

# NO PROBLEMS...

Л.В.Киселев

Вновь возвращаясь к истокам той деятельности, которая около 20 лет назад переросла в «проблемы морских технологий», и, перетряхивая в очередной раз содержимое ящика стола, я наткнулся на свое давнее невостребованное сочинение под названием «Анналы». В «записках ученого соседа», собранных в 1995 г. под одной обложкой и озаглавленных как «радиус циркуляции», эти наброски оказались в числе последних «летописных» всплесков самиздата. Перелистывая не без интереса страницы этой старой рукописи, не лишенной, пожалуй, некоторой доли иронического смысла, я предположил, что это может представлять интерес и для тех, кто в поисках недостижимой истины не утратил былых романтических иллюзий и благих надежд в непредсказуемом будущем. Диалектика нашей жизни такова, что многие наши начинания, идеи, намеренья и порывы остаются за гранью серьезных научных трудов и шаг за шагом теряют свою первоначальную привлекательность и неповторимый аромат творческого поиска. Стремясь хотя бы частично реанимировать эти околонуточные заготовки прошлых лет, я рассчитываю прежде всего на снисходительность тех моих коллег, авторитет которых меня выручает в моих порою чересчур эмоциональных высказываниях. Кроме того, хотелось бы, чтобы и читатель, мало посвященный в наши дела, проникся бы пониманием того, что эти дела достойны увековечивания.

## Немного о модулях, в которых ваш покорный слуга почти ничего не смыслит, и еще кое о чем, в чем он смыслит чуть-чуть больше

Слова «модули», «унификация», «конфигурация» появились впервые в нашем лексиконе где-то на подступах к той работе, которая вывела нас на океанские просторы, хотя уже в самом первом автономном подводном аппарате «Скат-гео» использовались некоторые элементы погружных систем в виде специфических функциональных блоков. В той «всемирно известной книге» под названием «Автоматические подводные аппараты», на которую мы до сих пор ссылаемся, были продемонстрированы некоторые варианты модульных структур, однако законченный вид наш «модульный принцип» получил в дальнейшем при создании глубоководных аппаратов. Этой проблеме были посвящены не только материалы технических проектов, но и выступления на разных форумах и публикации авторов.

Для движения под водой аппарат должен обладать телом, состоящим из несущей конструкции, прочных корпусов, блоков плавучести и легкого корпуса. Эти части тела подлежали унификации в первую очередь, поскольку из них по замыслу можно было составлять любые конфигурации подводных технических средств. Вся технология проектирования и изготовления нацеливается на то, чтобы из алюминиевого

сплава, синтактика и стеклопластиковых заготовок собрать конструкцию, способную держаться на воде, выдерживать давление на глубине и всплывать наверх, когда потребуется. Все остальные задачи распределяются по бортовым системам, от состава и уровня взаимодействия которых зависит не только «интеллект» аппарата, но и собственный интеллект разработчиков.

Состав и особенности конструктивных и функциональных модулей слегка изменялись от аппарата к аппарату, отслеживая прогресс в области технологий и элементной базы, а еще, более того, неожиданные решения, которые всегда возникают в ходе работы. Обычно после того как нарисованы обводы аппарата с кубиками и кружочками внутри, начинается самое главное в той науке, которую относят к *Undersee Technology*. «Поиск путей создания...» начинается, как правило, с поиска необходимого запаса аккумуляторов, плавучестей, металла, а также «контрагентов», которые могут чем-то помочь в части изготовления и поставки. После этого следуют сугубо научные процедуры – эскизный *design*, компоновка, оптимизация гидродинамического сопротивления, расчет момента остойчивости, плавучести и ходовых характеристик.

Имеется достаточно богатый практический опыт использования такого подхода при осуществлении различных конструктивных модификаций аппаратов. Иллюстрацией могут служить примеры разработок, показывающие возможности модульной технологии при реконфигурации аппарата на основе конструктивных элементов прототипа или аппарата-предшественника. В качестве примера можно привести преемственный ряд АНПА: «Л-1», «Л-2», «Тифлонус», «МТ-88»,

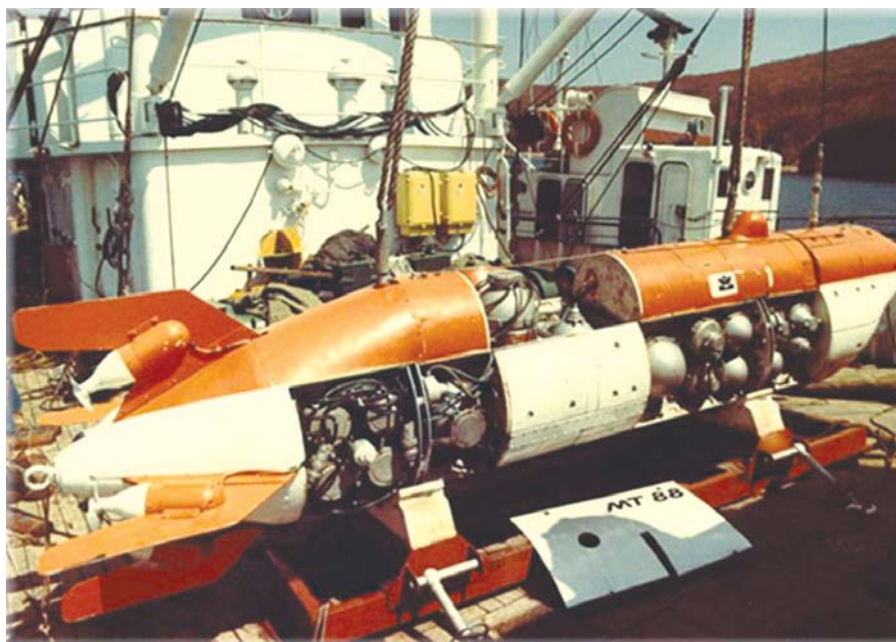


Рис. 1. АНПА «МТ-88» во время подготовки к морским испытаниям в Тихом океане по международной геологической программе (1989)

«CR-01», «CR-02», «ОКРО-6000», «TSL».

Необходимо добавить, что в дальнейшем в этот список попали также «САНПА», «МТ-98», «Клавесин», «ММТ-3000».

