

кафедра Вычислительная механика

Полугодовой спецкурс

**ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА И
ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ
ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ**

д.т.н., проф. Кудашев Ефим Борисович

Email : kudashev@iki.rssi.ru

кафедра Вычислительная механика

Введение в Спецкурс

ИССЛЕДОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ГЛУБОКОМ МОРЕ

Проф., д.т.н. Кудашев Е.Б.

Email: kudashev@iki.rssi.ru

Телефоны: 713 2609; 8- 926-917-8658 (мобил)

Полугодовой спецкурс

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА И
ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ
ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ

д.т.н., проф. Кудашев Ефим Борисович

Email : kudashev@iki.rssi.ru

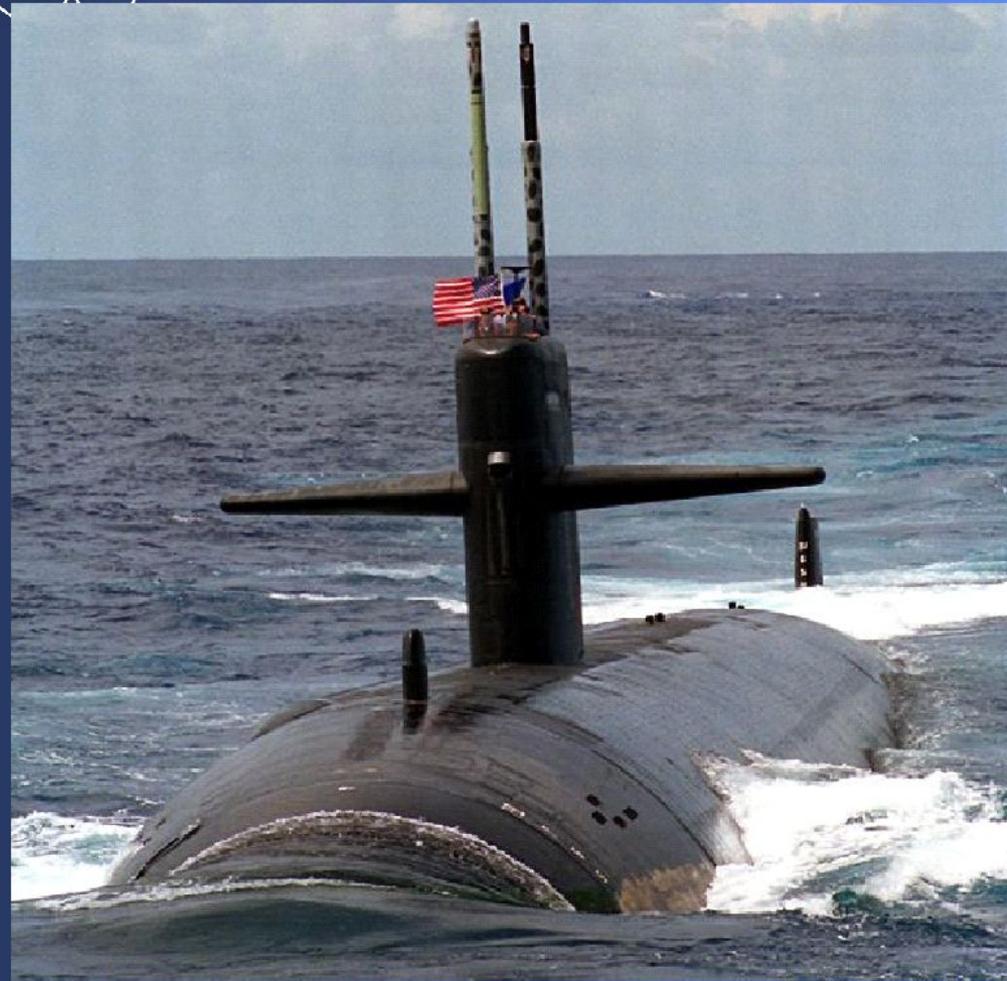
«Учение о турбулентности оказывается иногда под влиянием недооценки значения экспериментальных данных и общих закономерностей, получаемых из эксперимента.

Наиболее прямым будет тот путь, на котором мы, опираясь на экспериментальные закономерности, строили бы модели, объясняющие эти закономерности».

Вице-Президент Академии наук СССР
академик М. Д. МИЛЛИОНЩИКОВ

Обсуждаемые вопросы

В результате многолетних экспериментальных исследований гидродинамических шумов обтекания, проводимых на Сухумской акватории в Черном море, создана уникальная возможность изучения пристеночных турбулентных давлений. На научно-исследовательских, гидрографических и промысловых судах в настоящее время начинают применять гидроакустические средства с решеткой преобразователей-антенной, устанавливаемой заподлицо с оболочкой обтекателя и, следовательно, имеющих непосредственный контакт с набегающим потоком.



Турбулентные пульсации давления, воздействующие на приемную поверхность антенн при движении судна создают турбулентную гидродинамическую помеху работе гидроакустических средств. Для оценки этой помехи требуется информация об энергетических и пространственных характеристиках поля турбулентных пульсаций давления на поверхности решетки акустических преобразователей. Рассмотрим новый метод исследования статистических характеристик турбулентных пульсаций давления в условиях глубокого моря, основанный на применении всплывающих устройств.

Метод исследования турбулентности основан на применении всплывающих устройств. Внешне устройство выглядит как удлиненное тело вращения с обтекаемой носовой частью и кольцевым стабилизатором в его кормовой части. В лекции будет показано, что реализованные при создании всплывающего устройства принципы позволяют осуществлять сложный акустико-гидродинамический эксперимент в турбулентном пограничном слое при высоких числах Рейнольдса (до значений 10^8) в автономных условиях, без вмешательства оператора, практически не искаженный посторонними помехами.



Рис. 1. Всплывающее устройство

Рис.2. Начало эксперимента



В современных условиях значительный интерес приобретает задача обеспечить ученым России экспериментальную базу исследования морской среды, развитие которой было начато еще в советский период. После провозглашения независимости Республики Абхазия российские ученые возвращаются на абхазское побережье Черного моря - на стенды, созданные в советские времена, для выполнения широкой программы исследований в области гидроакустики, гидродинамической акустики, гидрофизики и акустики океана.

Однако научная проблема значительно шире. В более фундаментальном и масштабном аспекте проблема заключается в развитии всего комплекса методов и средств дистанционной диагностики океана. Необходимо формировать Черноморский полигон для разработки перспективных методов акустического зондирования океана на протяженных (сотни километров) трассах, повышения эффективности систем оперативного и долговременного мониторинга состояния океанических вод, включая активные системы освещения подводной обстановки в акваториях окраинных морей РФ.

Проблема шумов обтекания и исследования статистических параметров пульсаций давления в турбулентных потоках, генерирующих шумы обтекания, первоначально возникла около 60 лет назад. В связи с появлением реактивной авиации возникла необходимость уменьшения уровней интенсивного шума, который производят турбулентные газовые струи при истечении из сопел реактивных двигателей самолетов. Позже эта проблема получила свое дальнейшее развитие применительно к шуму обтекания многих других объектов и аппаратов, движущихся в воде и воздухе с большими скоростями.

Изучение этой проблемы занимается относительно молодая наука, которую часто называют гидродинамической или аэродинамической акустикой. Эта наука сформировалась на границе двух самостоятельных разделов механики сплошных сред: гидродинамики (аэродинамики) и акустики. Процессы генерации пристеночных пульсаций давления в пограничном слое связаны с целым рядом факторов, включающих вязкость и сжимаемость движущейся среды, шероховатость стенки и градиент давления на обтекаемой поверхности.

