

Министерство образования Российской Федерации
САНКТ - ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Грязин Дмитрий Геннадиевич

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ
ВОЛНОМЕРНЫМИ БУЯМИ. ТЕОРИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Специальность 05.11.01 - Приборы и методы измерений по видам измерений
(механических величин)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени доктора
технических наук

Санкт – Петербург

2002

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном институте точной механики и оптики (техническом университете) и Центральном научно - исследовательском институте им. акад. А.Н.Крылова

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Л.П.Несенюк

доктор технических наук, профессор В.Д.Мазин

доктор технических наук

старший научный сотрудник И.С.Ковчин

Ведущее предприятие: Центральный научно - исследовательский навигационно - гидрографический институт МО РФ

Защита состоится 11 апреля 2002 г. в «14» часов. На заседании диссертационного совета Д 212.229.10 в Санкт - Петербургском государственном техническом университете по адресу 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29 корпус 9, ауд.535

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Санкт - Петербургского государственного технического университета

Автореферат разослан 11 марта 2002г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Измерение морского волнения является важной задачей для всех отраслей техники, связанных с морем. Приборы для измерения морского волнения используются в гидростроительстве, океанологии, морской геологии, судостроении, мореплавании, военно-морском флоте. Особое место среди указанного класса приборов занимают волномерные буй, получившие широкое распространение в мировой практике волновых измерений. Принцип работы этих приборов основан на том, что буй, свободно плавающий на поверхности волны, отслеживает её профиль, а датчики для измерения различных механических величин, установленные на его борту или связанные с ним измеряют параметры его движения.

Измерение ординат морского волнения с помощью волномерных буй производится на основе косвенных методов. Это позволяет разработчикам приборов производить аттестацию их метрологических характеристик лишь по отдельным параметрам. Как правило, аттестации подлежит лишь погрешность датчиков измерения механических величин, при этом за рамками рассмотрения оказывается погрешность первичного измерительного преобразователя, которым является сам буй, а также методические составляющие погрешности. Эта тенденция проектирования волнографов прослеживается при детальном анализе как отечественных, так и зарубежных приборов. Ситуация осложняется тем, что датчики для измерения механических величин, используемые в буйках, имеют дополнительные погрешности, обусловленные специфическими режимами их функционирования, которые не всегда учитываются.

В результате создавшейся как в России, так и в других странах ситуации разработчики волномерных буй декларируют необоснованно завышенную точность приборов. Практически отсутствуют методы, позволяющие проектировать волномерные буй с заданными высокими метрологическими характеристиками.

Таким образом, актуальность работы определяется необходимостью создания волномерных буй с заданными высокими метрологическими характеристиками, позволяющих получить достоверную информацию о волнении для решения различных частных и комплексных задач во многих отраслях техники, на основе разработанной прикладной теории волномерных буй.

Цель диссертационной работы

Диссертация посвящена решению проблемы создания прикладной теории волномерных буев, позволяющей повысить метрологические характеристики проектируемых приборов, предназначенных для решения крупных задач промышленного и оборонного значения.

Решаемая проблема имеет важное народно - хозяйственное значение.

Задачи диссертационной работы

1. Разработка математической модели нелинейных колебаний первичного преобразователя произвольной формы волномерного бую.
2. Разработка методов расчёта элементов и конструкции прибора, а также создание методологии проектирования волномерных буев, предназначенных для решения задач различных отраслей техники.
3. Создание новых методов измерений, расширяющих возможности использования волномерных буев.
4. Разработка технических решений, позволяющих уменьшить погрешности волнографов и увеличить частотный диапазон их работы.
5. Исследование и выбор режимов функционирования промежуточных преобразователей, с наименьшими погрешностями.
6. Разработка алгоритмических методов повышения точности измерений волнения волномерными буюми.

Объекты исследования

-Волномерные бую, предназначенные для работы в различных отраслях техники для измерения волнения большой и малой интенсивности в условиях открытого моря и прибрежной зоны.

- Датчики для измерения скорости потока, углового положения и давления, в режимах их функционирования при измерении параметров волнения.

Методы исследований

При решении поставленных задач использованы методы математического и экспериментального моделирования, натурный эксперимент, методы теоретической механики, теории колебаний, экспериментальной гидродинамики, теории систем автоматического управления.

Научная новизна работы

1. Разработана обобщённая математическая модель функционирования первичного преобразователя произвольной формы волномерного бую.
2. Разработаны инженерные методы расчёта конструктивных элементов и

погрешностей волномерных буев различного назначения, позволяющие проектировать приборы с заданными метрологическими характеристиками.

3. Получены математические модели колебаний цилиндрических первичных преобразователей волномерных буев с различными конструктивными особенностями, позволяющие оценить влияние этих особенностей на погрешности измерений.

4. Предложен метод измерений на мелководье с помощью буя с гидростатическим датчиком давления, который существенно расширяет возможности использования этого прибора.

5. Разработаны методы расчёта; обосновано применение и определены ограничения использования промежуточных преобразователей механических величин, в буюх.

Практическая ценность результатов диссертационной работы

1. Разработана совокупность взаимосвязанных моделей и методов, составляющих прикладную теорию волномерных буев, позволяющих рассчитать и спроектировать приборы различного назначения с улучшенными метрологическими характеристиками.

2. Теоретические положения доведены до практического использования в расчётах, их достоверность подтверждена метрологическими характеристиками созданных приборов.

3. Метод измерений на мелководье с помощью буя с гидростатическим датчиком давления позволил не только увеличить область применения вновь проектируемых приборов, но и расширить возможности использования существующих.

4. Расчётные соотношения для определения важнейших характеристик буев применимы для проектирования приборов иного назначения. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, предложенные в работе, позволяют существенно сократить сроки разработки этих приборов.

5. Результаты анализа влияния различных конструктивных элементов буев на точность измерений волнения, позволили выбрать оптимальные технические решения при проектировании конкретных приборов и уменьшить их методические погрешности.

6. Предложенные алгоритмы расчёта характеристик волн использованы в двух созданных средствах измерений.

7. Результаты исследований режимов функционирования чувствительных преобразователей механических величин, используемых датчиков волномерных буев, позволяют уменьшить инструментальную погрешность приборов.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций

Содержащиеся в диссертации научные положения, выводы и рекомендации основаны на удовлетворительном совпадении аналитических и численных расчётов с результатами экспериментов, на использовании современных методов и средств проведения исследований.

Теоретические положения и результаты экспериментов многократно уточнялись и проверялись. При проверке использовались методы моделирования, лабораторных испытаний и натурных исследований.

Реализация в промышленности

1. Предложенные методы расчёта приборов использованы при выполнении НИР по темам, указанным в акте об использовании результатов работы в ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова.

2. Математические модели качки буя и методики расчёта, предложенные в диссертации, использованы при выполнении НИР и ОКР в КБ «Связьморпроект», а также в работах Научно - исследовательского центра радиоэлектронного вооружения в/ч 30895 (названия проблем, тем НИР и ОКР указано в соответствующих актах об использовании результатов работы)

3. Результаты математического моделирования поведения буя на волнении и влияния на характеристики его качки конструктивных элементов использованы при выполнении ОКР в ЦНИИ «Гидроприбор».

4. На основе предложенной теории в ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова спроектированы волномерные буи «Дельфин», «Нептун» и «Система измерения параметров волнения», предназначенных для натурных испытаний судов.

5. Разработанный метод расчёта погрешностей приборов позволил впервые в судостроительной промышленности метрологически аттестовать не только волномерные буи, но и методику выполнения измерений волнения.

