площадью оперения, гидродинамическими характеристиками и критериями управляемости ПЛ в вертикальной плоскости. Первые фундаментальные исследования, подробно освещающие вопросы неустановившегося движения ПЛ в вертикальной плоскости были выполнены Д. П. Скобовым в ЦКБ-18, М. Д. Хаскиндом и В. А. Соколовым в ЦАГИ в 1946—1950 гг. Они вывели уравнения движения ПЛ (в различных координатных системах), получили их решение и развили математический аппарат для дальнейших исследований. Авторами этих работ были введены фундаментальные функции характеристических чисел, определяющие кинематические параметры движения подводной лодки. Введение фундаментальных функций для расчета движения значительно упростило расчет кинематических параметров. В дальнейшем автором данного учебника эти функции были преобразованы и в зависимости от одного комбинированного аргумента представлены в табличной форме.

Д. П. Скобовым была подробно исследована статическая и динамическая устойчивость подводной лодки, исследованы характеристические числа и получены критерии статической и

динамической устойчивости. Им также были введены понятия о критической и характеристической скорости движения ПЛ и даны формулы для их определения. Естественно, что для определения кинематических параметров ПЛ необходимо знание гидродинамических сил и моментов, действующих на подводную лодку. В связи с известными трудностями получения точного решения задачи об обтекании тела в вязкой жидкости, в большинстве случаев гидродинамические реакции определяются экспериментальным путем в лабораторных условиях. Большое число экспериментальных исследований гидродинамических характеристик отечественных подводных лодок было выполнено в 1950—1960 гг. в аэродинамических трудах филиала ЦАГИ им. Н. Е. Жуковского под руководством К. К. Федяевского. Материалы этих исследований были систематизированы в виде атласа гидродинамических характеристик Е. К. Бучинский и Д. В. Якушевичем.

К. К. Федяевский в 1947 г. предложил приближенную теоретическую схему определения гидродинамических характеристик осесимметричного тела. По этой схеме гидродинамическая подъемная сила вызывается П-образным вихрем, расположенным под углом атаки к оси тела. С помощью законов гидромеханики определяются скорости, индуцируемые присоединенными и свободными вихрями, и на основании условия Жуковского—Чаплыгина в кормовой точке контура составляется уравнение, позволяющее найти коэффициент подъемной силы. Положение присоединенного вихря находится по обработанным данным эксперимента. На основании этой схемы В. Н. Квасниковым для трехосных эллипсоидов с различными удлинениями и отношением высоты к ширине были получены графики, позволяющие найти расчетным путем позиционные и демпфирующие характеристики (производные) трехосного эллипсоида, эквивалентного подводной лодке [45].

Вопросы движения ПЛ в вертикальной плоскости при «бесконечной» скорости, при которой восстанавливающий момент не оказывает влияния на параметры движения, были впервые рассмотрены в 1949 г. Л. В. Калачевой. Ею были составлены дифференциальные уравнения движения, предложен математический аппарат и получены решения уравнений. Фундаментальные функции, определяющие движение ПЛ на «бесконечной» скорости, были затабулированы в зависимости от одного аргумента [43].

Большинство перечисленных выше задач было решено в линейной постановке, при этом рассматривались линейные дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами. Что же касается нелинейных задач, то их исследование долгое время тормозилось в связи с необходимостью выполнения большого объема вычислений и недостаточным развитием вычислительной техники. Для уточнения влияния нелинейных членов, входящих

в дифференциальные уравнения движения ПЛ, отдельными авторами был выполнен ряд исследований. В частности, в 1956 г. А. М. Басин и Ю. Ф. Иванюта учли в уравнениях движения ПЛ в вертикальной плоскости нелинейность продольного гидродинамического момента, представив его в виде полинома третьей степени. Это позволило уточнить формулы для определения параметров движения и инверсионной скорости, а также уточнить условия устойчивости движения.

В 1951 г. К. К. Федяевский и М. В. Савельев предложили приближенный теоретический метод определения параметров движения при наличии нелинейности позиционного продольного гидродинамического момента. Суть этого метода состоит в том, что отклонения гидродинамических коэффициентов от линейных зависимостей принимаются за коэффициенты возмущающих сил, под действием которых изменение координатных параметров во времени отличается от изменения этих же параметров, полученных по линейной теории. С помощью линейной теории находятся параметры, вызванные этими возмущающими силами.