А в качестве примера модульного исполнения АНПА можно показать устройство аппарата «МТ-88», сфотографированного во время подготовки его к очередному погружению в морскую стихию (рис. 1).

В нашей далеко не серийной продукции (как железной, так и бумажной) значение модульности никак нельзя умалить – она позволяет не только тиражировать некоторые разработки, но также и наращивать их возможности. Об этом неоднократно говорилось на разных уровнях и, надо полагать, что так оно и есть на самом деле. Важно, что для производства самых-самых разных аппаратов надо иметь сравнительно небольшой набор специфических принадлежностей, заготовок, *unified pressure housing*-ов. Технология изготовления, сборки и проверки на годность всего этого хозяйства

не терпит ошибок, просчетов и халатности, последствия которых, как нетрудно догадаться, могут оказаться довольно плачевными. Множество патентов, полученных нашими изобретателями, позволили решить многие проблемы из области сопряжения для погружаемых конструкций, но, тем не менее, всякий раз не устаревает принцип «семь раз отмерь – один раз отрежь». При всем при том бывает незаменим и другой принцип – принцип проб и ошибок. Зигзагообразная кривая между ними и есть путь к прогрессу.

Не могу ручаться, что эти мои философические наблюдения не вызовут иронической улыбки у тех, кто побольше понимает в модулях, и потому спешу закончить рассуждения на избранную тему. В заключение я только лишь хотел бы сказать, что все свои знания в этой области я почерпнул в основном из бесед со своими коллегами в те счастливые моменты жизни, когда очередной выпуск наших научных трудов уже никак нельзя было оттянуть. Читателя, которого интересуют более глу-

бокие исследования по проблемам унификации, я адресую именно к этим трудам, опубликованным в сборниках статей, технических описаниях проектов подводных аппаратов, журналах и монографиях, докладах на самых различных форумах.

### **Энергетика, о которой ваш покорный слуга намерен порассуждать, как и о модулях, только из любви к большому общему делу**

Читатель, уже пробежавший взглядом предыдущую часть моих иронических заметок, вероятно, не упустит случая пожурить меня за отсутствие глубоких мыслей относительно наших достижений по овладению новыми источниками энергии. Испытывая от этого некоторую неловкость, я попытаюсь пересказать здесь своими словами то, что любой из нас может найти в трудах известных специалистов. По поводу этой темы М.Д.Агеев как-то сказал, что известные подводные аппараты являются, в сущности, лишь носителями энергии. Разумеется, он имел в виду источники энергии, которым он сам посвятил частицу своего таланта.

Поначалу, когда речь шла о 4–6 часах пребывания под водой, особых проблем не было. Точнее говоря, они были, но в основном у снабженцев, и стояло время, когда СЦС-ы на наших складах не переводились. Теоретический интерес к иным энергоисточникам, конечно, был, но даже краткое знакомство с их уровнем отбивало всякую охоту с ними связываться.

Но, раз уж мы об этом говорили, то, прежде всего, следует сказать о том, что среди разнообразнейших источников энергии, приемлемых в принципе для подводных робо-

тов, существуют определенные классы, отличающиеся:

- удельной энергоемкостью, измеряемой в Втч/кг,
- удельной мощностью, измеряемой в Вт/кг,
- технологией и способом получения электрических зарядов,
- массой (объемом) элементов,
- разрядными характеристиками, КПД, надежностью, безопасностью и многими другими показателями, которые трудно поддаются оптимизации и из которых важнейшим является стоимость.

Если принять во внимание последние два пункта, то надо сразу отбросить электростанции, ядерные реакторы, тепловые двигатели и термомеханические электрогенераторы. Среди остальных энергоисточников тоже есть немалый выбор, но при здравом размышлении круг поиска еще более сужается. В обозримом будущем можно рассчитывать только на аккумуляторы и электрохимические генераторы (ЭХГ). С аккумуляторами все более или менее ясно – в настоящее время научной проблемы они особо не представляют, и серебряно-цинковым аккумуляторам (СЦС-ам) конкурентов практически нет. Что касается ЭХГ, то тут есть значительный простор не только для научных экспериментов, но и для их практического воплощения. Понимая это, наши ученые засучили однажды рукава в надежде, что проблема отпадет раньше, чем будет получен ожидаемый положительный результат. Впрочем, в науке, как известно, отрицательных результатов не бывает.

*Напомню, что дело происходит в 1995 г., и нынче, т.е в 2007 г., конечно, многое выглядит по-другому, в том числе и в отношении аккумуляторных батарей (смотрите статью*

*А.В.Краснобрыжева в данном номере журнала).*

Впервые проблема всколыхнулась достаточно серьезно, когда начались приготовления к созданию подводного аппарата. Бригада новоиспеченных энергетиков во главе с М.Д.Агеевым начала изыскания альтернативных электрохимических генераторов тока. В условиях, которые, не краснея, можно назвать кустарными, но вполне приемлемыми для науки, была проведена серия экспериментов, нацеленных на создание энергоемких источников.

Первоначально внимание было сосредоточено на трех типах ЭХГ, использующих топливные элементы:

- гидразин-перекисьводородные (ГПВ),
- воздушно-алюминиевые (ВА),
- водно-литиевые (ВЛ).

Изучали и такие комбинации как магний-вода, алюминий-перекись водорода, литий-нитрит натрия.

Продираясь через дебри электрохимии и вспоминая школьные знания, я понял, что любой ЭХГ имеет анод, катод и электролит. От их совместимости и взаимодействия зависит тот эффект, который мы хотим получить. Так, в ГПВ гидразин и перекись водорода, реагируя между собой, обеспечивают реально удельную энергоемкость примерно 200 Втч/кг, что в общем-то неплохо. Беда в том, что гидразин ядовит и, кроме того, в природе таких источников пока не существует.

В ВА анодом служат алюминиевые стержни, а катодом – воздух. Для прокачки, очистки и регенерации электролита – гидроксида натрия – применяется сложная система, так что при вполне приемлемой энергоемкости 100 Втч/кг устройство получается довольно таки великоватым для подводного аппарата. Тем не менее здесь мож-

но предполагать определенный прогресс и тогда, возможно, у нас найдется с американской фирмой ALUPOWER общий интерес.

