



# Сибирская база подводного флота

Сибирское отделение РАН всегда уделяло особое внимание вопросам обороноспособности страны. На протяжении многих лет в институтах СО РАН выполнялся большой комплекс исследований для Военно-Морского Флота по созданию и совершенствованию высокоскоростных подводных лодок. Тесное сотрудничество, сложившееся у организатора и первого председателя Сибирского отделения академика М. А. Лаврентьева с руководством ВМФ и ведущими конструкторами судостроительной промышленности, сохранялось и укреплялось его преемниками. Полученные сибирскими учеными результаты заслужили высокую оценку военных специалистов и судостроителей, были использованы для модернизации и повышения боеспособности отечественного подводного флота

**Ключевые слова:** математическое моделирование, экспериментальные исследования, подводная лодка, Академия наук, пограничный слой, турбулентность.  
**Key words:** mathematical simulation, experimental studies, submarine, Academy of Sciences, boundary layer, turbulence



ДОБРЕЦОВ Николай Леонтьевич – действительный член РАН, доктор геолого-минералогических наук, научный руководитель Института геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН (Новосибирск).  
Главный редактор журнала «НАУКА из первых рук»



ФОМИН Василий Михайлович – действительный член РАН, доктор физико-математических наук, директор Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (Новосибирск)

В конце 1950-х годов в подводном флоте нашей страны происходили революционные изменения. Переход к атомной энергетике позволял резко увеличить водоизмещение подводных лодок, скорость их движения, автономность плавания, скрытность, мощность вооружения и т. д. Решение таких задач требовало мощного научного обеспечения и большой организаторской работы. В результате академики М. А. Лаврентьев, Л. И. Седов и А. П. Александров создали Научный совет по проблемам гидродинамики больших скоростей при Президиуме АН СССР, в который наряду





В конце 1950-х годов перед Институтом гидродинамики, возглавляемым М.А. Лаврентьевым, были поставлены задачи: исследования возможности резкого уменьшения полного сопротивления подводных лодок и оптимизации их прочностных характеристик. Для проведения необходимых экспериментальных исследований было предложено использовать легкие автономные, в том числе и крупномасштабные, модели, всплывающие под воздействием силы плавучести. Сопротивление движущихся в воде тел при реально достижимой скорости в десятки раз меньше их полного водоизмещения, поэтому достаточно даже небольшой положительной или отрицательной плавучести, чтобы хорошо обтекаемое тело приобрело значительную скорость всплытия или погружения вдоль своей оси. Использование автономных всплывающих и погружающихся моделей имело ряд преимуществ: сравнительная дешевизна, натурная внешняя турбулентность набегающего потока, отсутствие вибраций, большие скорости движения достаточно больших моделей. Однако для проведения таких исследований требовалась акватория с достаточными глубинами вблизи берега. Такие места впоследствии были найдены и использованы на оз. Иссык-Куль в Киргизии и на Черном море, на базе Сухумского филиала Академии наук.

с представителями академической науки вошли ведущие специалисты Военно-морского флота, отраслевых министерств и ведомств. На его заседания регулярно приглашались с докладами непосредственные исполнители научных исследований и параллельных конструкторских разработок. Деятельность Научного совета являла хороший пример взаимодействия ученых и конструкторов с военными специалистами.

Возникшее в те же годы Сибирское отделение Академии наук изначально уделяло особое внимание вопросам обороноспособности страны. Большой комплекс работ выполнялся в интересах подводного флота страны, в том числе в рамках Постановления Правительства 1959 года по созданию высокоскоростных подводных лодок. Тесные творческие связи, сложившиеся у организатора и первого председателя СО РАН академика М.А. Лаврентьева с руководством ВМФ и ведущими конструкторами судостроительной промышленности, сохранялись и укреплялись его преемниками. В течение многих лет в Сибирском отделении активно работал Координационный совет по проблемам ВМФ, в состав которого входили видные сибирские ученые, представители головных институтов и командования флота, ведущих предприятий судостроительной отрасли.