6. Рекомендации, сделанные в работе позволили скорректировать методики проведения и обработки результатов натурных экспериментов при проведении НИР в НИИ ФООЛИОС ВНЦ «ГОИ им. С.И.Вавилова» (название тем указано в акте об использовании результатов работы)

7. С помощью волномерного буя «Дельфин» испытано большое число судов и кораблей, что принесло значительный научный, технический и экономический эффект, отмеченный в актах об использовании результатов работы, представленных ГУП ПО «Севмашпредприятие», ГУЛ «Адмиралтейские верфи», ГУП ЦМКБ «Алмаз», ГУП ЦКБ «Балтсудопроект», Волжской государственной академии водного транспорта.

Личный вклад автора.

Основные результаты, приведённые в диссертационной работе, получены автором лично, волномерные буи «Дельфин», «Нептун», «Система измерения параметров волнения» созданы под руководством автора и при его непосредственном техническом и творческом участии. Программная реализация предложенных алгоритмов и методов выполнена при непосредственном участии автора и под его научным руководством.

Апробация работы.

Диссертация и отдельные её разделы обсуждались и получили положительную оценку на следующих конференциях и семинарах:

- Второй международной конференции «Приборостроение в экологии и безопасности человека» С-Пб 27 -28 октября 1998 г.
- Международном научном семинаре «Прикладные вопросы точности механизмов приборов и машин» ИТМО С-Пб 1998 г.
- XXX научно-технической конференции профессорско - преподавательского состава СПбГИТМО(ТУ) С-Пб 25 - 28 января 1999 г.
- Всероссийской конференции «Методологические проблемы разработки и внедрения методик выполнения измерений» С-Пб ГНЦ РФ ВНИИМ им. Д.И.Менделеева 31 мая — 01 июня 1999 г.
- Международной конференции «Нелинейные науки на рубеже тысячелетий» С-Пб 22-24 июня 1999 г.
- Международной молодёжной научной конференции XXV Гагаринские чтения. Москва МАТИ им. К.Э.Циолковского 6-10 апреля 1999 г.
- Международной научно-технической конференции «Конверсия, приборостроение, медицинская техника» г.Владимир 6-8 октября 1999 г.
- Юбилейной научно - технической конференции профессорско - преподавательского состава СПбГИТМО(ТУ) , посвящённой 100 летию Университета С-Пб 29 - 31 марта 2000 г.
- Международной научной конференции «Проблемы пространства, времени, движения» С-Пб 25-29 сентября 2000 г.

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в одной монографии, одном учебном пособии, 35 статьях и тезисах докладов.

Структура и объём работы

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 195 наименований и приложений. Общий объём работы 303 стр. машинописного текста. Диссертация содержит 101 рисунок, 14 таблиц, приложения занимают 14 стр.

На защиту выносятся

1. Создание и обоснование прикладной теории, позволяющей моделировать режимы функционирования класса волномерных буев.
2. Обобщённая математическая модель нелинейных колебаний первичного чувствительного преобразователя произвольной формы волномерного буя.
3. Метод измерения волнения на мелководье с помощью буя с гидростатическим датчиком давления.
4. Методы расчёта погрешностей и конструкции цилиндрических волномерных буев различного назначения.
5. Результаты теоретических и экспериментальных исследований динамических характеристик датчиков механических величин в режимах их функционирования в волномерных буях.
6. Структурные схемы и алгоритмы работы приборов для измерения малого и интенсивного волнения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы и на основе анализа современного состояния вопроса сформулирована цель диссертационной работы, научная новизна и практическая ценность полученных результатов, представлены основные положения работы, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена математическому описанию морского волнения и его представлению в качестве объекта измерения. Приводятся положения спектрального и статистического методов описания морской поверхности, указывается их взаимосвязь, отмечаются достоинства и недостатки указанных методов. Показано, что исчерпывающей информацией для определения двухмерного энергетического спектра морской поверхности являются результаты измерений двух углов волнового склона и ординат возвышения водной поверхности, сделанных в географических координатах. В тоже время для определения одномерного спектра трёхмерного волнения, а также всех его статистических

характеристик достаточно выполнить измерения лишь ординат возвышений волн.

Предлагается новая классификация существующих методов и средств измерения морского волнения, на основе которой выполнен краткий обзор существующих приборов.

Указано, что основная особенность волномерных буюв состоит в том, что буйковая часть прибора является первичным преобразователем ординат возвышений волн и углов волнового склона в вертикальные перемещения и угловое положение буюа, а датчики для измерения перемещений и углового положения — промежуточными измерительными преобразователями. Таким образом, динамические характеристики угловой и вертикальной качки буюа будут существенно влиять на инструментальную погрешность измерений.

Анализируются требования, предъявляемые к приборам, используемым для решения задач в различных отраслях техники. Показано, что они достаточно противоречивы. Противоречия заключаются в том, что создать измерительное средство, выполняющее измерения высот и периодов волн в широком диапазоне и с малой погрешностью, предназначенное для работы как в открытом море, так и в условиях мелководья практически невозможно. Для выполнения таких измерений следует использовать несколько специализированных буюев. Разработка указанных измерительных средств осложняется комплексированием аппаратуры на буюах. В связи с этими причинами в настоящее время разработан ряд волномерных буюев, работающих в ограниченном частотном диапазоне, имеющих достаточно сложную форму корпуса и поэтому значительные погрешности измерений, обусловленные их качкой. При этом, кампании -производители этих приборов указывают в документации очевидно завышенные метрологические характеристики. Отмечается, что в связи с этим на первый план выдвигается задача разработки и исследования математической модели нелинейных колебаний буюа произвольной формы, на основе которой возможен расчёт погрешности любого буюа.

Глава вторая посвящена исследованиям динамических характеристик первичных преобразователей волномерных буюев. Одним из основных элементов прикладной теории волномерных буюев (ВБ) является математическая модель пространственного движения их первичного преобразователя, т.е. буюа, при его волновых возмущениях. В связи с необходимостью разработки буюев различных геометрических форм, обусловленной установкой на них, в некоторых случаях, дополнительно датчиков для измерения гидрофизических величин, указанное математическое моделирование производится для буюа произвольной формы.

Результаты этих исследований позволяют минимизировать многочисленные погрешности, обусловленные гидродинамическими характеристиками бую. В этом разделе производится анализ сил, действующих на буй, и предлагается математическая модель для расчёта нелинейных колебаний этих приборов.

Исследование колебаний бую производится с использованием гидродинамической теории качки тел, в которой движение считается потенциальным, вязкое трение и вихреобразование учитывают в форме поправок к силам потенциальной природы только в некоторых специальных случаях, например, при расчёте угловых амплитуд качки в районе резонанса.

Избыточное давление в жидкости при неустановившемся её движении определяется интегралом Лагранжа — Коши, который имеет вид:

$$P - P_0 = \rho g \zeta - \rho \left[\left(\frac{\partial \Phi_s}{\partial \xi} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_s}{\partial \eta} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_s}{\partial \zeta} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где P_0 - атмосферное давление, P - давление жидкости, ρ - плотность жидкости, g - ускорение силы тяжести, Φ_s - потенциал скорости абсолютного движения жидкости, причём $\Phi_s = \Phi_w + \Phi_0 + \Phi_{ид}$, здесь Φ_w - потенциал скорости, обусловленный свободными набегающими волнами, Φ_0 — потенциал скорости, обусловленный присутствием неподвижного бую в жидкости, $\Phi_{ид}$ - потенциал скорости, который возникает от качки бую на тихой воде, определяющий гидродинамические силы сопротивления, присоединённые массы и моменты инерции.