Особый разговор пойдет о ВЛ ЭХГ, так как именно здесь ожидалось получить наиболее ценные научные результаты.

Для того чтобы судить о возможностях ВЛ, необходимо было прежде всего изготовить макетный образец, придерживаясь довольно тонкой технологии. А технология предусматривала, что анодом должен служить литий, катодом – стальная никелированная сетка, а электролитом – гидроксид лития, который образуется при взаимодействии лития с окислителем. Лучшим среди окислителей оказался нитрит натрия, малые добавки которого нужно было искусно подавать, чтобы обеспечить наиболее эффективный режим протекания химических реакций. Более всего надо было бороться с водородом, который выделяется в больших количествах при бурной реакции лития с водой. Почти как в атомном реакторе. Все зависит от того, как управлять поляризацией электродов в щелочной среде.

Не будем вдаваться в тонкости химической технологии, и если кого-то это очень интересует, тот пусть откроет соответствующую книжку или обратится к одному из больших знатоков с вопросом о влиянии лунной фазы на вольт-амперную характеристику литиевого элемента. Я же могу лишь процитировать ответ, который почерпнул из доступного источника. Этот ответ первоначально состоял из следующих двух фраз:

- ВЛ ЭХГ с нитритом натрия позволяет теоретически рассчитывать на удельную энергоемкость по общему расходу реагентов на 1кВтч/кг.
- ВЛ ЭХГ перспективны для подводных аппаратов.

Такой оптимистический вывод, конечно, настраивал на дальнейшие интенсивные поиски. Интерес не угасал, но перешел в другую фазу. От химических формул шла извилистая дорога к конструктивному модулю. Шесть элементов модуля общим весом со всеми реагентами около 100 кг обещали дать при 30 часовом рабочем цикле около 100 Втч/кг удельной энергии. О'кей!

Затянувшиеся лабораторные и морские испытания модуля (рис. 2) показали, что есть вещи, преодолеть которые невозможно ни при какой фазе Луны. Нам остается только процитировать еще одно заключение из научных анналов, из которого каждый волен сделать свое собственное заключение, если оно еще не созрело. Итак, имеем:

- ВЛ ЭХГ являются перспективными источниками энергии для подводных аппаратов,
- необходимо проведение дальнейших исследований и опытно-конструкторских работ для более рационального решения вопросов термостабилизации его работы, разработки новых узлов и устройств и отработки их надежной работы, совершенствования технологии катодных покрытий, оптимизации работы ЭХГ,
- ВЛ ЭХГ еще не готовы для установки на ПА.

Не будем расстраиваться – во всем мире не существует пока такого подводного аппарата, у которого внутри энергоблока все бы шкворчало так, как нам тут хотелось. Да и, как говорится, еще не вечер, и фазы Луны тоже иногда бывают благоприятными.

По большому счету проблема энергетики не исчерпывается овладением традиционными источниками. Есть немало других возможностей воспользоваться дарами природы. М.Д.Агеев, разочаровавшись в ХИТ-ах,

стал копать еще глубже и спустил некоторое время откопал *Solv and Wave vehicles*. Но это уже совершенно особая тема, и, мне кажется, что здесь слишком мало места для увлекательнейшего разговора обо всех ее научных тонкостях.

### Архитектура: hard and software.

Вопросы развития машинного интеллекта с самого начала волновали умы тех, кто помышлял перекачать в машину-робот интеллект собственной черепной коробки. Эволюция в этом направлении происходила зигзагообразно и со скрипом и во многом определялась не только общим уровнем электроники, но и более того – содержанием кассетниц во владениях главного электронщика.

Еще до того как стали доступны микропроцессоры, лидер Юрий Молоков с компанией предпринимали грандиозные попытки встраивания специфических интерфейсов на базе таких же специфических вычислителей, которые осваивала отечественная промышленность. Рождались и угасали разные варианты структуры, в которых фигурировали то модули КАМАК, то «Электроника – НЦ ОЗТ», то  $\mu$ -сети. В трансформированном виде это как-то вживлялось в аппаратные блоки под кличками НУК, ЦСУ, БАП, БИП... (рис. 3)

Появление микропроцессорных комплектов серии К588 позволило слегка сдвинуть надежды на прогресс и наделать кучу контроллеров для сопряжения между собой различных устройств и каналов информа-



Рис. 2  
М.Д.Агеев и Е.В.Король  
на испытаниях ВЛ ЭХГ  
(1992).  
Сложная штука получается, и что с ней делать – ума не приложить

ции. Подводные роботы между тем крутили привычные галсы, не подозревая о глубоких замыслах создателей и не мучаясь угрызениями совести.

Наконец, настала эра *Intel*-овских процессоров и персональных компьютеров, и муки с элементной базой перешли в сферу *software*, усугубляя и без того интересную работу программистов. После того как наши люди повадились кто «за бугор», а кто за океан, стала более реальной перспектива перейти на мировые электронные стандарты. Научный поиск в этой области выродился в осмысливание и приобретение существующих систем и справочников, так что спустя некоторое время образовались коробочки *Winsystems*, *Parsytec*, *Special electronic*, а на столах в кабинетах появились компьютеры и прочие

атрибуты цивилизации. Юрий Молоков продолжал в свободное от работы время развивать нейрокомпьютерные структуры, а выпускник МФТИ Александр Инзарцев под руководством своего мудрого, но скромного наставника строил адаптивные программы и так называемые открытые архитектуры.

Если следовать канонам, то все архитектурное пространство надо разделить на два полупространства – аппаратное и программное. В первом размещаются все электронные модули, их связи и физические процессы. Во втором – все то, что может быть представлено в виде кодов и что управляет всей вычислительной системой. Мировой прогресс в этой сфере настолько ошеломителен, что наши попытки за ним угнаться вынуждают нас держать ухо

востро. Далее мы будем следовать концепциям, в которых Александру Инзарцеву и Олегу Львову, принявшим эстафету от незабвенного Юрия Геннадьевича Молокова, нет равных (рис. 4). Отталкиваясь от исторической справки о нашей эволюции в архитектурных построениях, начнем новый отсчет с того момента, когда на смену «самодельным» архитектурам пришли мощные фирменные стандарты. Не надо думать, что, получив доступ к новым промышленным технологиям (точнее говоря, к информации о них), мы вписались в такую струю, которая понесет нас в райские кущи.