При этом даже в стандартном случае безградиентного обтекания гладкой плоской поверхности несжимаемой жидкостью при описании отдельных свойств турбулентного пограничного слоя оказывается удобным использовать различные характерные масштабы длины и скорости, соотношение между которыми определяется числом Рейнольдса. Решение проблемы шумов обтекания считается одной из наиболее трудных задач нелинейной механики жидких и газообразных сред.

Гидроаэродинамическая акустика

Для статистического описания процессов генерации акустического излучения и формирования псевдозвуковых турбулентных пульсаций давления гидроаэродинамическая или часто используют название – гидроаэродинамическая акустика – эта наука использует статистические параметры турбулентных потоков как исходный фундамент и в результате ее можно рассматривать как раздел статистической гидромеханики.

Псевдозвуковые флуктуации давления имеют не акустическую, а гидродинамическую природу, чем и обусловлено их название, введенное в обращение в свое время академиком Д.И. Блохинцевым. Псевдозвуковые давления не генерируют акустического излучения непосредственно, так как их волновые числа меньше звуковых волновых чисел, но они возбуждают вибрации корпусных конструкций объектов и аппаратов, обтекаемых потоком, что приводит к возникновению вторичного, переизлученного вибрациями шума обтекания.

Отметим еще раз, что проблема генерации шума турбулентными потоками считается одной из наиболее трудных проблем нелинейной механики жидких и газообразных сред.

Основные трудности теоретического изучения проблемы обусловлены тем, что для ее математического описания используются сложные нелинейные дифференциальные уравнения в частных производных, статистическая форма которых образует незамкнутую систему уравнений (число неизвестных больше числа уравнений).

Незамкнутость системы уравнений делает неизбежным привлечение данных из опытов. Однако при экспериментальном изучении проблемы одна из трудностей состоит в том, что лабораторные экспериментальные установки (аэродинамические и гидродинамические трубы, гидротки, опытовые бассейны) для создания потока используют различного рода механизмы, которые производят посторонние шумы, мешающие измерениям шумов обтекания.

Другая принципиальная трудность, возникающая при проведении экспериментов – при реализации экспериментального моделирования турбулентных шумов обтекания, заключается в том, что в лабораторных условиях не удастся обеспечить те большие числа Рейнольдса, которые представляют, как мы увидим дальше, практический интерес для современных высокоскоростных транспортных средств.

Исследования шумов обтекания на Сухумской акватории Черного моря, о которых будет рассказано в лекции, позволяют развить актуальное научное направление в области гидродинамической акустики и получить новые научные результаты в области источники гидродинамических помех работе гидроакустических средств на гидрографических, научно-исследовательских и промысловых судах.

Турбулентные источники шумов обтекания - пристеночные пульсации давления занимают особое место в фундаментальных и прикладных исследованиях турбулентных течений. С одной стороны, пристеночные турбулентные пульсации давления уже в силу своего определения представляют лишь граничные характеристики турбулентного течения, являясь своего рода «тенью» или проекцией сложных динамических процессов, происходящих в ядре потока.

Прикладное значение исследований турбулентных пульсаций давления особенно велико. Поля пульсационной компоненты пристеночных давлений являются определяющим фактором вибрационного нагружения обтекаемых тел в стационарном турбулентном потоке. Пульсационное силовое взаимодействие потока и ограничивающих его элементов порождает акустическое излучение в область течения, а вызванные турбулентной нагрузкой вибрации, будучи сами по себе важным в инженерных приложениях фактором, служат дополнительным механизмом излучения и переизлучения звука, порождаемого за счет пульсаций пристеночного давления.

При экспериментальном изучении проблемы турбулентных источников шумов обтекания трудности состоят в необходимости измерять такие сложные статистические функции, как частотные, взаимные, частотно-волновые спектры и корреляции, которые характеризуют случайные (в вероятностном смысле) турбулентные и акустические поля и процессы. Успешно осуществить этот подход к экспериментальному изучению гидродинамических шумов обтекания оказалось под силу только научным центрам,

имеющим современную измерительную аппаратуру и уникальное экспериментальное оборудование и высокопрофессиональные коллективы исследователей. Как пример: малошумная аэродинамическая труба с регулируемой степенью начальной турбулентности создана в ЦНИИ имени академика А.Н. Крылова. Для подавления отражения исследуемого звука от стенок рабочего участка были разработаны специальные крупногабаритные заглушённые рабочие участки малошумной аэродинамической трубы, на стенки которых нанесены звукопоглощающие покрытия.

Комплексное теоретико-экспериментальное изучение проблемы позволило за прошедшие 50 лет получить удовлетворительные решения целого ряда ее фундаментальных задач, таких как генерация шума струйными течениями, формирование поля звуковых и псевдозвуковых давлений в плоском пограничном слое и др. Однако интерес к прикладным задачам борьбы с турбулентным шумом возрастает в связи с увеличением скорости движения современных транспортных средств.

Несколько десятилетий назад в США научной группой акустика Скучика и практически одновременно в СССР в ЦНИИ имени Крылова и в Акустическом Институте были начаты работы по созданию всплывающих устройств. Всплывающее устройство представляет собой удлиненное тело вращения, имеющее в погруженном состоянии избыточную архимедову плавучесть и по этой причине способное самостоятельно всплывать из глубоководных частей морской акватории, куда оно предварительно доставляется с помощью специальных заглубляющих приспособлений. Образцы всплывающего устройства показаны на следующем слайде на рис.1.