Первый член правой части уравнения (1) определяет гидростатическое давление, второй и третий члены учитывают давление, обусловленное набегающей и дифрагированной волнами. С помощью интеграла Лагранжа-Коши можно определить давление на элементарном участке поверхности погруженной части бую. Для определения силы, действующей на корпус бую, следует проинтегрировать элементарные давления по всей смоченной поверхности.

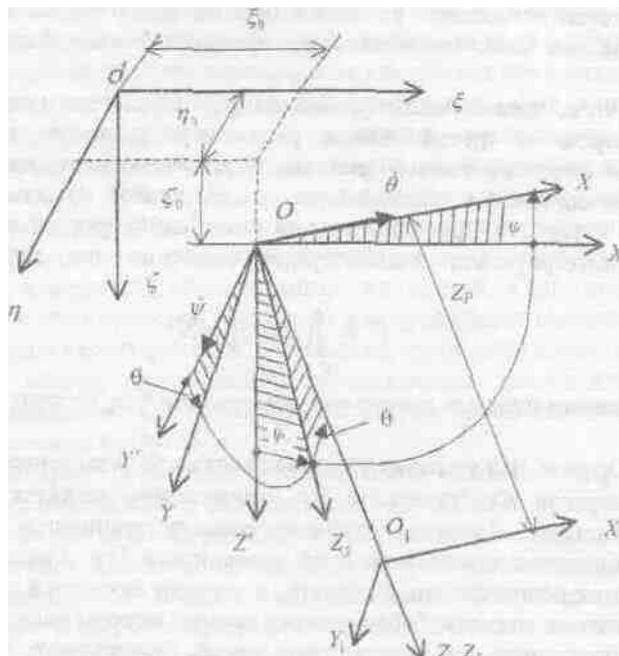
$$F = \int_{S_t} (P - P_0) dS,$$

где S_t - мгновенная площадь смоченной поверхности бую, которая изменяется во времени.

Таким образом, для решения гидромеханической задачи необходимо знать потенциал скорости Φ_s . Задача по его определению сводится к отысканию решения уравнения Лапласа, удовлетворяющего граничным условиям на свободной поверхности жидкости и на поверхности бую. Граничные условия задачи являются нелинейными, а

область, в которой находится решение явным образом зависит от времени. Эффективные прямые методы решения поставленной задачи, пригодные для практических целей, отсутствуют. Существенного упрощения при решении задачи можно достичь, линеаризуя граничные условия. При решении данной задачи учитываются нелинейности, обусловленные переменностью смоченной поверхности и квадратичным членом интеграла Лагранжа — Коши.

Для определения гидромеханических сил вводится три системы координат рис.1 неподвижная и две подвижных. Неподвижная $O'\xi\eta\zeta$ - характеризует абсолютное движение буя, плоскость $O'\xi\eta$ этой системы совпадает с невозмущённой поверхностью жидкости, ось $O'\eta$ направлена по направлению распространения волн, а ось $O'\zeta$ вертикально вниз. Первая подвижная система координат $OXYZ$, вводится для описания геометрии корпуса буя и жёстко с ним связана. Начало этой системы координат лежит в точке пересечения плоскости ватерлинии равновесия буя и оси симметрии буя. Начало второй подвижной системы координат O_1, X_1, Y_1, Z_1 точка O_1 лежит в центре тяжести буя. Оси подвижных систем координат параллельны друг другу. В начальный момент на тихой воде неподвижная и первая подвижная системы совпадают и оси OX, OY, OZ расположены соответственно вдоль осей $O'\xi, O'\eta, O'\zeta$. Колебания буя под действием внешнего возмущения можно представить через линейные перемещения точки $O(\xi_0, \eta_0, \zeta_0)$ и развороты, относительно вертикальной оси, на Эйлеравы углы θ - бортовой и ψ - килевой качки.



При исследовании уравнений движения, координаты корпуса буга удобно задавать в первой подвижной системе координат, а уравнения движения записывать в неподвижной системе.

Разобьём корпус буга на элементарные отсеки плоскостями параллельными OYZ . Пусть число отсеков будет n , рассмотрим колебания каждого отсека в плоскости сечения.

Таким образом задача расчёта гидродинамических сил сводится к определению двух сил \vec{P}_η и \vec{P}_ζ - проекций главного вектора силы на оси $O\eta$, $O\zeta$ и одного момента M_{X1} — проекции момента на ось OX . Формулы для этих проекций имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_\eta = -\rho g \iint_{S_i} \zeta \cos \widehat{n\eta} dS + \rho \iint_{S_i} \left(\frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_0}{\partial t} + \frac{1}{2} U_w^2 \right) \cos \widehat{n\eta} dS \\ P_\zeta = -\rho g \iint_{S_i} \zeta \cos \widehat{n\zeta} dS + \rho \iint_{S_i} \left(\frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_0}{\partial t} + \frac{1}{2} U_w^2 \right) \cos \widehat{n\zeta} dS \\ M_X = -\rho g \iint_{S_i} \zeta \left[Y \cos \widehat{nZ} - (Z - Z_p) \cos \widehat{nY} \right] dS + \\ + \rho g \iint_{S_i} \zeta \left(\frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_0}{\partial t} + \frac{1}{2} U_w^2 \right) \left[Y \cos \widehat{nZ} - (Z - Z_p) \cos \widehat{nY} \right] dS \end{array} \right.$$

Здесь P_η, P_ζ, M_{X1} можно представить через составляющие, например: $P_\eta = P_\eta^I + P_\eta^{II} + P_\eta^{III} + P_\eta^{IV}$, где P_η^I - характеризует гидростатические силы, P_η^{II} - силы, вызванные свободными набегающими волнами, P_η^{III} - силы, обусловленные возмущениями, вносимыми бугем в жидкость, P_η^{IV} - силы, вызванные квадратичным членом интеграла Лагранжа - Коши.

Линеаризация задачи и предположение о малости возмущений, вносимых смоченной поверхностью буга в движение жидкости позволило разделить силы и их моменты, действующие на буй, на ряд составляющих, а именно: гидростатические, главную часть возмущающих сил, гидродинамическую часть сил, вызванную присутствием буга во взволнованной жидкости и нелинейные силы, обусловленные квадратичным членом.

Отличие предлагаемого подхода от линейного, используемого в гидродинамике заключается в том, что указанные категории сил уже не являются взаимно независимыми т.к. каждая из них есть функция элементов качки. Указанные функции, в свою очередь, определяются всей совокупностью сил и связаны между собой через

мгновенную смоченную поверхность, определяемую только перемещениями буйа и профилем свободных набегающих волн в силу допущения о том, что буй не вносит возмущений в волновое поле.

Таким образом, для расчёта колебаний буйа необходимо в каждый момент времени определить мгновенную смоченную поверхность его корпуса, и указанные составляющие сил и моментов.

Просуммируем по координате X составляющие сил, действующие на элементарные отсеки единичной длины ΔL и получим выражение для суммарных сил и моментов, действующих на буй в целом. Это выражение имеет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\eta} = \Delta L \left(\sum_{j=1}^n P_{\eta j} - \frac{1}{2} (P_{\eta 1} + P_{\eta n}) \right); \\ P_{\zeta} = \Delta L \left(\sum_{j=1}^n P_{\zeta j} - \frac{1}{2} (P_{\zeta 1} + P_{\zeta n}) \right); \\ M_X = \Delta L \left(\sum_{j=1}^n M_{X1j} - \frac{1}{2} (M_{X1} + M_{Xn}) \right); \\ M_Y = \Delta L \left(\sum_{j=1}^n X_j P_{\zeta j} - \frac{1}{2} (X_j P_{\zeta 1} + X_n P_{\zeta n}) \right) \end{array} \right. , \quad (2)$$

здесь n - число элементарных отсеков, на которое разбит корпус; индекс 1 - соответствует первому отсеку, n - последнему.