Есть немало проблем, которые видны уже сейчас. И в решении этих проблем мы, смею заверить, не стоим на месте.

Первоначально всю «программную среду» АНПА можно было выразить в виде одной таблички, в наше время для ее описания требуются абсолютно иные способы – и по форме, и по содержанию. Собственно программное обеспечение может строиться на различных принципах, скажем, иерархическом, сетевом или гибридном в зависимости от того, чего мы хотим и какими вычислительными средствами располагаем. В этих вариантах находят отражение те «ступеньки», которые позволяют нам наращивать функциональные возможности АНПА. Поскольку аппарат должен выполнять сразу много задач, а вычислительные ресурсы ограничены, приходится оптимизировать и выстраивать цепочку процедур наиболее рациональным способом. Так, к примеру, иерархическая структура дает понятную, простую логику, а «слоевая» – быстрое действие и небольшие объемы памяти. В выборе нужных структурных характеристик информационного обмена и заключаются некоторые тонкости



Рис. 3  
Создание первого  
глубоководного  
аппарата, в архи-  
тектуру которого  
Ю.Г.Молоков (спра-  
ва) вложил весь свой  
недюжинный талант  
(1979)



Рис. 4. Кадр, иллюстрирующий исторический момент, когда три главных архитектора компьютерной базы данных Александр Инзарцев, Олег Львов и Александр Сидоренко обсуждают новые архитектурные построения (1990)

работы. В принципе здесь имеются возможности для фантазии, но, как правило, фантастические проекты успевают устареть еще до того, как аппарату об этом скажут после очередной планерки.

Пойдем далее и рассмотрим для примера структуру аппарата CR-01, типичную для аппаратов того времени. На аппарате имеются две ЭВМ: одна входит в *Автопилот*, другая представляет собой *Управляющий Компьютер*. ЭВМ *Автопилота* построена на базе одноплатной ЭВМ фирмы *Winsystems*, с процессором *i80386*, а в *Управляющем Компьютере* использован процессор *V40* той же фирмы. Для цифрового обмена с разными устройствами имеются контроллеры, последовательный канал *RS-232*, карты *Bitbus*. Программное обеспечение имеет два уровня. *Верхний уровень* представляет собой *Планировщик*. Он формирует программу-задание на языке, понятном аппарату. Программа включает системные процедуры – управление движением, управление аппаратурой, опрос датчиков. Разработана система аналитического программирования,

позволяющая задавать на языке высокого уровня сколь угодно сложные задачи, а не только движение галсами. *Нижний уровень* приводит в исполнение все то, что приказал *верхний*. Все как у людей. Взаимодействие элементов здесь обеспечивает *Монитор Реального Времени*, построенный на базе *MS-DOS* и принципа «общей памяти». Все подсистемы черпают информацию из общей *Базы данных* и используют ее так, как повелевает *Блок Управления Программой*. Вся ситуация находится под пристальным наблюдением *Контрольно-аварийной системы*, а перепрограммируемый накопитель запоминает в файлах на жестком диске все, что происходит. Вот, собственно, и все. Сделаем некоторые обобщения, которые вводят нас в мир «открытых» архитектур. Представляется весьма заманчивым создание такой системы управления, которая работала бы по образцу современных вычислительных машин на основе своей внутренней операционной системы. Вариант построения такой системы уже есть. О нем с захватывающим интересом я

читал в наших научных трудах, и эти чтения не прошли даром.

*Структура, обрисованная здесь популярным языком, давно стала исторической реликвией. В наше время рождаются и устаревают куда более совершенные системные технологии. Начав с авиационного шагового искателя, мы выходим нынче на такие просторы в организации аппаратно-программных архитектур, что сами порой не знаем, куда заведет нас эта дорога. Всеми своими знаниями в этой области мы делимся с теми, кого привлекают также и просторы Мирового океана. Но эта тема столь же необъятна, как необъятен и сам океан.*

### Гидродинамика, ходовые свойства, движители и управление

Вопросы, которые мы намерены тут затронуть, никого не могут удивить своей новизной. Они стоят перед человечеством еще со времен Архимеда. Вместе с тем, при глубоком и внимательном интересе к оному предмету можно обнаружить такой кладезь идей, что его могло бы хватить не на одну диссертацию и уж, тем более, не на одну фундаментальную статью в наших научных трудах. Если кому-то тут почудилась ирония, то должен сказать, что нас ждет вполне серьезный разговор с использованием характерных словечек. Не будем этого пугаться, ибо впереди у нас куда более серьезные испытания.

Итак, вооружимся энциклопедическими трудами классиков, отчетами, трудами наших коллег и другими исследованиями, которые регулярно появляются под знакомой обложкой и в зарубежных изданиях. Начнем, пожалуй, с бесспорного утверждения о том, что хороший автономный подводный аппарат должен иметь способность:

- свободно перемещаться в пространстве на положенные расстояния с положенной скоростью,
- маневрировать на малой площади и удерживаться, если надо, вблизи интересного объекта,
- экономить энергию и не оказывать среде слишком большого сопротивления.

Отсюда вытекают, по крайней мере, две задачи: уметь рассчитывать все интересующие нас характеристики аппарата как тела, движущегося в вязкой среде, характеристики двигателей и, что еще важнее, уметь все эти характеристики оптимизировать (рис. 5). Задачи, скажем, не из легких по той простой причине, что созданная веками красивейшая наука гидромеханика и богатейшая практика судовождения как-то не очень к нам подходят, пугаясь слова «робот». Тем не менее, мы тоже кое-чему научились и кое в чем даже объехали классиков.