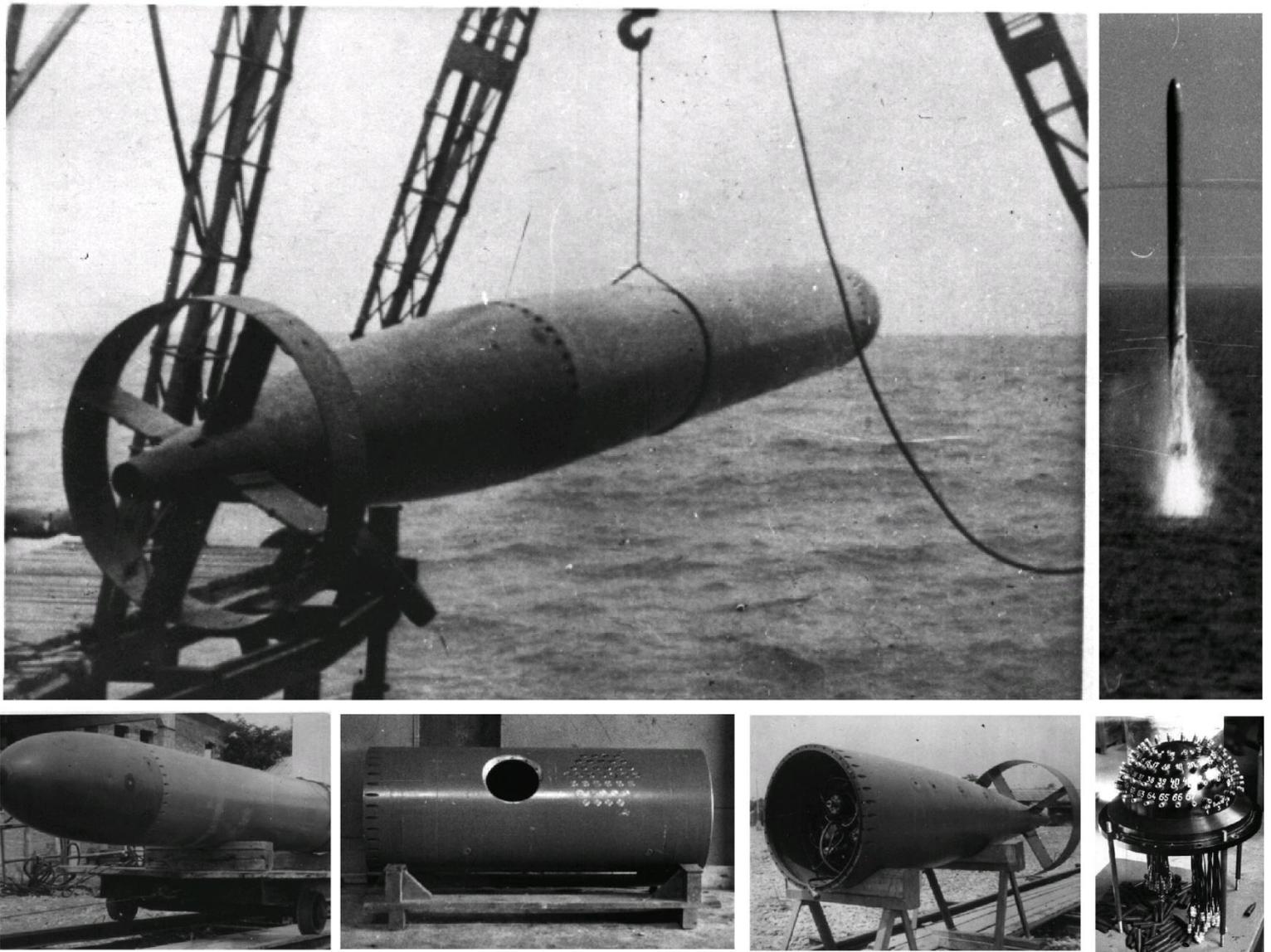


Рис. 3. Всплывающее устройство: слева - установка устройства; справа - выход устройства из моря

Устойчивость движения при вертикальном всплытии обеспечивается наличием стабилизатора в кормовой части тела, как было видно на рис. 3.

Расчеты показали, что движущую силу всплывающего устройства можно сделать достаточной для того, чтобы скорость всплытия достигала 15 — 20 м/с, что при размерах тела около 10 м соответствует весьма высоким числам Рейнольдса. Турбулентные пульсации скорости, давления и касательных напряжений трения пограничного слоя, образующегося на поверхности

всплывающего устройства во время его движения, могут быть преобразованы малогабаритными преобразователями, установленными на корпусе устройства, в пульсации электрического сигнала. Для регистрации этих пульсаций внутри всплывающего устройства располагается автономный цифровой многоканальный регистратор аналогового сигнала с записью информации на флэш-карту.

Всплывающее устройство является автоматически действующим устройством - Автономной лабораторией. Преимущества экспериментальных исследований со всплывающими устройствами перед опытами в обычных аэродинамических трубах и гидроустановках состоят в том, что отсутствуют посторонние шумы, мешающие измерениям турбулентных пульсаций давления, поскольку движение установки создается не механизмами, а потенциальным полем гидростатического давления; что же касается шумов моря, то они при умеренном (1 - 2 м) волнении много ниже измеряемых турбулентных пульсаций давления.

Автономная Лаборатория обеспечивает исследования турбулентности при высоких числах Рейнольдса (до значений 10^8), почти недостижимых в большинстве других лабораторных установок. Имеет место низкая степень начальной турбулентности натекающего потока, соответствующая естественной турбулентности глубокого моря. Недостатки Всплывающего устройства: сложность эксплуатации по сравнению с эксплуатацией гидро- и аэродинамических труб, а также ускоренность их движения на значительной части пути при всплытии.

При проведении экспериментов проводилась расчётная настройка всплывающего устройства на заданную скорость его всплытия 25 м/с. После этого всплывающее устройство буксировалось в море, заглублялось на глубину ~ 180 м, и при всплытии с этой глубины «Автономный регистратор» записывал в буферную память анализатора случайную временную функцию турбулентных пульсаций давления.

Разработка Всплывающих устройств была начата в ЦНИИ Крылова. Основное внимание было сосредоточено на исследовании шумов обтекания. Эти исследования актуальны прежде всего для определения источников гидродинамических помех подводных лодок. В результате уже к середине 70-х годов были созданы и испытаны уникальные образцы Всплывающих устройств, способные эффективно работать при всплытии с больших глубин и скоростях движения.

Всплывающее устройство использовалось для исследований шумов обтекания движущихся объектов вплоть до августа 1992 г. После начала в августе 1992 года Грузино-Абхазской войны, работы на морском стенде были прекращены, разрушенная береговая инфраструктура показана на рис. 2. До настоящего времени оборудование стенда не эксплуатировалось. За прошедшие годы и, особенно в период грузино-абхазского конфликта, часть вспомогательного морского и берегового оборудования (лебедки, тросовые коммуникации, блоки, донные якоря и т.п.) пришло в негодность.



Рис.4. Разрушенная береговая инфраструктура после Грузино-Абхазской войны.

В Сухумской бухте в акватории Гидрофизического Института Академии Наук Абхазии уникальный пологий рельеф и существуют замечательные условия для проведения экспериментальных исследований в области гидроакустики и гидродинамической акустики. Акватория Гидрофизического института расположена в северо-западной части Черного моря к югу от Сухумского маяка и представляет собой глубоководный участок моря размером 2×3 мили,

Участок моря ограничен с севера береговой чертой далеко выступающего в море Сухумского мыса.

Уровень моря у берега на 28 см ниже нуля Кронштадтского футштока. Наклон дна по направлению от берега составляет 25 - 30°, в среднем, 28° от уреза воды, вследствие чего, по мере удаления от берега быстро нарастает глубина моря.

Стенд в Сухум



Рис.5. Структура Морского стенда

Схема Морского глубоководного стенда, созданного на основе всплывающего устройства, представлена на рис. 3.

В состав Морского стенда входят: Всплывающее устройство с регулируемой положительной плавучестью и аппаратурой для измерения гидродинамических шумов;

Эллинг для хранения и сборки всплывающего устройства; Катер для буксировки всплывающего устройства к месту заглубления;

Береговая инфраструктура: Эстакада (Пирс) для транспортировки всплывающего устройства

из эллинга в море и обратно; береговые лебедки; якоря весом до 2 т, оснащённые донными блоками. Лебедка имеет усилие 5 т и обеспечивает погружение всплывающего устройства с подъемной силой 3,5-3,7 т на глубину до 200 м. Положительная плавучесть технологического буя остается неизменной и имеет подъемную силу 1,0 т. Плавучесть постоянно поддерживает канат в натянутом состоянии, что достаточно для преодоления сопротивления движения стального каната по морскому дну.

В настоящее время Морской глубоководный стенд, всплывающее устройство и береговая инфраструктура с оборудованием восстановлены. Прошли систематические испытания и начаты экспериментальные исследования гидродинамических шумов обтекания и турбулентных источников шумов в акватории Сухумского Гидрофизического института. Всплывающее устройство используется также в режиме буксировки протяженных цилиндрических шлангов с приемными гидрофонами внутри шлангов - морских геофизических антенн, используемых при поиске углеводородных месторождений на морском шельфе.



Рис.6. Выполнение морской постановки якоря, оснащённого донным блоком.

На Рис.6 демонстрируется буксировка плавучестей технологического буя в район постановки. Сейнер левым бортом был пришвартован к эстакаде носом к берегу. Автокран грузоподъёмностью 12 тонн поднял донный якорь.

Измерения гидродинамических источников помехи не могут быть проведены в обычных установках для гидродинамических экспериментов:

аэродинамических или кавитационных трубах, в опытовых бассейнах и т.п. Для проведения экспериментальных исследований необходимы специализированные малошумные экспериментальные установки. Причина состоит в том, что в обычных установках электромеханические агрегаты, обеспечивающие поток воды или воздуха в гидро- и аэродинамических трубах, движение буксировочной тележки в бассейнах, неизбежно являются источниками шума, т.е. звуковых пульсаций давления.