Расчёт всех гидродинамических сил производился для произвольной формы корпуса буйа. Полученные нелинейные уравнения для сил, обусловленных взаимодействием мгновенной смоченной поверхности буйа и жидкостью, имеют достаточно громоздкий вид и приводятся в соответствующих разделах работы. Использование этих выражений, а также выражения (2) позволяет составить систему из четырёх взаимосвязанных уравнений, описывающих качку буйа. В систему входят уравнения вертикальной, угловой и поперечно - горизонтальной качки.

Из теоретической механики известно, что уравнения движения приобретают наиболее простой вид в случае, когда в качестве осей подвижной системы координат, связанной с телом, принимаются основные оси инерции его массы, тогда уравнения движения буйа произвольной формы будут иметь вид:

$$\begin{cases} m\ddot{\zeta}_g = P_\zeta^I + P_\zeta^{II} + P_\zeta^{III} + P_\zeta^{VI} + P_\zeta^V + P_{ЯВ}; \\ m\ddot{\eta}_g = P_\eta^I + P_\eta^{II} + P_\eta^{III} + P_\eta^{VI} + P_\eta^V + P_{ЯГ}; \\ I_X\ddot{\theta} = M_X^I + M_X^{II} + M_X^{III} + M_X^{IV} + M_X^V + M_{Я}; \\ I_Y\ddot{\psi} = M_Y^I + M_Y^{II} + M_Y^{III} + M_Y^{IV} + M_Y^V. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь m — масса буя, I_{X_1}, I_{Y_2} — моменты инерции массы буя, относительно соответствующих осей

$P_\zeta^I, P_\eta^I, M_{X_1}^I, M_{Y_2}^I$ — гидростатические составляющие сил;
 $P_\zeta^{II}, P_\eta^{II}, M_{X_1}^{II}, M_{Y_2}^{II}$ — главные части возмущающих сил;
 $P_\zeta^{III}, P_\eta^{III}, M_{X_1}^{III}, M_{Y_2}^{III}$ — дифракционные составляющие сил;
 $P_\zeta^{VI}, P_\eta^{VI}, M_{X_1}^{VI}, M_{Y_2}^{VI}$ — инерционно-демпфирующие составляющие сил;
 $P_\zeta^V, M_{X_1}^V$ — составляющие сил, обусловленные квадратичным членом интеграла Лагранжа-Коши

$P_{ЯВ}$ — вертикальная составляющая силы от действия якорной

связи, $P_{ЯГ}$ — горизонтальная составляющая силы от действия якорной связи, $M_{Я} = \frac{P_{ЯГ}}{L_{П}}$ —

момент горизонтальной составляющей силы якорной связи по направлению бега воля. $L_{П}$ — плечо от центра масс буя до точки крепления якорной связи.

Гидродинамические коэффициенты, входящие в выражения для инерционно - демпфирующих сил определяются либо экспериментальным путём, либо используются справочные данные из литературы.

Таким образом, выполненные теоретические исследования позволили перейти к системе из четырёх взаимосвязанных нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка с двенадцатью переменными $\zeta_g, \dot{\zeta}_g, \zeta_n, \dot{\zeta}_n, \eta_g, \dot{\eta}_g, \theta, \dot{\theta}, \psi, \dot{\psi}, \psi$. Их взаимосвязь обусловлена как изменением смоченной поверхности буя, которая, определяется с учётом всех кинематических параметров его движения и профилем набегающих волн, так и гидродинамическими коэффициентами связи.

Необходимо отметить, что в том случае, если мы имеем дело с цилиндрическим буюм, то система четырёх уравнений (3) преобразуется в систему трёх уравнений, путём отбрасывания выражений, учитывающих колебания по оси Y , при этом переменных становится девять.

На основе полученных алгоритмов была разработана программа расчёта на компьютере нелинейной качки буя произвольной формы. Численное решение системы уравнений

производилось методом Рунге - Кутта, при этом на каждом предыдущем шаге определялась величина смоченной, поверхности буя, которая использовалась на последующем шаге вычислений.

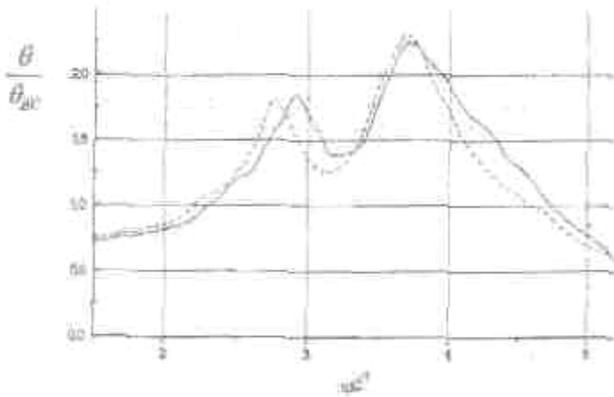


рис.2 Сравнение экспериментально полученной характеристики бортовых колебаний буя $\varnothing 0,34\text{м}$ и массой 27 кг с характеристикой рассчитанной на основе численного решения уравнений. Характеристики даны при крутизне волны 1/40.

-----Экспериментальная характеристика
 _____Расчетная характеристика

Выполненные исследования позволили произвести расчёт бортовых и вертикальных колебаний цилиндрического буя диаметром 0,34 м. и массой 27 кг. Значения присоединённых моментов инерции, присоединённых масс и коэффициентов сопротивления были получены экспериментально. Результаты расчёта зависимости $\frac{\theta}{\theta_{BC}}(\omega)$, где $\theta_{BC}^{\text{вс}}$ -

угол волнового склона представлены на рис.2. На том же рисунке предложена кривая, полученная путём экспериментальных исследований колебаний указанного буя в опытовом бассейне.

Из рисунка видно хорошее совпадение расчетной кривой с экспериментальной.

Предложенная математическая модель позволяет произвести расчёт нелинейной качки буя, для буюв практически любой формы, однако ее использование требует значительных вычислительных ресурсов, кроме того, во многих случаях разрабатываются бую цилиндрической формы, что даёт возможность не рассматривать их килевую качку. Указанные причины обусловили необходимость выполнения расчётов на основе упрощённых выражений. Раскладывая экспоненциальные члены в ряды и пренебрегая членами второго и более порядка малости, а также рядом других членов выражения (3), получим упрощённые уравнения.

Уравнение вертикальной качки буя в абсолютной системе координат может быть записано в форме

$$(m + \lambda_{33})\ddot{\zeta}_g + W_B \dot{\zeta}_g + \rho g S r e^{-K_1 T} \cos \omega t, \quad (4)$$

здесь $W_B = W_{33}$ - коэффициент сопротивления движению {кг/с}; $K_1 = \omega^2 / g$ - волновое число; g - ускорение силы тяжести; T - осадка буя (м); m - масса буя (кг); λ_{33} - присоединённая масса воды при вертикальной качке (кг); ρ - плотность воды (кг/м³); S - площадь ватерлинии буя (м²); ζ_g - мгновенное значение ординат вертикальных перемещений буя (м); r - амплитуда волны (м); ω - круговая частота.