В части, посвященной модулям, мы уже касались некоторых очень емких соотношений, характеризующих связь энергии, массы, скорости и времени. Эйнштейн тут вовсе ни при чем,

так как в большинстве случаев нам важно количественно связать величину сопротивления и потребляемую мощность. Связь эта, вообще-то, очень проста. Она зависит от формы и объема тела, величины его «смоченной поверхности», коэффициента полезного действия движительной установки и коэффициента сопротивления корпуса. Назовем этот последний –  $C_x$ , величину силы сопротивления –  $R_x$ , создаваемую силу тяги (упор) –  $T_x$ , потребляемую мощность –  $P$ , объем –  $V$ , скорость –  $v$ , коэффициент полезного действия (КПД) –  $\eta$ . Тогда совершенно очевидно, что

$$R_x = 0,5 \rho v^2 C_x V^{2/3},$$

$$P = 0,5 \rho v^3 C_x V^{2/3} \eta^{-1}.$$

Если не брать в голову некоторые более тонкие зависимости, например зависимость величины  $C_x$  от числа Рейнольдса и некоторых особенностей пограничного слоя набегающего потока, то в идеале хорошо было бы иметь  $C_x = 0,03-0,05$ , не совсем плохо –  $0,06-0,08$ , удовлетворительно –  $0,09-1,0$ , а упор  $T_x$  такой, чтобы преодолеть сопротивление  $R_x$  и получить скорость  $v$ . Как получить

нужную величину сопротивления, а потом убедиться в том, что она именно такая и есть, представляется очень интересным научным экспериментом, в котором конструкторы и технологи проявляют свое искусство создавать удобообтекаемые формы аппаратов, а испытатели – искусство извлекать необходимые данные из результатов натуральных измерений. В легко доступной литературе есть немало рецептов того, как и с чем употреблять величину  $C_x$ , так что вряд ли стоит на этом заострять внимание. Что касается величины  $T_x$ , то, как убеждает многолетний опыт, здесь можно найти немалый научный интерес.

Остановимся пока на том, что подводный аппарат приводится в движение гребными винтами. В обычном режиме он совершает поступательное движение с определенной скоростью. В этом случае силы, создаваемые винтами, могут быть заранее рассчитаны по известным эмпирическим формулам или диаграммам. Можно считать, что таким образом выражена зависимость механических сил от совокупности характерных параметров, таких



Рис. 5. Кадры, свидетельствующие о том, что палуба «Валдая» вполне подходящее место для осмысливания результатов научного эксперимента. Суть последнего заключалась в том, что, глядя на ленту самописца с изображенными на ней реализациями переходных процессов, надо было догадаться, каковы же гидродинамические производные и, разумеется, радиус циркуляции и как повлиять на них, изменяя площадь стабилизаторов и манипулируя балластными свинцовыми чушками (1974)

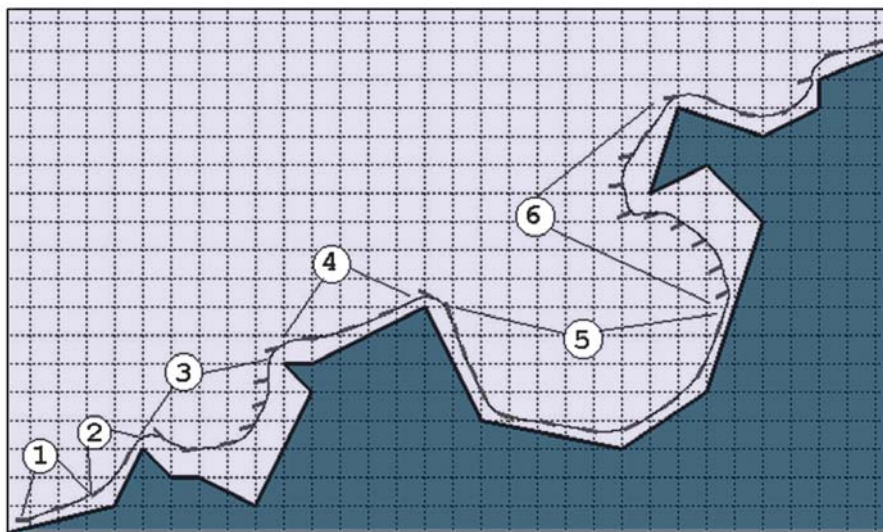


Рис. 6. Пример того, как «виртуальный» аппарат выписывает головокружительную траекторию с преодолением препятствий довольно-таки экзотического вида. Подобный рельеф, модель которого здесь представлена, характерен для вулканических подводных гор (гайотов), богатых залежами минерального сырья – железомарганцевых корок, конкреций, сульфидов и т.п.

как диаметр, частота вращения, относительная поступь, пропульсивные коэффициенты и еще кое-что менее значительное. Следует, правда, сказать, что для маломощных винтов, какими мы пользуемся, приходится прибегать к некоторым ухищрениям, чтобы воспользоваться известной методикой. Иногда удобно использовать, например, швартовный режим ( $v=0$ ) или другие косвенные методы. Но настоящей научной проблемы здесь, пожалуй, нет.

Другое дело, когда речь идет о более сложном движении с подруливанием, реверсом, зависанием на месте, старт-стопным включением движителей, где скорость изменяется не только по величине, но и по знаку. Универсальный маневренный аппарат, способный с помощью автопилота совершать такие непростые движения, должен иметь и соответствующие исполнительные органы. Задача управления движением аппарата вообще-то заключается в том, чтобы с помощью сил и моментов создать управляющий вектор, у которого «роза направлений» должна быть

круговой, а величина его, увы, ограничена мощностью движительной установки. Первый вывод, который отсюда следует с учетом и других обстоятельств, состоит в том, что наилучший результат обеспечивается группой движителей, размещаемых в корпусе аппарата в корме, в носу и посередине. Имея такую установку, следует рассчитать кинематику так, чтобы соотношения между упорами каждого винта, их суммарным упором и составляющими управляющих воздействий были наилучшими. Именно это неоднократно проделывалось в самых разных проектах, и при этом иногда выявляются такие интересные «штучки», что я рекомендовал бы очень любознательным читателям заглянуть в соответствующие научные сочинения, часть которых уже стала библиографической редкостью.

Хотелось бы продолжить беседу по гидродинамике, но чуть-чуть с других позиций. Для нас, кроме того, важно описать движение аппарата в трехмерном пространстве, заполненном вязкой жидкостью, т.е. соленой океанской водой.