Если не приняты специальные меры, фоновый уровень пульсаций давления в таких установках не позволяет зафиксировать турбулентные пристеночные давления, вызванные потоком, так как фон соизмерим с ними или даже существенно их превышает. Морской полунатурный стенд является именно таким специализированным малошумным устройством, поскольку полностью лишен каких-либо механизмов для его перемещения в пространстве.

Высокая скорость движения всплывающего устройства относительно воды достигается исключительно за счет избыточной силы плавучести, действующей на устройство при его всплытии с большой глубины. Внешне устройство выглядит как удлиненное тело вращения с обтекаемой носовой частью и кольцевым стабилизатором в его кормовой части. Фактически Морской полунатурный стенд представляет собой Автономную лабораторию, оснащенную датчиками турбулентных пульсаций давления.

Далее мы представим компоненты Морского стенда:

- Всплывающее устройство с регулируемой положительной плавучестью и аппаратурой для измерения гидродинамических шумов;
- Эстакада (пирс) и береговые лебедки
- Эллинг для хранения и сборки всплывающего устройства; Мастерская для подготовки комплектующих изделий к всплывающему устройству; Камеральные помещения для установки аппаратуры по обработке полученных результатов; Катер для буксировки Всплывающего устройства к месту заглубления;

Основное внимание в создании Всплывающего устройства было сосредоточено на моделировании интегральных кинематических и динамических характеристик пограничных слоёв на корпусах судов, морских геофизических антенн и на экспериментальном определении характеристик турбулентной составляющей гидродинамических источников помехи.



Рис. 7. Всплывающее устройство

Приведем здесь основные параметры вновь созданного Всплывающего устройства:

Длина (в зависимости от варианта сборки):
6-14 м.

Диаметр цилиндрической части: 0,65 м.

Скорость на участке установившегося движения: 5-25 м/с.

Режим течения в пограничном слое всплывающего стенда практически на всей его длине является турбулентным, с градиентом среднего давления равным нулю.

Всплывающее устройство в погруженном состоянии имеет избыточную архимедову плавучесть и по этой причине способно самостоятельно всплывать из глубоководных частей морской акватории,
куда оно предварительно доставляется с помощью специальных заглубляющих приспособлений

Были созданы и испытаны уникальные образцы всплывающего устройства, способные эффективно работать в море при всплытии с глубин до 200 м и скоростях до 25 м/с.

Создан морской стенд для экспериментальных исследований гидродинамических шумов обтекания, возникающих на поверхности тела, движущегося в воде.

Исследования турбулентных пульсаций давления актуальны в связи с проблемой шумов обтекания скоростных транспортных средств и снижения уровней турбулентных помех работе корабельных гидроакустических систем. Работы на Всплывающем устройстве перспективны в настоящее время в связи с исследованием источников гидродинамических помех работе гидроакустических средств.

Применение Всплывающих устройств дает возможность проводить сложный акустико-гидродинамический эксперимент в турбулентном пограничном слое при высоких числах Рейнольдса (до значений 10^8) в автономных условиях, без вмешательства оператора, практически не искаженный посторонними помехами. Старт всплывающего устройства, включение и выключение регистрирующего модуля, коммутация тех или иных малогабаритных датчиков осуществляется системой автоматических реле, действующих по программе, заданной экспериментатором.

Рабочий участок всплытия с постоянной скоростью всплытия составляет более 80 м. Максимальная скорость всплытия Всплывающего устройства изменялась от 5 до 25 м/с. Времени установившегося движения с заданной глубины достаточно для надежного анализа турбулентных пульсаций давления в диапазоне частот 0,2 – 50 Кгц. Посторонние шумы, мешающие исследованию турбулентных пульсаций давления, отсутствуют, поскольку движение установки создается не механизмами, а потенциальным полем гидростатического давления.

Всплывающее устройство полностью лишено каких-либо механизмов для его перемещения в пространстве. Высокая скорость движения Всплывающего устройства относительно воды достигается исключительно за счет избыточной силы плавучести, действующей на устройство при его всплытии с большой глубины. Внешне Всплывающее устройство выглядит как удлиненное тело вращения с обтекаемой носовой частью и кольцевым стабилизатором в его кормовой части. Фактически Всплывающее устройство представляет собой автономную

лабораторию, оснащенную датчиками пульсаций давления, регистрирующей аппаратурой и системой автоматического управления процессом измерения. Для проведения исследований создана береговая эстакада, выполнена наладка тросовой дороги, обеспечивающей заглублиение Всплывающего устройства на заданную глубину.

Выполнены морские постановки с якорями, оснащёнными донными блоками.

- Подробнее остановимся на проведенной модернизации береговой инфраструктуры и тросовой дороги. Модернизация состояла в установке на пирсе опорной ферменной конструкции с направляющими канифас-блоками, обеспечивающей вход троса в воду с наиболее удаленной от берега точки пирса, где глубина моря составляет ~ 12 м. Это важно, т.к. исключает замывание троса гравием.

Рис. 8. Береговая эстакада, оборудованная грузоподъёмным средством - тельфером грузоподъёмностью 3 тонны



Рис. 9. Всплывающее устройство в эллинге



На следующих слайдах показаны перемещение всплывающего устройства на береговую эстакаду (Рис.10) и измерительный отсек Всплывающего устройства (Рис.11) с размещенными датчиками турбулентных давлений (рис. 12). В качестве чувствительных элементов - датчиков турбулентных пульсаций давления на всплывающем устройстве были использованы пьезокерамические датчики - преобразователи давления. Диаметр чувствительной поверхности преобразователя $d = 16\text{мм}$. На рис.11 и 12 Всплывающее устройство установлено на пирсе и показано начало буксировки к месту погружения.

Рис. 10.
Транспортировка
Всплывающего
Устройства на
береговую
Эстакаду



- В состав всплывающего устройства в его современном виде входит измерительная секция с установленными на ней преобразователями давления с чувствительной поверхностью разного диаметра, а также состыкованная с ней секция с регистрирующей аппаратурой. Сигнальные кабели преобразователей давления выводятся в аппаратный отсек через герметичные переборки измерительной секции.

Измерительный отсек

- В секции с регистрирующей аппаратурой всплывающего устройства на панели размещаются многоканальная (16 каналов) портативная регистрирующая аппаратура, блок питания и управления регистрацией, малогабаритный аккумулятор. На отдельной панели установлены гидростаты управления, соединенные трубкой высокого давления с забортным пространством (Рис. 12). Данные гидростаты формируют сигналы управления регистрацией в зависимости от глубины.



Рис. 11. Измерительный отсек с датчиками турбулентных пульсаций давления.



Рис. 12. Измерительная секция



Рис. 13. Береговая эстакада

Рис.14. Береговая эстакада – пирс с установленным на нем всплывающим устройством





Рис.15. Старт погружения Всплывающего Устройства для буксировки.