В целом исследования, проводившиеся учеными СО РАН для улучшения характеристик отечественных подводных лодок, можно свести к трем основным направлениям:

- повышению быстроходности и маневренности судна за счет снижения сопротивления путем управления пограничным слоем и использования принципиально новых покрытий корпуса;
  - улучшению деформационно-прочностных характеристик корпуса за счет использования новых перспективных материалов;
  - исследованию гидродинамического следа за судном, движущимся в стратифицированной среде.
- Остановимся отдельно на каждом из этих направлений и отметим основные результаты проведенных исследований.

### Пузырьки против турбулентности

В начале 1940-х годов советскими учеными была предсказана возможность уменьшения касательных напряжений на два порядка путем насыщения турбулентного пограничного слоя плотной пузырьковой пленкой. В 1960–1970-х годах в Институте гидродинамики СО АН СССР экспериментально было подтверждено значительное уменьшение касательных напряжений и, как следствие, полного сопротивления пластины и осесимметричных тел при наличии пузырьков в потоке. Публикация этих результатов в середине 1970-х годов

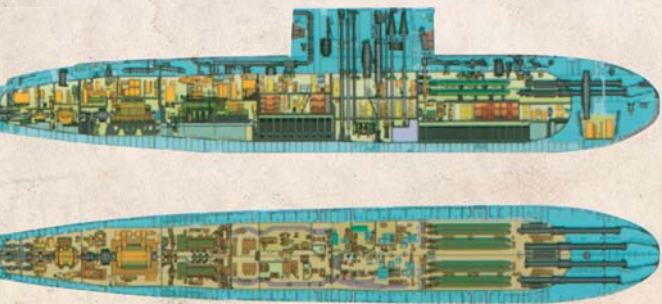


Большую роль в постановке и проведении исследований сибирских ученых в интересах ВМФ сыграла Секция прикладных проблем при Президиуме АН СССР с отделением в Новосибирске, которое возглавил Г.С. Мигиренко, а также прикомандированный к Институту гидродинамики отдел НИИ ВМФ.



Георгий Сергеевич Мигиренко (1916—1999) – советский механик и математик. Доктор технических наук. Профессор. Лауреат Ленинской премии (1962). Заслуженный деятель науки и техники РФ. Работал в Военно-морской академии кораблестроения (1946—1952), Математическом институте АН СССР (1953—1958), в Институте гидродинамики СО АН СССР (1959—1973). Преподавал в Новосибирском государственном университете и Новосибирском государственном техническом университете. Участник Великой Отечественной войны. Контр-адмирал в отставке. Третье награжден орденами Красной Звезды, другими орденами и медалями СССР.





## Полимерные добавки против турбулентности

В начале 1970-х годов в Институте гидродинамики СО АН СССР началось изучение влияния ввода в поток малых высокомолекулярных полимерных добавок для снижения турбулентного трения. Известные к этому времени экспериментальные работы с полимерными добавками позволяли надеяться на быстрое решение проблемы резкого снижения гидродинамического сопротивления водного транспорта. В результате тесного взаимодействия с химиками в кратчайшие сроки было налажено производство отечественного высокомолекулярного полимера – полиэтиленоксида (ПЭО), не уступающего по своим свойствам американским аналогам.

При больших числах Рейнольдса эксперименты с использованием полимерных добавок показали пятикратное снижение полного сопротивления осесимметричного тела под нулевым углом атаки и резкое снижение высокочастотных пульсаций давления на стенке. Большая серия экспериментальных работ была связана с совершенствованием систем эжекции полимерных растворов. Итогом комплексных исследований отечественных ученых стало создание подводной лодки-лаборатории, оборудованной системой хранения, подготовки и эжекции растворов ПЭО.