Тема, к которой мы подступились, необъятна, поэтому нет смысла очень глубоко в нее вникать – гораздо проще сослаться на первоисточники и те результаты, к которым мы тоже приложили руки. Очевидно, здесь опять намек на нашу настольную книгу – монографию об автоматических подводных аппаратах. Интересно было бы затронуть некоторые принципиальные моменты, отражающие отличие АНПА, скажем, от подводной лодки. Кроме очевидных отличий по массе, размерам, мощности, скорости и числам Рейнольдса есть еще и ряд других отличий. Например, аппарат при погружении и всплытии может и должен принимать дифферент до 60-70 градусов, а при движении вблизи дна должен уметь огибать препятствия, какими бы сложными они не были (рис. 6).

Кроме всего прочего необходимо обеспечивать такое движение, которое бы мало отличалось от заданного программного при действии на аппарат разных потусторонних сил. Все эти требования так или иначе зависят от соотношений нескольких параметров, которыми характеризуются корпус аппарата, упоры двигателей, управляющие сигналы систем стабилизации. Если мы ошибемся в выборе этих параметров, то вместо того, чтобы заниматься работой (например, фотографировать глубоководную рыбку), аппарат будет кувыркаться как влюбленный дельфин. Чтобы избежать таких фокусов, нам следует хотя бы приблизительно знать некоторые коэффициенты, характеризующие величину сил, действующих на аппарат при движении. С этой наукой мы более или менее знакомы и умеем даже предсказать, каким будет поведение аппарата, которого еще и в помине нет. Все это называется простым словом – моделирование, и мы по-



рою затрачиваем немалые усилия, чтобы постигнуть тайны этого искусства.

С теоретической точки зрения представляют интерес две задачи. Первая – как по виду аппарата или данным измерений определить все составляющие гидродинамического воздействия, такие как подъемная сила, демпфирующая сила, а также моменты этих сил относительно осей, сходящихся в центре масс аппарата. Вторая задача – наоборот: как, зная эти величины с точностью 15-20 %, нарисовать и затем сделать аппарат, похожий на тот, у которого все так красиво получается с управлением. Путь к решению этих задач любой может найти, достав из шкафа некоторые основополагающие научные труды и отчеты. Не всегда, правда, получается по теории, так что теорию приходится корректировать, подгоняя ее под реальные факты. Имею смелость утверждать, что для всех тех аппаратов, названия которых уже примелькались, их гидродинамические характеристики легко извлекаются из памяти компьютера. Впрочем, научный интерес все равно остается, поскольку он не исчерпывается знакомыми названиями, а развивается сам по себе, подкидывая любопытные жизненные примеры.

Закончив этот абзац и перечитав вышеизложенное, я подумал, что оно звучит не очень убедительно. Чего-то недостает. Пожалуй, недостает математических символов. К тому же, переходя к следующей части трактата, мы неизбежно должны их употребить при описании динамических процессов.

Ранее нам уже встречались слова, символизирующие собой наши представления о тех процессах, которые сопровождают движение аппарата в толще воды и вблизи дна. Если мы говорим, например, «момент ос-

тойчивости», то представляем себе что-то такое, что влияет на крен и дифферент аппарата при действии вращающихся сил. Словосочетание «радиус циркуляции» неизменно ассоциируется с размером круга, который получается при поворотах аппарата и переходах с одного галса на другой. В принципе, для общих представлений ничего больше и не надо знать, но кто этим ограничился, тот очень многое потерял, ибо в этой науке столько неповторимой прелести, что я не могу не поделиться некоторыми ее секретами.

Для начала хотелось бы надеяться, что уважаемые коллеги еще не забыли, что всякое движение твердого тела можно представить в виде поступательного движения центра масс и углового движения относительно центра масс. Если кому-то захотелось и дальше заглянуть в динамику подводных аппаратов, то мы рекомендуем открыть две книжицы: одну, написанную нашими бывшими конкурентами из ЛКИ (ныне С.-ПбГМТУ), а другую, написанную конкурентами наших бывших конкурентов, а также и ряд других трудов, перечисление которых займет немало места. Так вот, если воспользоваться тем, что там написано, то нетрудно уяснить некоторые тонкости проблемы, о которой идет речь.

Первая, не очень сложная проблема, заключатся в том, какую модель движения принять в качестве основополагающей. Можно, скажем, использовать уравнения движения в естественных переменных, каковыми являются: скорость  $v$ , глубина  $H$ , дифферент  $\psi$ , крен  $\gamma$ , курс  $\theta$ , углы атаки и дрейфа  $\alpha$ ,  $\beta$ , соответствующие им угловые скорости, локальные  $(X, Y, Z)$  или географические  $(\phi, \lambda)$  координаты аппарата. Но бывает гораздо удобнее в тех случаях, когда это возможно, изобразить все в координатах, имею-

щих одинаковый стандартный вид. Другими словами, введем и здесь свою унификацию. Тогда движение в двух плоскостях  $(X, Y)$ ,  $(X, Z)$ , соответствующих управлению по глубине и курсу, можно описать так, как это здесь показано:

$$dv/dt = -\hat{C}_x(v) + b_v U_v(v, U_x, U_y),$$

$$dx_i/dt = \sum_j a_{ij} x_j + b_i U_x, i, j = 1 \dots 4,$$

$$dX/dt = v \cos(x_3 - x_2),$$

$$dY/dt = v \sin(x_3 - x_2),$$

$$dy_i/dt = \sum_j c_{ij} y_j + d_i U_y, i, j = 1 \dots 3,$$

$$dX/dt = v \cos(y_2 - y_1),$$

$$dZ/dt = v \sin(y_2 - y_1).$$

В приведенных формулах:  $x_1$  – рассогласование по вертикальной координате (глубине),  $x_2$  – угол атаки,  $x_3$  – дифферент,  $x_4$  – угловая скорость,  $y_1$  – угол дрейфа,  $y_2$  – курс,  $y_3$  – угловая скорость по курсу,  $\{a_{ij}\}$ ,  $\{c_{ij}\}$  – матрицы коэффициентов, зависящих от гидродинамических параметров (о которых мы рассуждали выше),  $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_v$  – управляющие функции, удовлетворяющие ограничениям  $|U_v| \leq 1$ ,  $|U_x| \leq 1$ ,  $|U_y| \leq 1$ ,  $b_i$ ,  $d_i$  – весовые коэффициенты, зависящие от максимальных упоров и моментов движителей. Наша задача заключается в том, чтобы создать управление  $U = \{U_v, U_x, U_y\}$  надлежащим образом. В аппарате эту задачу решает *Автопилот*, а мы же занимаемся этим с карандашом в руке и общаясь с компьютером и при этом надеемся, что наши результаты иногда будут совпадать. Эта, на первый взгляд, несложная математика таит в себе столько вековых проблем, что их законченное решение не под силу даже очень маститым ученым. Тем не менее она неоднократно выручала нас на штормовых океанских просторах, что дало мне повод высказать однажды такие слова:



времени, и по другим дополнительным данным вычислить координаты и минимизировать среднеквадратическую ошибку.