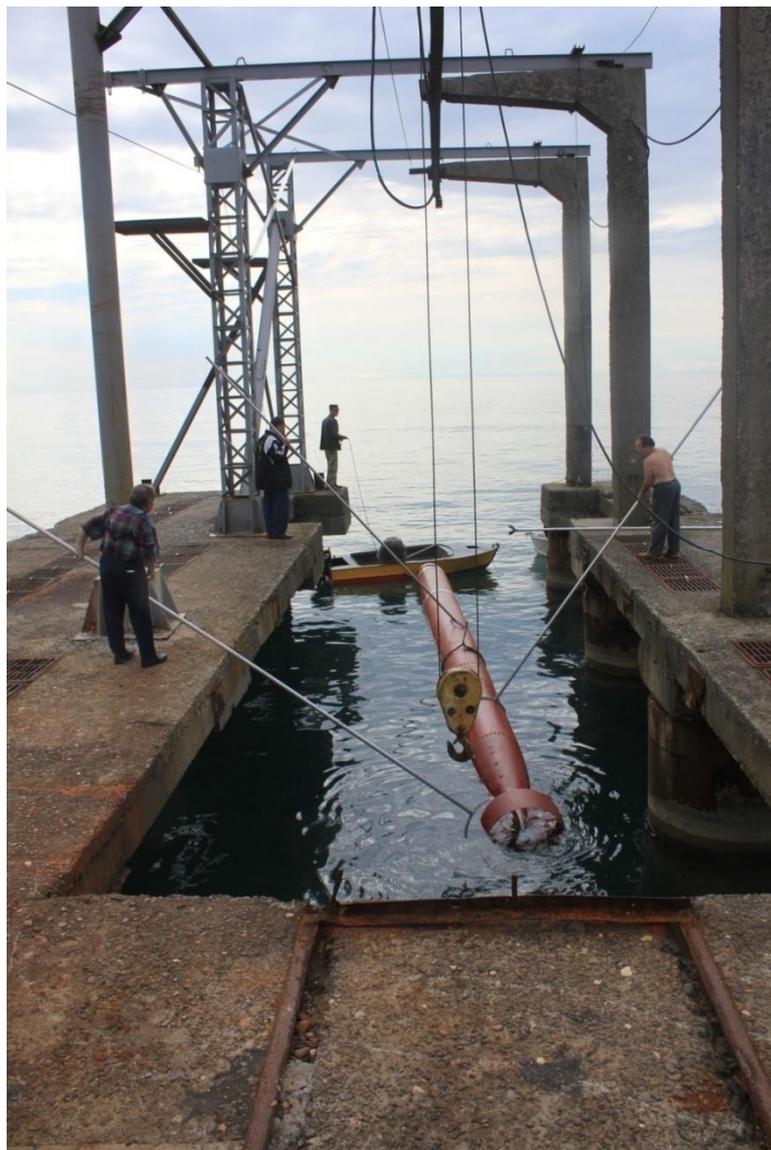


Рис.18.Береговая эстакада: смонтирована опорная конструкция для погружения Всплывающего устройства в море.

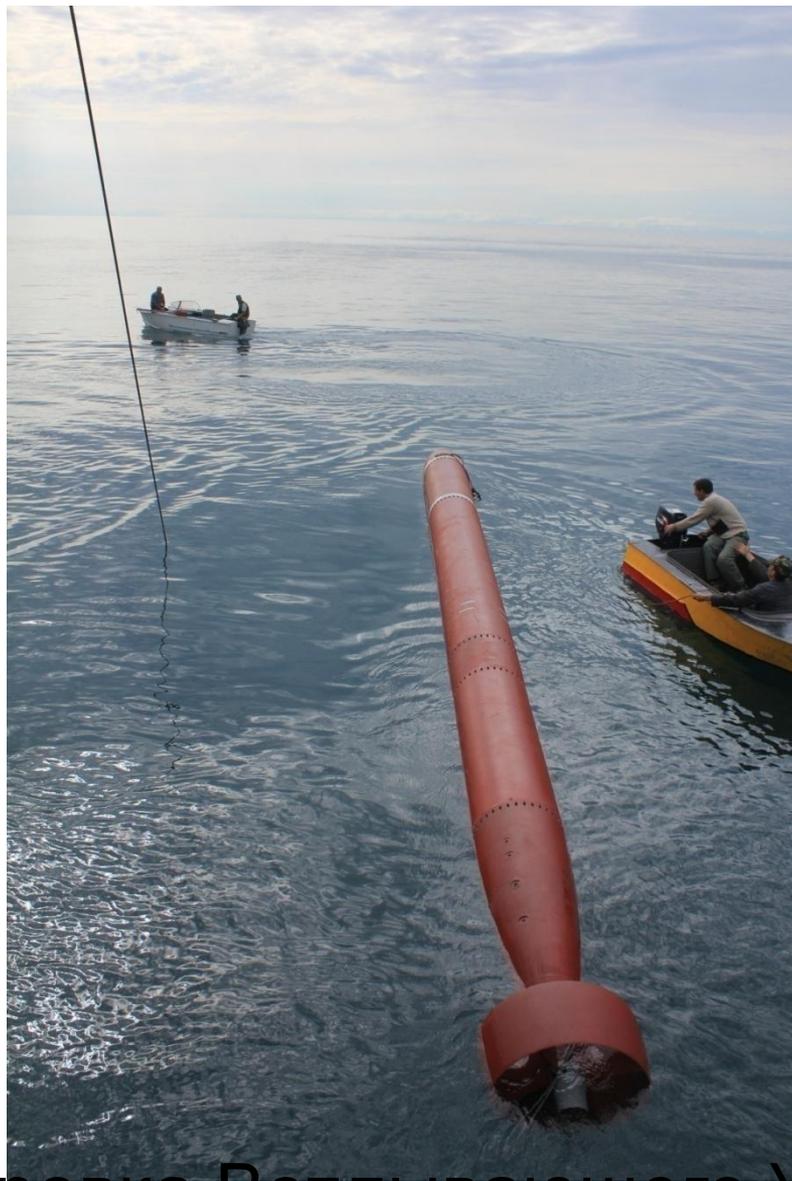


Рис.19.Буксировка Всплывающего Устройства от эстакады к месту заглубления



Рис.20. Катер для буксировки Всплывающего устройства

Рис. 21. Начало выхода Всплывающего Устройства из моря





Рис.22.Всплывающее устройство - над уровнем моря



Рис.23. Всплывающее Устройство закреплено буксировочным катером.



Рис.24. Буксировка Всплывающего устройства к пирсу



Рис.25. Подъем Всплывающего устройства на берег



Рис.26. Завершение испытаний: Всплывающее Устройство доставлено в эллинг

На рис.27 представлены результаты экспериментальных измерений спектров мощности турбулентных пульсаций давления в малошумной аэродинамической трубе ЦНИИ им. А.Н. Крылова, выполненных для оценки способности измерительного тракта Всплывающего устройства адекватно регистрировать турбулентные пульсации давления. Малошумная аэродинамическая труба ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, представляющая собой аэродинамическую трубу разомкнутого типа с закрытым рабочим участком, имеет низкий уровень собственного шума и малую степень турбулентности свободного потока.

На стенке рабочего участка в непосредственной близости друг от друга вдоль направления однородности потока устанавливались преобразователи пульсаций давления с диаметром 16мм измерительного тракта Всплывающего устройства и миниатюрные преобразователи измерительной системы Аэродинамической трубы с диаметром чувствительной поверхности 1,3мм. Чувствительная поверхность преобразователей выставлялась заподлицо с внутренней (со стороны потока) поверхности стенки рабочего участка аэродинамической трубы.

Мощность рассматриваемых турбулентных пульсаций, численно равная их дисперсии σ^2 , есть сумма мощностей отдельных гармонических составляющих этих пульсаций. На этом основании частотный спектр $P(\omega)$ называют спектром мощности турбулентных пульсаций.

Строгое доказательство того, что Фурье-преобразование корреляции стационарного процесса представляет собой частотное распределение мощности этого процесса, содержит специальная теорема, доказанная Хинчиным.