Решение уравнения производится обычным способом. На рис.3 предложено сопоставление результатов расчётов, выполненных на основе двух математических моделей с экспериментальной характеристикой. Из рисунка видно, что характеристика, рассчитанная на основе численного решения уравнений проходит ближе к экспериментальной кривой, по сравнению с кривой, полученной на основе решения линейного уравнения. Это объясняется тем, что линейная модель не учитывает угловые колебания буя. Кроме того, сопоставление кривой, рассчитанной по линейной модели с экспериментальной показывает, что наивысшая частота, при которой экспериментальные характеристики ещё равны 1, соответствует значению теоретической при

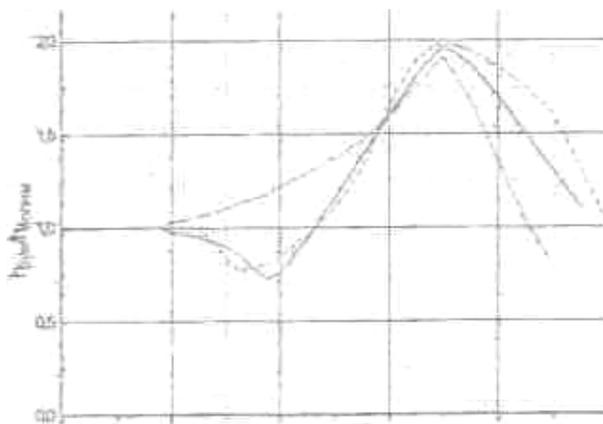


Рис. 3 Сравнение характеристики вертикальной качки буя \varnothing 0,34м массой 27 кг. рассчитанных разными способами с экспериментальной характеристикой. Характеристики даны при крутизне волны 1/40

————— Характеристика, рассчитанная на основе численного решения уравнений.

----- Экспериментально полученная характеристика.

-.-.-.-. Характеристика, рассчитанная на основе решения линейного дифференциального уравнения.

котором $h_{буя}/h_{волны}=1,1$, что объясняется применением в расчётах постоянного значения коэффициента присоединённой массы. Таким образом, при использовании линейной модели необходимо учитывать отмеченные особенности.

Заметим, что обе математические модели применимы при условии наличия данных о присоединённой массе и коэффициенте сопротивления (функции демпфирования колебаний).

Глава третья посвящена разработке инженерных методов расчёта первичных преобразователей приборов. Для использования в расчётах предложены математические модели различных видов колебаний буя с гидростатическим датчиком давления. Показано, что этот прибор имеет наиболее сложную конструкцию.

Погрешности, обусловленные гидродинамическими свойствами остальных приборов, могут быть рассчитаны путём пренебрежения составляющими, обусловленными подвесными элементами этого прибора. В этом разделе работы также предлагается новый метод измерения, позволяющий применять волномерный буй с гидростатическим датчиком давления для измерений на мелководье, что позволяет существенно расширить область его использования.

В рассматриваемых устройствах датчик давления 1 (рис.4) закреплён на нижнем конце кабель-троса 2, связывающего его с поверхностным поплавком 3. Таким образом, определение высот поверхностных волн этими волнографами основано на изменении гидростатического давления, вызванного только перемещением датчика вслед за поплавком, отслеживающим колебания поверхности волны. Амплитуда изменения гидростатического давления P_z на глубине Z равна (рис. 5) $P_z = P_2 - P_1$. Размах изменения гидростатического давления связан с высотой измеряемой волны соотношением $2P_z = \rho g h_n$, где h_n - высота волны, зарегистрированная прибором. Это выражение определяет метод измерения волнения с помощью волномерного буй с гидростатическим датчиком

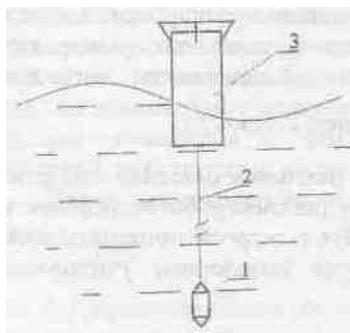


Рис.4 Волномерный буй с гидростатическим датчиком давления

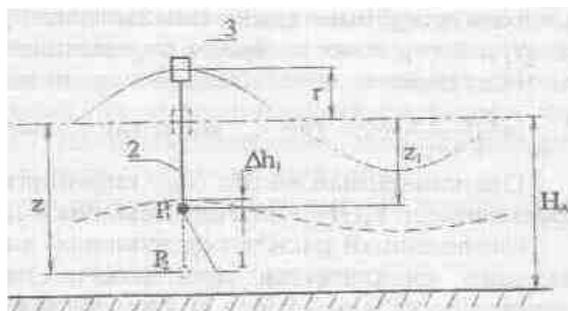


Рис.5 Влияние гидродинамического давления на датчик, опущенный на коротком тросе

давления. Таким образом, во время измерений возвышение водной поверхности прямо пропорционально давлению, измеряемому с помощью гидростатического датчика.

Очевидно, что при работе буй с гидростатическим датчиком давления используется предположение о том, что из результатов измерений исключено гидродинамическое волновое давление. Это предположение позволяет производить измерения только на глубокой воде. В том случае, если датчик закрепить на коротком тросе и поместить его на небольшую глубину, то на результат будет накладываться волновое давление. Зависимость, связывающая измеренную амплитуду волны с истинной примет вид:

$$r = \frac{h_n - \Delta h_1}{2}, \text{ где } \Delta h_1 - \text{размах волнового движения на глубине } Z.$$

Размах изменения давления, фиксируемый датчиком, будет связан с ординатами поверхностной волны соотношением:

$$2P_z = \rho g h_n = 2\rho g r - 2\rho g \gamma_m r = 2r\rho g(1 - \gamma_m), \quad (5)$$

где для мелководной акватории $\gamma_m = \frac{chk(H_a - Z)}{chKH_a}$, здесь H_a - глубина акватории. Как

видно, при заглублениях датчика давления приходится принимать во внимание влияние гидродинамической составляющей волнового давления. При $z < \frac{\lambda}{2}$ высота поверхностных волн, по результатам измерения давлений определится соотношением, вытекающим из (5)

$$2r = \frac{2P_z}{\rho g(1 - \gamma_m)} = \frac{h}{1 - \gamma_m}, \quad (6)$$

С помощью выражения (6) корректируется высота волны измеренная датчиком на коротком тресе.

Необходимо отметить, что разработанный метод учитывает только значение γ_m соответствующее длине кабель-троса буя. Изменение γ_m при переходе датчика на другой горизонт во время перемещения буя по склонам волны в выражениях не учитывается, что приведёт к появлению дополнительной погрешности

$$\delta\gamma_m = \frac{\gamma_{m_1} - \gamma_m}{1 - \gamma_m} 100\%, \text{ где } \gamma_{m_1} \text{ значение } \gamma_m \text{ на горизонте } Z_1 \text{ (рис. 5).}$$

Предложенный метод был опробован в опытовом бассейне лаборатории мореходности ЦНИИ им А.Н.Крылова и подтвердил свою работоспособность.

Инженерный расчёт вертикальной качки буя с гидростатическим датчиком давления предлагается производить на основе выражения, учитывающего растяжение кабель - троса при колебаниях буя:

$$\begin{aligned} (m_b + \lambda)\ddot{\zeta}_g + W\dot{\zeta}_g + \rho g S \zeta_g + \frac{\ddot{\zeta}_g m_r \cos \frac{\omega L}{n}}{\cos \frac{\omega L}{n} + \frac{m_r \omega n}{E_T S_T} \sin \frac{\omega L}{n}} + \\ + \frac{\zeta_g E_T S_T \frac{\omega}{n} \sin \frac{\omega L}{n}}{\cos \frac{\omega L}{n} + \frac{m_r \omega n}{E_T S_T} \sin \frac{\omega L}{n}} = \rho g S r e^{-kT} \cos \omega t, \end{aligned} \quad (7)$$

где m_T - масса гондолы с присоединённой массой, m_B - масса буйа, L - длина кабель-троса, S_T - площадь поперечного сечения троса, E_T - модуль упругости материала троса, μ_c - масса единицы длины троса с учётом присоединённой массы воды,

$$n = \sqrt{\frac{E_T S_T}{\mu_c}}.$$

Выражение (7) отличается от уравнения (4) наличием в левой части четвёртого и пятого членов. Четвёртый член уравнения учитывает натяжение троса от массы, при условии, что трос не растяжим, а пятый - растяжение троса при гармонических колебаниях буйка.