Поскольку используемые для снижения гидродинамического сопротивления полимеры были довольно дороги, в Институте теплофизики СО АН в 1980-е годы были выполнены исследования, направленные на увеличение рентабельности их использования. Полученные результаты определили наиболее перспективное направление дальнейшей работы по целевому использованию высокомолекулярных добавок – мягкая дезинтеграция их макромолекул перед вводом в поток.

## Податливые покрытия против турбулентности

Предложение об использовании податливой поверхности для уменьшения сопротивления тела было выдвинуто в 1950-е годы. Проблема состояла в том,

вызвала большой интерес прежде всего у американских и японских исследователей. Детальное воспроизведение наших экспериментов подтвердило достоверность результатов. Однако при этом выявились и некоторые принципиальные противоречия между результатами, полученными в разных странах на разных экспериментальных установках. Выявленные противоречия вызвали необходимость выяснения механизмов взаимодействия пузырьковой пелены с турбулентностью в пограничном слое.

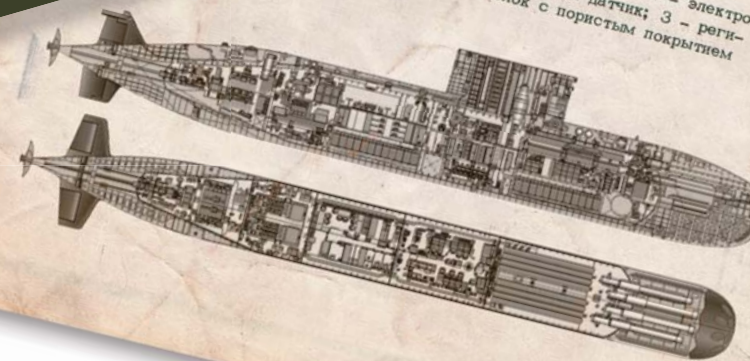
Проведенные в Институте гидродинамики исследования показали, что под воздействием локальных градиентов давления вихревые структуры, сталкиваясь с мелкими пузырьками, всасывают их в себя и уносят от смоченной поверхности. Сталкиваясь с более крупными пузырьками, вихревые структуры разрушаются и тем самым уменьшают потери энергии, необходимой для их дальнейшего развития, а следовательно, уменьшают и касательные напряжения. Детальное исследование особенностей обтекания тел при отрицательном и положительном градиентах давления вдоль смоченной поверхности позволило понять не только характер взаимодействия пузырьковой пелены с вихревыми структурами вблизи тела при различных режимах обтекания, но и причину экспериментальных разногласий.

Выясненные механизмы взаимодействия дали возможность оптимизировать обводы тел для наиболее эффективного использования этого явления. В настоящее время насыщение турбулентного пограничного слоя пузырьками в упомянутых странах признано одним из наиболее перспективных способов уменьшения полного сопротивления судов.

гидродинамика  
и акустика  
пристенных  
и свободных  
течений

СБОРНИК  
НАУЧНЫХ  
ТРУДОВ

Рис. 3. Схема проведения эксперимента: 1 – электродетонатор ЭД-8; 2 – запускающий датчик; 3 – регистрирующий датчик; 4 – блок с пористым покрытием



что опытным путем была показана возможность как уменьшения, так и увеличения сопротивления тела за счет использования податливой поверхности. Таким образом, требовалось разработать физическую модель, адекватно описывающую это явление и способное указать алгоритм выбора податливой поверхности, уменьшающей сопротивление тела. Такая модель, основанная на волновой интерференции, была предложена в Институте теплофизики новосибирского Академгородка. С ее помощью удалось не только установить физические обоснованные свойства податливого покрытия, уменьшающего сопротивление за счет снижения турбулентного трения, но и предложить методику выбора такого покрытия.