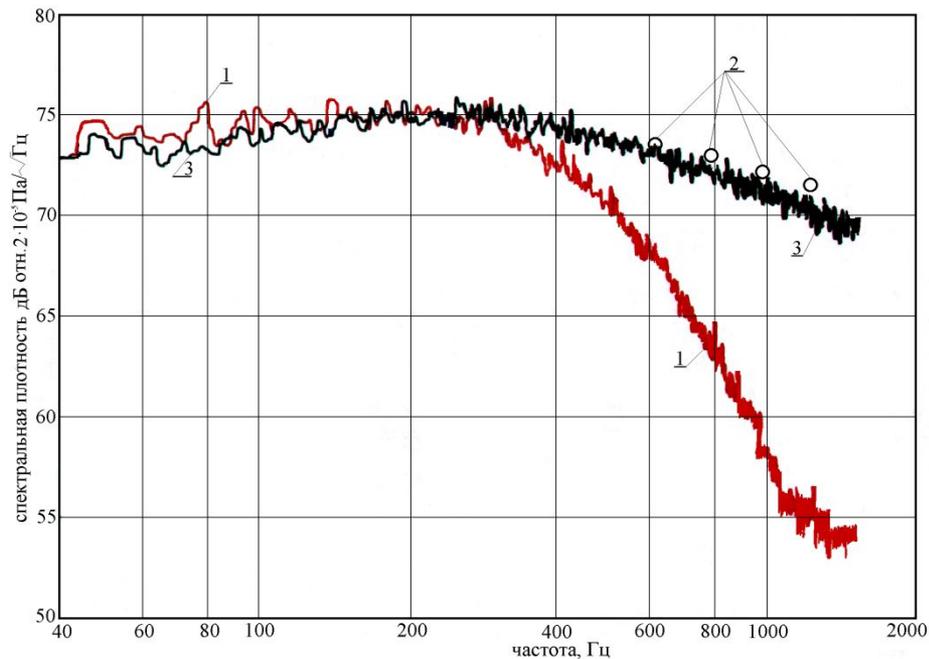


Рис. 27. Спектры мощности турбулентных пульсаций давления, измеренные в малозумной аэродинамической трубе.

На Рис. 27 показаны кривые 1 – данные измерительного канала Всплывающего устройства (диаметр чувствительной поверхности 16 мм); кривая 2 - результат корректировки низкой разрешающей способностью преобразователей к высокочастотным мелкомасштабным турбулентным пульсациям давления; кривая 3 – данные измерительной системы аэродинамической трубы с датчиками пульсаций давления диаметром чувствительной поверхности 1,3мм.

Верхняя граница частотного диапазона спектра 1250 Гц, зарегистрированного измерительным каналом Всплывающего устройства, определяется низкой разрешающей способностью преобразователей с диаметром 16мм к высокочастотным мелкомасштабным турбулентным пульсациям давления.

Этот эффект обусловлен осреднением мелкомасштабных компонент турбулентных пульсаций по площади чувствительной поверхности преобразователя.

На рис. 27 видно, что после введения поправки на размер преобразователей достигается хорошее совпадение уровней спектральной плотности турбулентных пульсаций давления, измеренных обоими трактами. Однако, необходимо отметить, что к звуковому давлению в воде высокая разрешающая способность этих преобразователей сохраняется до частот, превышающих 40 КГц. Рассмотренный эффект иллюстрируют результаты эксперимента на всплывающем устройстве, представленные на рис. 28.

- После создания модернизированных глубоководного стенда и всплывающего устройства было выполнено экспериментальное исследование спектров мощности и взаимных спектров турбулентных пульсаций давления. Проведено большое количество измерений спектров мощности и взаимных спектров турбулентных давлений точечными преобразователями диаметром 1,3мм, и уровней сигналов, воспринимаемых протяженными преобразователями диаметром 20 мм на скоростях движения от 8 до 22 м/сек.

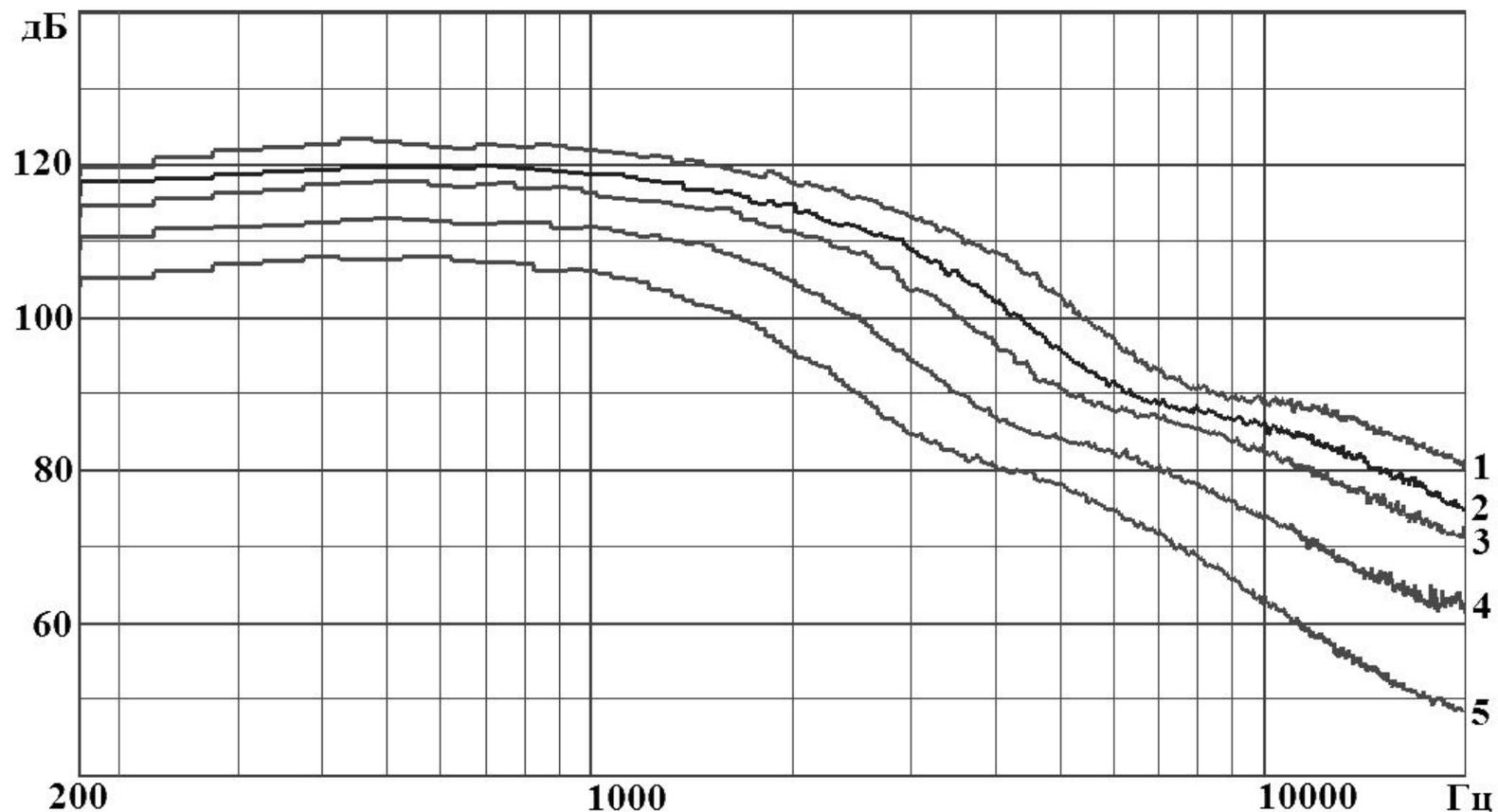


Рис. 28.Спектры мощности турбулентных пульсаций давления на всплывающем устройстве