Линейное неоднородное дифференциальное уравнение (8) решается традиционным способом. Расчёт величины модуля упругости производится по формуле $E_T = \nu_T E_{Ю}$, где ν_T - коэффициент, зависящий от свивки троса: при двойной свивке $\nu_T = 0,4 \div 0,6$, при одинарной $\nu_T = 0,65 \div 0,85$, $E_{Ю}$ - модуль Юнга, причём для стали $E_{Ю} = 2 \cdot 10^6$ кг/см².

Результаты расчёта АЧХ вертикальной качки с учётом растяжения кабель-троса и без его учёта, предложенные в работе, показывают, что влияние растяжения кабель-троса на характеристику вертикальной качки значительно и требует дополнительного учёта.

Продольные колебания буйа также могут оказывать влияние на измерение ординат и высот волн. Это влияние выражается в дополнительной погрешности измерений, обусловленной горизонтальными колебаниями буйа относительно точки его установки, при прохождении волн, а также в изменении глубины установки датчика, для буйев с гидростатическим датчиком давления. Продольные колебания буйа обусловлены силой его соскальзывания со склона волны, которая появляется в результате перераспределения гидродинамических давлений, действующих на смоченную поверхность корпуса буйа.

Расчёт продольных колебаний предлагается производить на основе выражения:

$$(m + \lambda_{22})\ddot{\eta}_g + W_{II}\dot{\eta}_g = r\omega^2(m + \lambda_{22})\sin\omega t \quad (8)$$

где λ_{22} - присоединённая масса воды при продольных колебаниях, η_g - продольные перемещения буйа, W_{II} - коэффициент сопротивления движению, при продольных колебаниях, r - амплитуда волны, ω - круговая частота.

Анализ влияния конструктивных элементов буйа на его продольные колебания, выполненный с использованием предложенной мат. модели показывает, что при

уменьшении осадки буя и увеличении его диаметра значения амплитуд продольных колебаний стремятся к амплитуде волны r .

Следует отметить, что выражения (7) и (8), также как и другие

приводимые в работе линейные уравнения, описывающие е виды колебаний буев с различными конструктивными особенностями, являются частными случаями предложенной нелинейной математической модели (3). В этом

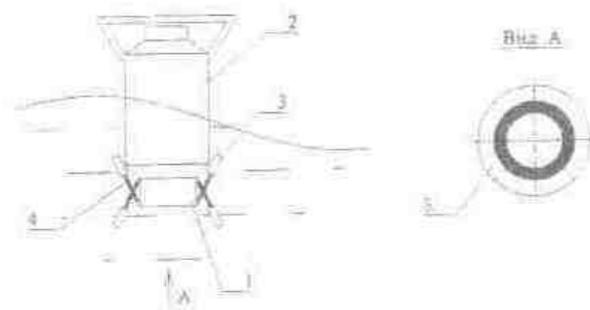


рис.6 Конструкция буя с пружинным демпфером

разделе работы также различных демпфирующих элементов на вертикальную качку буя. Показано, что применение буев с малой площадью ватерлинии и буев с традиционным демпфером для волномерных приборов нецелесообразно. Для демпфирования вертикальной качки в области резонанса предложен пружинный демпфер, конструкция которого представлена на рис.6. Демпфер представляет собой насадку 1, устанавливаемую в подводной части буя 2. Демпфирующим элементом предлагаемого устройства являются лепестки 3, закреплённые к корпусу буя с помощью плоских пружин 4. Устройство имеет чётное число лепестков, причём нечётные лепестки закрепляются с наклоном вверх, а чётные с наклоном вниз.

При вертикальной качке буя лепестки будут раскрываться, в результате чего увеличится сила демпфирования. Особенностью предложенного демпфирующего устройства является то, что величина силы сопротивления, при вертикальных колебаниях буя, будет зависеть от частоты этих колебаний. Демпфирующую силу, можно приближённо определить с помощью выражения

$$F_{\partial} = \int_{S_{л}} \rho \dot{z}^2 \cos^3 \alpha dS_{л},$$

где ρ -плотность воды, \dot{z} - скорость вертикальных перемещений буя, $S_{л}$ - площадь лепестков, α -угол отклонения лепестка от горизонтальной плоскости.

Амплитудно-частотная характеристика буя с пружинным демпфером может быть рассчитана на основе дифференциального уравнения (4).

Следует отметить, что при проектировании волномерных буев, как правило, не

учитываются особенности акватории, на которой будет работать прибор. Очевидно, что при работе в мелководной зоне буй в большей степени будет подвержен влиянию ударных нагрузок от разрушающихся волн, по сравнению с работой в открытом море. Таким образом, при проектировании приборов целесообразно подобрать их гидродинамические характеристики таким образом, чтобы либо расширить полосу пропускания частот, либо уменьшить переходный процесс при возмущении.

На основе линейного уравнения (4) вертикальной качки буя предлагаются выражения для расчёта степени успокоения системы и соответствующей силы демпфирования колебаний. В качестве примера приводится расчёт степени успокоения вертикальной качки буя диаметром 0,3 м. и массой 17 кг, производится подбор его характеристик по наибольшей полосе пропускания частот. Для обеспечения расчётной силы демпфирования рекомендуется применять пружинный демпфер.

Глава четвёртая посвящена исследованию характеристик промежуточных преобразователей приборов также, определяющих их инструментальные погрешности. Сделаны рекомендации по применению в волномерных буях гидрометрических вертушек датчиков давления и гировертикалей.

В течении многих лет в волномерных буях использовались датчики на основе гидрометрической вертушки.

Волномерный буй, с подобным датчиком состоит из тех же элементов, что и буй с гидростатическим датчиком давления, но вместо датчика давления используется гидрометрическая вертушка. При подъёме датчика вслед за поплавком на лопасти вертушки набегаёт поток, в результате чего она совершает вращательное движение, которое преобразуется в электрический сигнал. Таким образом, скорость вращения вертушки пропорциональна скорости набегающего потока, которая зависит от скорости движения буя по склону волны. В связи с этим сигнал вертушечного датчика должен быть проинтегрирован. В приборах различных типов, имеющих датчиком гидрометрическую вертушку, интегрирование производится различными способами.

Исследования динамических характеристик гидрометрической вертушки были произведены в опытовом бассейне с помощью специальной установки, позволяющей производить колебания испытываемых датчиков. С целью определения формы лопастей вертушки, имеющей наименьшую динамическую погрешность, исследования проводились на семи вертушках различной конструкции. Результаты исследований показали, что АЧХ всех вертушек в диапазоне задаваемых частот имеют нелинейную форму, кроме того, характеристики датчика при его движении вниз и вверх

существенно различны.

Предложены теоретические обоснования результатов экспериментальных исследований. Показано, что погрешность измерения ординат волн, обусловленная динамическими характеристиками датчика, будет составлять порядка 7% в диапазоне измерения волн длиной от 15 до 250 м. Однако она может быть скомпенсирована путём учёта динамических характеристик датчика при определении спектральной плотности измеренного процесса.