Задача № 3 заключалась в том, чтобы с учетом особенностей распространения звука в неоднородной морской среде обеспечить устойчивый прием и обработку сигналов. Приоритет в решении этой задачи принадлежит у нас главе научной школы М.Д.Агееву.

Я надеюсь, что более искусственные знатоки этого вопроса простят мне некоторую вульгаризацию, без которой мне было бы трудно передвигаться по страницам околonaучной летописи. Заодно я хотел бы еще раз повторить, что Ариаднина нить, которая выводит меня из тупика – это те ваши труды, господа, которые я не

устаю и перечитывать, и переписывать.

Технические характеристики системы, получившей мировую известность, можно найти в анналах Института. Совершенно излишне говорить здесь об эксплуатационных прелестях системы – о них также неоднократно шла речь на страницах наших научных и литературных отчетов о походах по океанским просторам. Для иллюстрации можно привести пару фотографий, дающих представление о глубоко творческом характере разрабатываемых научных идей. Во всяком случае, уже ко времени создания первых глубоководных аппаратов появилась относительная надежность, и очертания системы приняли почти современный вид. Вла-

димир Кобаидзе, защитив диссертацию, с неистовой энергией взялся за модернизацию ГАНС: создавались новые маяки-приемоответчики, появился на свет СВК (судовой вычислительный комплекс) с вычислителем на базе «Электроники-60», затем «Меры-60» с крейттами из САМАС и разными версиями диалогового матобеспечения. Вошли в обиход активные буксируемые антенны. Бригада в составе Александра Ковалева, Юрия Ларионова, Михаила Серветникова и их еще совсем молодых компаньонов изо всех сил тиражировала продукцию, находя в этом свое специфическое счастье (рис. 7).

Последующее развитие ГАНС происходило в двух направлениях: первое – в расчете на увеличение дальности, второе – на увеличение удобства и вычислительного сервиса. Вычислительный сервис был достигнут, в особенности после всеобщей компьютеризации и перехода на модульные электронные стандарты иностранных фирм. В некотором смысле альтернативой ГАНС с длинной базой может служить ГАНС с ультракороткой базой (господи, боже мой, какие необыкновенные по красоте слова!). Интерес к ГАНС УКБ породил целую серию экспериментов по приему и обработке сигналов фазового пеленгования. Юрий Матвиенко с сотоварищи, создав устройство под названием «буксируемый антенный модуль», стал убеждать нас в том, что относительная угловая погрешность пеленгования может быть не более градуса, и это позволяет надеяться на вполне приличную точность навигации. О других достоинствах ГАНС УКБ и говорить нечего – они очевидны. Обо всем этом можно узнать в подробностях, если перед сном взять в руки известные труды, вместо того чтобы смотреть 1500-ю серию мыльной оперы.



Рис. 7

В центре Тихого океана Владимир Кобаидзе (слева) и Юрий Ларионов тренируют мускулы, вытягивая из бездны атрибуты гидроакустической навигационной системы (1980)

Что касается «дальнобойной» ГАНС, то несмотря на отсутствие положительного практического опыта, сохранялся повышенный научный интерес к инвариантам волновой акустики, что и нашло выход в докторской диссертации Б.А. Касаткина. Как утверждает Борис Анатольевич, возможности ГАНС ДБ отнюдь не исчерпаны.

**Комплексирование – это торная, но извилистая тропа, по которой мы намерены двигаться дальше**

Очень жаль, что в великом и могучем русском языке не находится другого слова, которое могло бы служить синонимом словесного уродца, скрывающегося под термином «комплексирование». Что поделаешь – придется мириться. Вообще-то, говоря об этом, мы имеем в виду построение КНС, т.е. комплексированной навигационной системы, интегрирующей в себе достоинства всех своих составных элементов и игнорирующей их недостатки. Научная мысль стала интенсивно вращаться вокруг КНС еще в те времена, когда подводные аппараты умели лишь двигаться прямолинейными галсами.

Как известно, попытки решить «в лоб» сравнительно сложные задачи не всегда приводят к цели. Тогда ищут окольные пути. Так и в навигации – чтобы повысить, скажем, точность и надежность системы, привлекают дополнительную (как правило, избыточную) информацию. Дается это, понятно, большой ценой, но, как говорится, любишь кататься – люби и саночки возить. Изыскания начались с вопросов о том, как совместить абсолютный акустический лаг, магнитный и гироскопический компасы, а также все это вместе взятое с тем, что составляет

основу ГАНС. Несколько позднее стали говорить и о GPS, как только их погрешности опустились до приемлемого уровня. С тех пор минуло немало лет, но интерес к комплексированию то тлеет слабым огнем, то вдруг разгорается, чтобы дать возможность погреться молодым. Александр Щербатюк, начав с дипломной работы, нашел такое интересное продолжение, что, к удивлению некоторых, в его портфеле вскоре дала сок докторская диссертация.

Когда мы толковали о гидроакустических системах, то подразумевали, что в нашем распоряжении имеется судно, и пока аппарат пребывает под водой (и на воде), на борту судна обеспечивается слежение за аппаратом. Для этого пригодны все средства: и ГАНС-ДБ, и УКБ, и спутниковые системы, скажем, GPS, и РЛС (если недалеко от берега). Другими словами, здесь есть что комплексировать, и мы этим пользовались и продолжаем пользоваться в той мере, в какой позволяют нам наши реальные, а не умозрительные возможности. Наука здесь, хотя и не такая простая, но нынче об этом больше думают компьютеры, а наша задача сводится в основном к тому, чтобы их обслуживать и не мешать им думать.