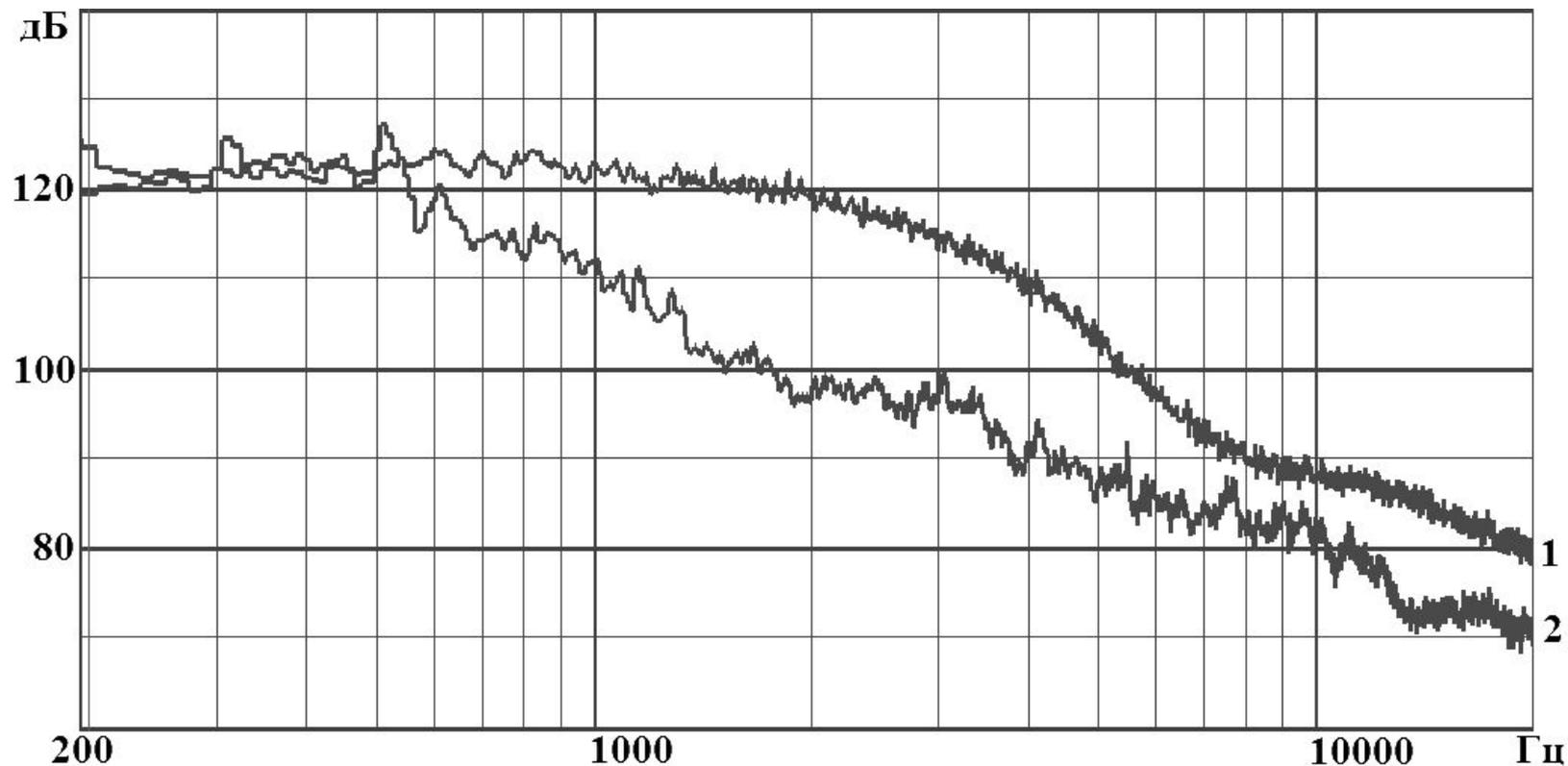


Рис. 29. Спектры турбулентных давлений: 1- датчик 1,3 мм; 2- датчик диаметром 20 мм.

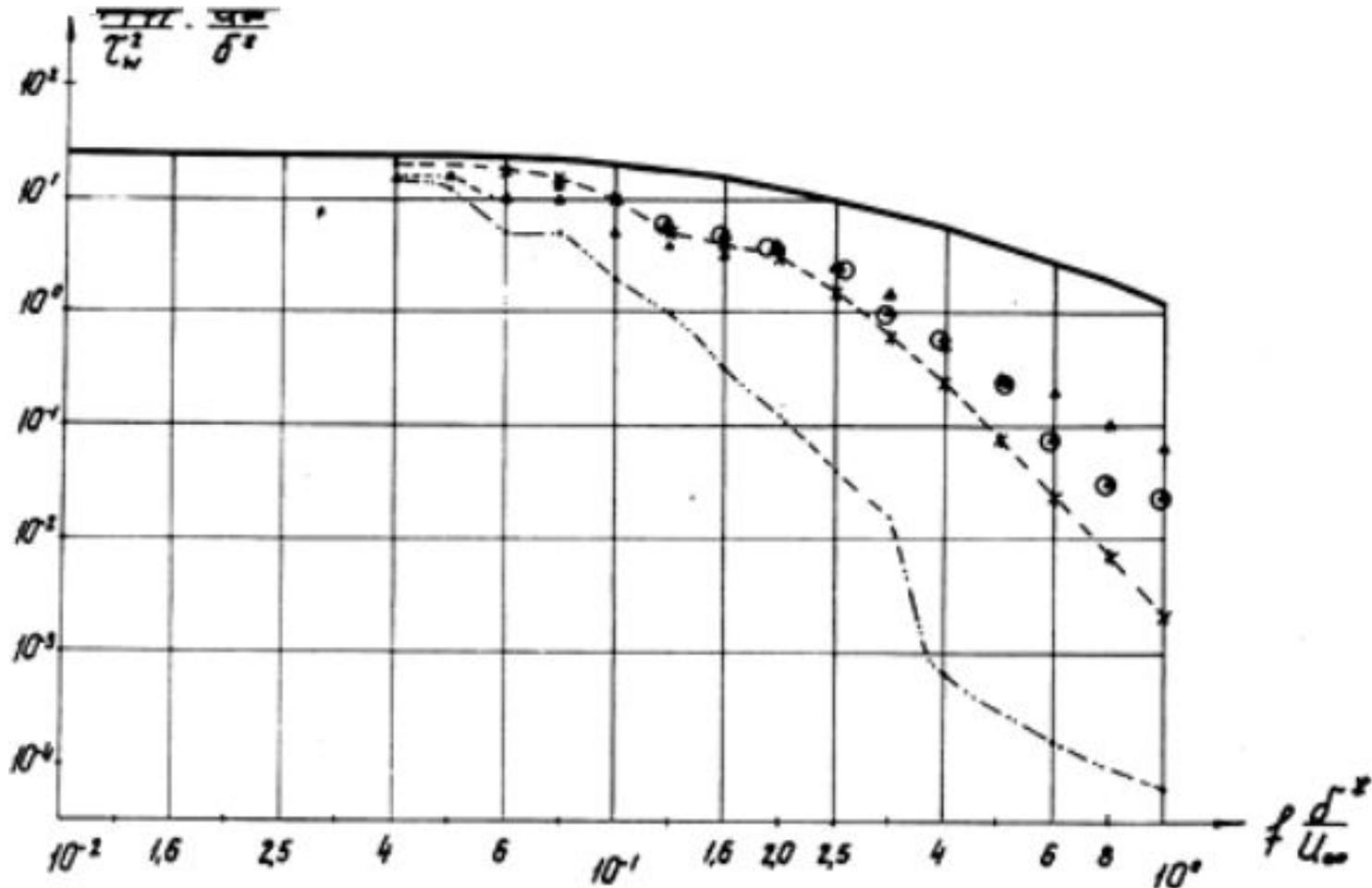
- Характерный вид спектров мощности турбулентных давлений при обтекании морской автономной лаборатории, измеренных преобразователями $\varnothing 1,3$, в диапазоне скоростей от до 22 м/сек и в диапазоне частот 0,2-20 кГц, приведен на рисунке 28. На рисунке 29 приведены для сравнения спектры мощности, измеренные на скорости 22 м/сек в диапазоне частот 0,2-20 кГц преобразователями $\varnothing 1,3$ мм и $\varnothing 20$ мм. Аналогичный вид имеют спектры, измеренные в диапазоне 0,2-80 кГц.