В последние годы сибирскими учеными разработаны композиции и технология изготовления однослойных покрытий, прошедших несколько серий испытаний как в нашей стране, так и за рубежом (США, Англия). Анализ результатов не только подтвердил эффективность предложенного расчетного метода выбора покрытий и гидродинамических условий для снижения сопротивления, но и наметил пути совершенствования покрытий при сохранении простоты их изготовления. Податливые покрытия для снижения сопротивления экономически весьма привлекательны, что поддерживает устойчивый интерес к их разработке и исследованию.

## Тройной эффект

Идея совместного использования податливого покрытия, полимерных добавок и пузырькового газонасыщения для управления пристенной турбулентностью возникла благодаря описанным выше успехам в ее исследовании. С другой стороны, области эффективного применения этих способов управления сильно разнятся. Податливая поверхность реагирует на длинноволновые (более 1000 вязких масштабов) возмущения. Малые высокомолекулярные полимерные добавки подавляют микровихревую турбулентность с размерами менее 100 вязких масштабов. Текущий пристенный экран из микропузырьков способен разрушать мощные длинноволновые флуктуации, направленные к стенке из турбулентного ядра и внешнего потока. Можно было ожидать, что совместное применение этих способов управления позволит уменьшить генерацию пристенной турбулентности практически во всем ее пространственном спектре.

Проведение соответствующих экспериментов при широкой вариации гидродинамических условий и параметров показало существование зоны положительного взаимодействия, в которой совместная эффективность в снижении турбулентного трения больше суммы индивидуальных эффективностей.

Это означает, что взаимодействие различных способов управления пристенной турбулентностью является сегодня одним из наиболее важных и перспективных направлений исследований в этой области.





## Материал на перспективу

В середине 1960-х годов в Институте гидродинамики СО АН были экспериментально исследованы прочностные особенности титановых сплавов, которые должны были заменить конструкционную сталь в корпусе подводной лодки. Будучи почти вдвое легче стали, титан практически не уступает ей по пределу прочности. Однако оставались вопросы. Так, одной из особенностей титановых сплавов является их ползучесть, означающая неограниченное деформирование при обычной температуре и нагрузках даже ниже предела текучести. Если по упругопластическим характеристикам титан можно считать изотропным материалом, одинаково ведущим себя при растяжении и сжатии, то по характеристикам ползучести титан имеет существенную анизотропию, ведя себя при растяжении и сжатии по-разному. Так, например, один из двух одинаковых образцов, вырезанных из листа в одном и том же направлении, подвергли растяжению, а другой – сжатию при одинаковых напряжениях. Первый разрушился через полтора месяца, второй простоял под нагрузкой около двух лет и не разрушился, после чего эксперимент был прекращен.

Известно, что необратимые деформации сопровождаются накоплением усталости материала, приводящим к его разрушению. Это обстоятельство требует определения напряженно-деформированного состояния любого элемента конструкции с целью определения места и срока ее разрушения. Анизотропия титановых сплавов при растяжении и сжатии существенно усложняет расчет сделанных из них конструкций на прочность, поэтому наряду с экспериментальными исследованиями в Институте был выполнен цикл теоретических работ по определению напряженно-

деформированного состояния элементов конструкций подводной лодки с учетом пластических деформаций и явления ползучести.

Важные результаты были получены и в экспериментах, исследовавших влияние температуры окружающей среды на деформации титановых сплавов в диапазоне от  $-50$  до  $100$  °С.

На протяжении многих лет проводились численные и экспериментальные исследования деформационно-прочностных свойств конструкций из перспективных композитных материалов.

## Движение по следу

Вместе с появлением подводных лодок возникли проблемы их обнаружения и маскировки. Применение акустических методов обнаружения привело к технической модернизации подводных лодок, значительно снизившей их шумность. Развитие неакустических методов обнаружения подводных лодок шло по разным направлениям.