Одним из эксплуатационных режимов ПЛ является ее движение вблизи свободной поверхности, а именно: РДП для дизельных подводных лодок и РКП для атомных подводных лодок. Исследование этих режимов представляет более сложную задачу по сравнению со случаем движения в безграничной жидкости.

Движение вблизи свободной поверхности приводит к изменению гидродинамических реакций в зависимости от глубины погружения и чисел Фруда, что объясняется появлением волновых составляющих и обусловлено влиянием стенки.

Теоретическое решение задачи о влиянии свободной поверхности на позиционные гидродинамические характеристики было получено Я. Т. Пугачевым в 1958 г. и Б. Е. Тощевым в 1961 г.

Экспериментальные результаты впервые были получены В. П. Боровиковым в 1958 г. для схематизированной модели ПЛ XXI серии. На основании экспериментальных исследований гидродинамических сил вблизи свободной поверхности установлена их зависимость от глубины погружения ПЛ.

В дальнейшем В. П. Боровиковым были составлены дифференциальные уравнения движения ПЛ вблизи свободной поверхности (в линейной постановке), получены их решения, исследована устойчивость движения и рассмотрены установившиеся режимы.

Начиная с 1958 г., большое развитие получили вопросы динамики аварийной подводной лодки. Требование одержания подводной лодки по глубине и дифференту и вывода ее на балансировочный режим в погруженном положении привели к необходимости исследования движения при больших углах атаки. Решение этой задачи потребовало определения гидродинамических сил и моментов при изменении угла атаки от 0 до 360°.

Лаборатории ЦАГИ и ЛПИ начали выполнять круговые продувки моделей ПЛ. Эти эксперименты в дальнейшем были продолжены в аэродинамической трубе Сибниа.

Результаты исследований гидродинамических характеристик при больших углах атаки позволили установить ряд новых качественных зависимостей, а также получить аппроксимирующие формулы. В ЛКИ, например, были получены приближенные формулы, для определения позиционных гидродинамических коэффициентов C_x и C_{y1} , при круговом изменении угла атаки, в дальнейшем М. Е. Мазором была дана аппроксимация не только коэффициентов позиционных сил, но также позиционного продольного момента и демпфирующих сил.

В ЦНИИ им. А. Н. Крылова и ЛКИ в 1958—1962 гг. было выполнено исследование, связанное с решением задачи об обеспечении подводной непотопляемости. В частности, были составлены уравнения движения аварийной ПЛ как с учетом переменной массы, так и без учета, подробно исследованы все силы, действующие на аварийную ПЛ, рассмотрены балансировочные режимы, исследована устойчивость движения с воздушной подушкой и перегрузкой, произведены численные расчеты кинематических параметров условной аварийной ПЛ и установлены глубины и весовые расходы воздуха, при которых возможно одержание подводной лодки.

Исследование пространственного движения ПЛ было начато в 1958 г. С. И. Девниным и М. И. Зуевым в ЦНИИ им. А. Н. Крылова. Ими впервые получены позиционные и демпфирующие гидродинамические характеристики при пространственном обтекании подводной лодки. Ими же были рассмотрены некоторые частные случаи пространственного движения (циркуляция с изменением глубины). Была предложена схема определения параметров установившегося пространственного движения.

Одной из задач динамики подводной лодки является исследование ее погружения с поверхности и определение времени погружения. Этому вопросу было посвящено большое число работ. Система уравнений погружения ПЛ без хода при нулевом дифференте была получена В. В. Перловским в 1940 г. Для ее решения в конечном виде необходима зависимость количества влившейся в ЦГБ воды цистерны главного балласта от осадки подводной лодки, которая определяется формой и размерами цистерны и не поддается в общем случае точному математическому представлению. Поэтому решение этой системы производится численными методами.

Однако результаты расчетов времени срочного погружения, как правило, значительно расходились с данными натурных испытаний в опасную сторону.

Я. Я. Балицкий в 1961 г. учел ряд дополнительных факторов, в частности связь уравнения расхода воды, поступающей в ци-