- Особенностью всех измеренных спектров турбулентных пульсаций давления является обнаруженный в экспериментах перегиб спада спектра в районе частот 8-10 кГц и, соответственно, приполнение высокочастотной области спектра вплоть до частот 80 кГц. Анализ экспериментальных данных позволил объяснить обнаруженные особенности спектра. Дело в том, что в приемных элементах происходит преобразование турбулентных пульсаций давления, действующих на их чувствительную поверхность, в электрические сигналы.

- При регистрации турбулентных пульсаций выходные сигналы измерительных преобразователей не будут искажаться только в том случае, когда чувствительная поверхность преобразователя - гидроакустического элемента будет иметь бесконечно малую величину. Это категорическое утверждение можно заменить более приемлемым в практическом плане, а именно: размеры чувствительной поверхности приемного элемента должны быть много меньше самых мелкомасштабных компонент поля турбулентных давлений.

- Если это условие не выполняется, то при экспериментальном исследовании поля турбулентных давлений будут неизбежно возникать искажения этого поля, и нужно уметь корректировать возникающие искажения. Корректировочная функция спектра мощности связывает значения измеренного (искаженного) спектра и истинного спектра. Конкретные выражения можно получить, если задаться той или иной моделью взаимного по пространству спектра турбулентных давлений. Эти результаты известны как исследование разрешающей способности преобразователя турбулентных пульсаций.

Рис.30. Нормированный частотный спектр гидродинамических шумов обтекания



Нормированные значения спектральных уровней турбулентной составляющей гидродинамических источников помех (турбулентных пульсаций давления), действующих со стороны пограничного слоя на приемную поверхность гидроакустической антенны, измерены круглыми и прямоугольными датчиками с диаметром от 3 мм до 20 мм (круглые светлые точки на рис. 21), установленными в носовой части всплывающего устройства.

После введения поправки на разрешающую способность датчиков турбулентных пульсаций, учитывающую влияние чувствительной поверхности преобразователей, достигается совпадение уровней спектральной плотности турбулентных пульсаций давления. Здесь же для сравнения с результатами измерения спектров пульсаций давления на плоской пластине в виде сплошной кривой показан эталонный спектр, впервые полученный Виллмартом на плоской пластине.

Корректировочная функция спектра мощности

$$\chi(\omega) = P_m(\omega) / P(\omega)$$

Здесь истинный спектр - $P(\omega)$ и

измеренный (искаженный) спектр - $P_m(\omega)$

Корректировочная функция определяется:

$$\chi(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \Theta(\varepsilon) \gamma_{re}(\varepsilon, \omega) d(\varepsilon).$$

В выражение для корректировочной функции входит $\gamma_{re}(\varepsilon, \omega)$ - вещественная часть безразмерного взаимного спектра пульсаций давления;

$\Theta(\varepsilon)$ - нормированная функция влияния.

Знание корректировочной функции $\chi(\omega)$ позволяет восстановить истинный сигнал с помощью простой операции

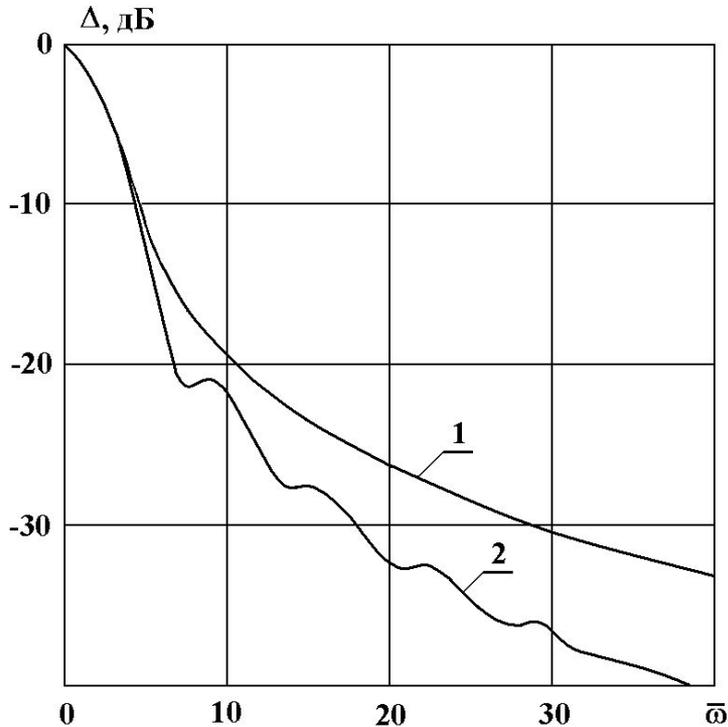
$$P(\omega) = P_m(\omega) / \chi(\omega)$$

Нормированная функция влияния круглых приемных преобразователей поршневого типа с равномерным распределением чувствительности по поверхности преобразователя описывается зависимостью

$$\bar{\Theta}(\varepsilon) = \begin{cases} \frac{1}{\pi r_0^2} \cdot \frac{2}{\pi} \left[\arccos \frac{\varepsilon}{2r_0} - \frac{\varepsilon}{2r_0} \sqrt{1 - \frac{\varepsilon}{2r_0}} \right] & \text{при } \varepsilon \leq 2r_0 \\ 0 & \text{при } \varepsilon > 2r_0. \end{cases}$$

В выражении для функции влияния входит

$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_3^2}$ - модуль вектора смещения между коррелируемыми точками на поверхности преобразователя давления. Нормированная функция влияния показана на рисунке



- Из приведенных формул следует, что для того чтобы откорректировать **спектр** $P_m(\omega)$ турбулентных пульсаций, искаженный при измерениях, нам нужно знать $\gamma(\varepsilon, \omega)$ **взаимный спектр** этих давлений.

То есть об измеряемом поле турбулентных пульсаций нужно заранее знать больше, чем мы хотим в нем измерить.

В этом состоит основная принципиальная трудность построения корректных корректировочных функций.

1. Власов В.Е, Гиневский А.С, Ефимцов Б.М. и др. Основные проблемы аэроакустики // Труды ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского. Вып. 2614. - М.: ЦАГИ, 1996.
2. Blake W.K. Mechanics of flow-induced sound and vibration, V. I-II. Academic Pres. New York, 1986.
3. Смольяков А. В. Шум турбулентных потоков. СПб. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2005.
4. Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р. Турбулентные пристеночные пульсации давления. М.: Научный мир, 2008.
5. Кудашев Е.Б.. Экспериментальные исследования шумов обтекания на всплывающем устройстве // Акустич. журнал, 2005. Т. 51. № 4. С. 488 – 499.

Выводы

1. В такой постановке и в таком объеме экспериментальные измерения гидродинамических шумов обтекания (турбулентных пульсаций давления и вибраций) при высоких числах Рейнольдса были проведены впервые в мировой практике.
2. Экспериментальные исследования турбулентности на всплывающем устройстве кардинально расширили возможности исследования гидродинамических шумов обтекания.
3. Огромное количество задач гидродинамической акустики еще ждет своего решения и предстоит развитие метода Всплывающих устройств для диагностики морской среды, исследования гидрофизических процессов.