Известно, что чувствительными преобразователями целого класса волномерных буев являются датчики давления. Режим функционирования датчиков давления в волномерных буйах характеризуется рядом особенностей. Так диапазон частот измеряемого процесса лежит ниже 1 Гц. Отличительной чертой работы датчика является необходимость выделения сравнительно малого полезного сигнала ($0,01 - 1 \text{ кгс/см}^2$) на фоне значительной статической составляющей ($3-6 \text{ кгс/см}^2$). Решение этой задачи может производиться либо путём компенсации статического давления, в случае применения дифференциального датчика, либо путём компенсации электрического сигнала, пропорционального этому давлению, при использовании датчика

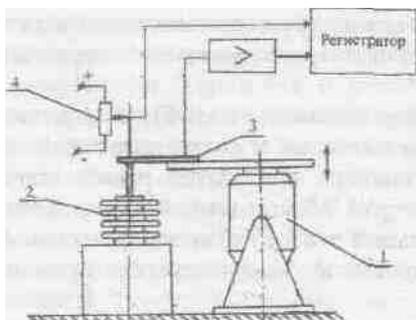


Рис.7 Схема экспериментальной установки

абсолютного давления. В последнем случае, измерительный преобразователь должен иметь высокую чувствительность. Использование дифференциального датчика давления производилось в широко известном серийно выпускавшемся буйе типа ГМ-16. В этом приборе в дифференциальной полости датчика с помощью воздуха создавалось избыточное давление, соответствующее глубине его установки, за вычетом

10 м. Изменение давления воздуха, в результате воздействия температуры не учитывалось. Это приводило к уходу нулевой линии от среднего положения на ленте самописца, при записях волнограмм.

В работе предложено использовать индуктивные датчики абсолютного давления. С этой целью произведены исследования статических и динамических характеристик некоторых датчиков в указанных выше режимах.

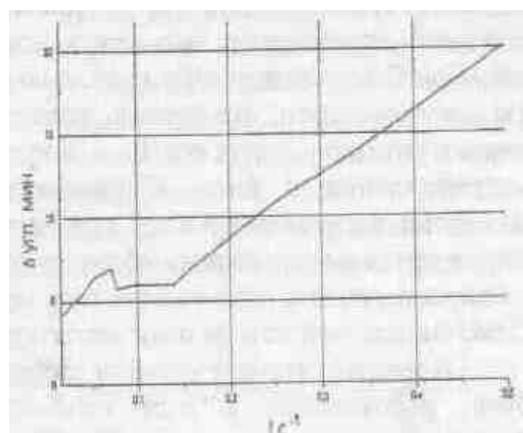
частот приближается или сливается с одной из характеристик, полученных при установке сиффона целиком в одну из сред. Отмеченные закономерности характерны для всех исследуемых образцов.

Очевидно, что для расчёта динамических характеристик сиффонов и мембран, работающих в воде необходима информация о гидродинамических коэффициентах, которые могут быть получены экспериментально. В работе показано, что коэффициент присоединённой массы оказывает меньшее влияние на значение собственной частоты колебаний сиффонов и мембран, чем коэффициент сопротивления. Предложена методика определения коэффициентов сопротивления и приведены их значения для испытанных образцов.

Особенности, отмеченные при анализе экспериментальных кривых, позволяют сделать вывод о значительных автоколебаниях, возникающих в широком диапазоне частот колебаний упругих чувствительных элементов сложной формы и влиянии рабочей среды на характеристики этих автоколебаний. Указанные автоколебания обусловлены жёсткостью отдельных элементов, составляющих поверхность сиффонов и мембран, возбуждаемых при колебаниях местами их заделки. Жёсткость этих элементов в свою очередь определяется как их линейными размерами и точками изгиба, так и погрешностью изготовления формы и толщиной каждого из этих элементов. Указанное явление позволяет говорить о невозможности сопоставления в общем случае жёсткости сиффонов и мембран в статическом режиме с их динамической жёсткостью. Следует отметить, что датчики давления волномерных буев работают в диапазоне с наибольшей частотой 0,5 Гц. Как было указано ранее, в этой области частот характеристики в воде и в воздухе сближаются, что позволяет пренебречь динамической погрешностью мембран датчиков давления в режимах их работы в приборах.

Измерение углов волнового склона, необходимых для определения двумерного спектра морского волнения обычно производится с помощью маятниковых устройств. Следует отметить, что наиболее точные результаты измерений указанных параметров могут быть получены с помощью гировертикалей. Эти приборы были использованы в ряде волномерных буев. В этом разделе работы, в том числе рассматриваются вопросы исследования динамических погрешностей гировертикалей.

Исследования динамических погрешностей гировертикали производилось на



специализированном стенде, позволяющем производить колебания гиросприбора относительно двух осей. Для определения значений динамической погрешности, гировертикали стенд был оснащён устройством сравнения сигналов от датчика положения стенда и гировертикали. Сигнал пропорциональный их разности усиливался и регистрировался.

С помощью указанного стенда произведены исследования динамических погрешностей гировертикали типа ЦГВ-4 по каналу крена. Результаты этих исследований приведены на рисунке 9. Из рисунка видно, что с увеличением частоты колебаний гировертикали величина погрешности измерений возрастает, что подтверждает предположение о том, что в суммарной погрешности гировертикалей доля погрешности от системы стабилизации велика.

При проведении эксперимента погрешность измерений, обусловленная погрешностью датчика угла платформы, составила 5 угловых минут. Проведённые исследования динамических погрешностей гировертикали показали, что её величина в диапазоне частот до $0,5 \text{ с}^{-1}$ не превышает 20 угл. мин., что позволяет использовать волномерные буи, имеющие в своём составе указанные гиросприборы при измерениях волнения как большой, так и малой интенсивности.

Глава пятая посвящена проектированию волномерных буюв. Эта глава условно делится на две части. Первая часть посвящена исследованию и разработке инженерного метода расчёта конструкции волномерных буюв, вторая непосредственно проектированию трёх приборов.

Как было указано колебания волномерных буюв, относительно профиля измеряемой волны, являются источником погрешности измерений параметров волнения. Для уменьшения этой составляющей погрешности производят исследования амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) буюв по различным видам качки и определяют такие его массо-габаритные характеристики, при которых буй в области рабочих частот имеет АЧХ качки равную единице. Определение указанных массо-габаритных характеристик можно производить методом последовательных приближений. При этом, полагая, что увеличение частоты собственных колебаний буюв приводит к расширению диапазона измеряемых периодов волн.

Из теории автоматического управления известно, что увеличение полосы пропускания системы приводит к увеличению длительности переходного процесса. Это было подтверждено при сопоставлении АЧХ вертикальной качки буюв диаметром 0,44

м. с различной массой, полученных экспериментально при крутизне волны 1/40.

Расширение диапазона АЧХ, при котором $\frac{h_B}{h_B} = 1$ может быть достигнуто применением

комплексных мер, направленных не только на выбор необходимых массо-габаритных характеристик буев, но и на применение дополнительных конструктивных элементов, демпфирующих колебания в области резонансных частот. Очевидно, что для реализации указанных мер необходимо определить соответствующее значение силы демпфирования колебаний.

Следует отметить, что при проектировании волномерных буев, как правило, не учитываются особенности акватории, на которой будет работать прибор. Очевидно, что при работе в мелководной зоне буй будет больше подвержен влиянию ударных нагрузок от разрушающихся волн, по сравнению с работой в открытом море. Таким образом, при проектировании приборов целесообразно адекватно условиям работы выбрать параметры колебательного процесса и соответствующие гидродинамические характеристики, что позволит либо расширить полосу пропускания частот D , либо уменьшить переходный процесс при возмущении.