Ученые Сибирского отделения АН сосредоточили свои усилия на исследовании возмущений гидродинамических полей, вызванных движущейся на глубине с большой скоростью подводной лодкой. В этом случае основными являются гидродинамические возмущения от ее обтекания и турбулентный след за ней. Большое разнообразие в такие течения вносит плотностная неоднородность жидкости по глубине (стратификация), существующая в реальных морских и океанских условиях из-за переменной температуры и солености. В такой жидкости существуют внутренние волны



Б. В. Войцеховский и Г. С. Мигиренко на параде Победы в Новосибирске 9 мая 1969 г.

с максимальными амплитудами на глубине и большим диапазоном длин и скоростей распространения. Именно их регистрация представляется наиболее перспективной для обнаружения подводного судна, движущегося на большой глубине под свободной поверхностью.

Попытки решения этой задачи эмпирическим путем к успеху не привели, поскольку малые возмущения гидродинамических полей пришлось выявлять на фоне сильных внешних помех. В связи с этим основной упор был сделан на математическое моделирование кильватерного следа за судном, который состоял из турбулентного следа и поля внутренних волн, генерируемых этим следом и корпусом подводной лодки. Параллельно была выполнена большая серия имевших самостоятельное значение экспериментальных работ, результаты которых были использованы при создании, апробации и корректировке математических моделей.

Особенности трансформации турбулентного следа за телами изучались в отсутствие и присутствии движителя, в однородной и стратифицированной среде. Созданные в результате кропотливой работы сибирских ученых математические модели турбулентного следа и генерируемых им внутренних волн позволили рассчитывать их характеристики, надежность которых была подтверждена результатами лабораторных и натурных экспериментов. Математическое моделирование позволило получить оценки параметров турбулентного следа и генерируемых им внутренних волн в реальной морской среде.

Проведенные исследования дали возможность обосновать переход к упрощенным математическим моделям при расчете следа на больших расстояниях от тела, когда для анализа внутренних волн можно

было использовать двумерные уравнения Эйлера. Для целого ряда практически важных стратификаций была построена линейная теория внутренних волн, генерируемых турбулентным следом. Для расчета характеристик собственно турбулентного следа также была построена приближенная диффузионная модель. В результате применения физически обоснованных упрощений математической модели время численных расчетов сократилось по меньшей мере на порядок, что дало возможность проводить их с использованием бортовых ЭВМ подводных лодок.

Ученые показали, что для внутренних волн, идущих от корпуса, слои с резким градиентом плотности, по сути, являются волноводами, по которым возмущения распространяются на большие расстояния в поперечном направлении. В результате внутренние волны, создаваемые подводной лодкой, проявляются и на свободной поверхности в виде поля поперечных скоростей в узком следе. При взаимодействии с умеренным ветровым волнением (до 4 баллов) этот след может быть обнаружен локационной аппаратурой, установленной на самолетах или спутниках.

Результаты проведенных в Сибирском отделении АН исследований показали возможность обнаружения подводных лодок по кильватерному следу с помощью реальных технических средств. Расчеты по предложенным методикам позволили сформулировать требования к чувствительности, пространственно-временной разрешающей способности и уровню собственных шумов аппаратуры для обнаружения подводных лодок по целому ряду признаков, к которым относятся внутренние волны от корпуса и турбулентного следа, флуктуации скорости и плотности (температуры, солености) в следе, степень радиоактивности. Разработанные математические модели позволяли выбирать оптимальные режимы движения подводной лодки и глубины ее погружения в различных гидрологических условиях для обеспечения скрытности маневров.

Рекомендации сибирских ученых получили высокую оценку командования ВМФ, были использованы при формировании тактико-технических требований к перспективным подводным лодкам и при проведении опытно-конструкторских работ ведущими предприятиями судостроительной промышленности страны.

### Литература

Роль российской науки в создании отечественного подводного флота / А. А. Саркисов (ред). Москва: Наука, 2008. С. 176–186.

В подготовке статьи использованы иллюстративные материалы из кн. «Роль российской науки в создании отечественного подводного флота» (2008) и фотографии Р. Ахмерова