Когда аппарат описывает прямолинейные галсы, ему не обязательно знать свои координаты – достаточно того, что их знают наверху. Умный аппарат, ориентирующийся в обстановке, конечно, должен производить вычисления, позволяющие ему оценивать и запоминать свое положение относительно выбранной системы отсчета. В итоге это тоже работа для компьютеров, но и нам есть о чем подумать, прежде чем нажать кнопку «старт».

Определение координат в принципе вещь несложная. Вопрос в точности и, есте-

ственно, в возможности использования в бортовой автономной навигационной системе (БАНС) разных устройств. На эту тему немало написано статей и сделано докладов на различных уровнях. Если известны величина и направление вектора скорости, то, интегрируя, мы можем рассчитывать, что получим координаты. Какие тут проблемы? А проблемы есть. Надо, во-первых, знать начальные условия, во-вторых, измерять с достаточной точностью курс и, в-третьих, измерять абсолютную скорость (или ускорение) относительно дна. Все не так просто, и ошибка вычислений, обусловленная инструментальными, методическими и случайными ошибками, имеет способность увеличиваться во времени и потому нас ни в коем случае не может устраивать.

На аппарате может быть установлена инерциальная навигационная система (ИНС), позволяющая измерять углы, скорости и ускорения. Подобные системы используются на самолетах и в космических аппаратах. Не говоря о технических проблемах, связанных с разработкой специализированной ИНС для АНПА, все равно приходим к выводу о необходимости коррекции. Устройства ГАНС, установленные на аппарате, тоже сами по себе не решают проблемы. Вот тут-то опять и приходит на ум слово «комплексирование». Если радиус работы аппарата ограничен, то КНС = ГАНС + БАНС может дать ощутимый результат. Различные модели подобного комплексирования можно найти в ученых записках Института, а также и в трудах международных конференций в Сан-Диего, Варне, Париже, Лиссабоне.

Очередной виток комплексирования связан с использованием визуальной информации для навигационной поддержки АНПА. Следуя Александру

Щербатюку, монополия которого здесь не требует особых доказательств, обозначим некоторые аспекты проблемы. Идея заключается в том, что для глобального, локального и промежуточного ориентирования на местности можно использовать визуальную информацию, полученную с помощью видеокамеры или сканирующего гидролокатора. По замыслу, трехуровневый алгоритм должен обеспечивать:

- выбор маршрута движения путем выделения характерных ориентиров и сопоставления их с картой,
- выбор направления движения на каждом текущем шаге с учетом возможных ограничений или, к примеру, имеющих ГБО-изображений протяженного объекта (скажем, трубопровода),
- определение параметров малых перемещений аппарата при маневрировании в точке или на «пяточке» путем сопоставления последовательных видеокадров.

Все это должно происходить без всякого нашего вмешательства или диалога (возможно, кроме особых ситуаций), так что заявка очень серьезная. Тем не менее и в этой области можно ожидать вполне достойных результатов.

Подводные роботы нового поколения все совершенствуют и совершенствуют свои любимые галсы с прямыми углами, но, по замыслу, могут делать и кое-что посложнее, например, двигаться по изолиниям и выбирать маршрут по направлению к цели при замысловатом рельефе дна, о чем мы уже слегка беседовали чуть-чуть раньше. Но я не могу не вернуться к этой теме, поскольку она всегда была заветной голубой мечтой, олицетворяющей верх умственных способностей, которыми может обладать искусственный интеллект. Помнится, на заре

увлечения подобными штучками казалось, что в гравиметрии, магнитометрии и батиметрии, в обследовании бухт и т.п. можно произвести революцию, если научить аппарат находить и отслеживать изолинии тех полей, о которых мы сами имеем смутное представление. Теоретически все можно сделать вполне красиво, если предположить, что измерители полей (гравиметры, эхолоты, магнитометры и прочие специфические датчики) не только что-то измеряют, но и позволяют это «что-то» запомнить, распознать и связать с точными координатами. Последнее означает, что круг замыкается: чтобы уточнить координаты, надо измерить поле, а чтобы измерить поле, надо уточнить координаты. Другая сторона дела – ориентирование в неизвестной среде, что приобретает смысл только в том случае, если аппарат, вращающийся в этой среде, иногда натывается на предметы, о которых кое-что известно. Ну, скажем, переехав океан, он натывается на другой континент и, посмотрев на карту, говорит: «есть такая буква в этом слове».

*Путешествуя во времени и возвращаясь в очередной раз в наше светлое настоящее, хочу заметить, что благодаря упорству создателей систем подводной навигации и связи появилась возможность поручать подводным роботам такие задания, о которых раньше приходилось только фантазировать. И техника, и математика шагнули далеко вперед. Многие из того, что было достигнуто за прошедшие годы, носит черты уникальности, но вместе с тем нельзя не обмолвиться, что достижение желаемых результатов зависит нередко от решения массы других, далеко не академических проблем. Добавлю еще, что наши пред-*

*ставления о построении высокоточных и надежных систем навигации и управления постепенно трансформируются под влиянием реальных успехов и неудач. К безусловным (но далеко не самым радужным) удачам можно отнести создание гидроакустического комплекса навигации и связи, в котором нашли применение кое-какие конструктивные новшества и сервис в части программирования и обработки информации от различных источников. Этот комплекс не раз проявлял себя при выполнении ответственных работ в самых разных морских операциях на различных широтах и меридианах. Бывали и неудачи, но именно они и подталкивают тружеников к поиску сермяжной правды и созданию более совершенных систем. Сказанное относится в равной степени и к другим важнейшим составляющим подводной робототехники, в частности, к так называемому техническому зрению. Здесь имеются в виду обзорные гидролокаторы, фототелевизионные системы, измерители морских электромагнитных, магнитных, химических, биологических и множества других полей, весьма интересных не только для Науки. Некоторые наши усилия и обнадеживающие достижения в этой области вселяют вполне обоснованный оптимизм.*

Итак, наш скучный экскурс в сферу научного поиска подошел к концу. Те идеи, которые нас нынче волнуют, и те, которые еще вызревают, увы, не всегда приносят нам радость. Но в этом, возможно, и заключена диалектическая сила, которую мы творим своими собственными руками и талантами и которая гонит нас к неведомым берегам, как весенний порывистый ветер гонит вдаль одинокие разрозненные облака.