На основе линейного уравнения вертикальной качки буя определяется выражение для степени успокоения системы, а также для расчёта силы демпфирования. В качестве примера приводится расчёт степени успокоения вертикальной качки буя диаметром 0,3 м. и массой 17 кг., производится оптимизация его характеристик по наибольшей полосе пропускания частот, Рекомендуется применять для этих целей пружинный демпфер.

Основная задача, решаемая при проектировании ВБ, состоит в создании измерительной системы, динамические характеристики которой оптимальным образом приближались бы заданным. Эта задача решается путём синтезирования характеристик прибора. В этом разделе также исследуются составляющие погрешности измерений, производится их классификация, выводятся аналитические выражения для их расчёта. Анализируется влияние конструктивных элементов прибора на скорость волнового и ветрового дрейфа волномерного буя. На основе сделанных обобщений разрабатываются методы расчёта погрешностей и конструкции волномерных буев,

Особое внимание уделяется методическим погрешностям, к числу которых относятся:

1. Погрешность измерения, обусловленная орбитальным движением буя $\delta_{ГБ}$
2. Погрешность измерения, обусловленная давлением волн на гидростатический преобразователь (для ВБ с гидростатическим датчиком давления), погруженный на

конечную глубину δ_r .

Все указанные погрешности носят случайный характер. Вместе с тем, в результатах измерения могут присутствовать и систематические погрешности, к которым относятся:

1. Погрешность определения ординат волнения, вызванная различной плотностью воды на акваториях морей (для буев с гидростатическим датчиком). δ_p
2. Погрешность определения ординат волнения, связанная с различной величиной ускорения свободного падения, в местах проведения измерений.

Рассмотрим подробнее указанные составляющие погрешности измерений параметров волнения.

Под воздействием волновых сил траектория движения буя стремится к траектории движения частиц воды в волне. Перемещаясь по траектории замкнутого эллипса, за один период волны, буй будет смещаться относительно среднего положения в направлении распространения волны, после прохождения её гребня и в обратном - после прохождения подошвы. Величина погрешности от указанных колебаний $\delta_{ГБ}$ может быть рассчитана по методике, приведённой в главе 3. В том случае, если измерения производятся с помощью буя с гидростатическим датчиком давления, продольные колебания буя в горизонтальной плоскости, кроме того, приведут к дополнительной погрешности измерения давления $\delta_{ОРБ}$.

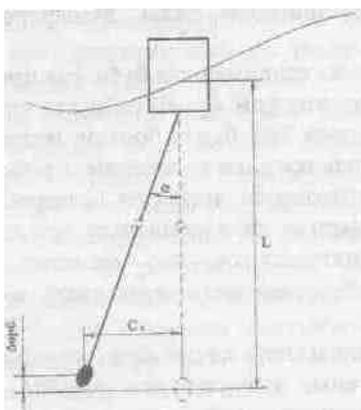


Рис.10 Подъем датчика при орбитальном движении поплавка.

Таким образом, для буя с гидростатическим датчиком давления погрешность, обусловленная орбитальным движением буя будет рассчитываться наиболее сложным образом т.к. состоит из двух слагаемых т.е. $\delta_{ОБ} = \delta_{ГБ} + \delta_{ОРБ}$. В работе показано, что при орбитальных движениях буя кабель - трос будет отклоняться от вертикали не по катенарной кривой, а практически по прямой линии. В точках пересечения буюм уровня тихой воды груз с датчиком будет находиться на глубине $Z_1 = L - \Delta_{ОРБ}$ (рис. 10), которая определяется как $Z_1 = L \cos \alpha = L \cos(\arcsin C_r / L)$, где C_r -горизонтальное смещение поплавка. Таким образом $\Delta_{ОРБ} = L[1 - \cos(\arcsin C_r / L)]$.

Относительная погрешность измерения ординат, вызванная изменением гидростатического давления при орбитальном движении поплавка $\tilde{\delta}_{ОРБ}$, определяется выражением:

$$\tilde{\delta}_{OPB} = \frac{\Delta_{OPB}}{h} 100\%,$$

где $h=2r$ - высота волны.

Предельно возможное горизонтальное смещение поплавка C_G относительно датчика (рис. 10) в случае прохождения буя по крутой волне, когда кабель-трос с грузом не успеют занять вертикальное положение, составит половину её высоты, т.е.

$$C_G = z.$$

Необходимо отметить, что погрешность $\tilde{\delta}_{OPB}$ присутствует только в результатах измерений ординат волн и не влияет на точность определения их высот, т.к. колебания носят знакопеременный характер. Численная оценка этой погрешности показывает, что при $z=6$ м. $\tilde{\delta}_{OPB}$ составит $0,13\%$, что позволяет в некоторых случаях пренебречь этой составляющей погрешности.

Таким образом наибольшее значение в рассматриваемую погрешность будет вносить составляющая, обусловленная непосредственно колебаниями буя в горизонтальной плоскости $\delta_{ГБ}$.

Погрешность, обусловленная давлением волн на гидростатический преобразователь имеет одно из наиболее существенных значений для буя с гидростатическим датчиком давления и отсутствует в измерениях, производимых с помощью буя с акселерометром.

Учитывая, что высота волны связана с радиусом орбитального движения частиц воды соотношением $h=2r_o$, где r_o - радиус орбитального движения частиц воды на поверхности, выражение для погрешности, обусловленной давлением волн на глубине погружения датчика Z , запишется:

$$\tilde{\delta}_Г = \frac{\pm \rho g r_o e^{-\frac{2\pi Z}{\lambda}}}{2 \rho g r} 100\% = \pm 50 e^{-\frac{2\pi Z}{\lambda}} (\%)$$

Кроме указанных случайных составляющих, в работе рассмотрены погрешности, обусловленные различными значениями плотности воды и силы тяжести на акваториях измерений, которые относятся к разряду систематических. Значения величины плотности воды ρ и ускорения свободного падения g в различных акваториях мирового океана существенно отличаются от своих средних значений. В том случае, если при расчете градуировочного коэффициента прибора учтены значения ρ и g места проведения измерений, то эти погрешности равны нулю. Однако, учёт значений этих величин бывает затруднён, если расчёт параметров волнения производится с помощью специализированного вычислительного устройства, а градуировочный коэффициент заложен в программу и помещён в ПЗУ. Таким образом, отличие

среднего значения ρ и g , используемого в расчётах, от фактического приведёт к появлению погрешностей.

Определение границ $\overset{0}{\Delta}P_X$ интервала, в котором с заданной вероятностью P_X находится случайная погрешность измерения, должно выполняться по формуле

$$\overset{0}{\Delta}P_X = \pm K_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^n S_i^2}, \quad (9)$$

где $S_i = \tilde{\delta}_i / m_i$ - оценка среднеквадратического отклонения i — той составляющей погрешности; $\tilde{\delta}_i$ - предел погрешности; n - число суммируемых составляющих; K_{Δ} - коэффициент, выбираемый из учёта доверительной вероятности. При $P_X=0.95$ и $n \geq 3$, $K_{\Delta}=1.96$; m_i - коэффициент, учитывающий вид закона распределения. В том случае, если вид закона распределения погрешности не установлен, то коэффициент $m_i=1.7$. При нормальном законе распределения $m_i=1.96$.

Из теории вероятностей известно, что при суммировании законов распределения погрешностей различных взаимно независимых случайных процессов суммарный закон распределения погрешности будет приближаться к нормальному, поэтому в случае суммирования трёх и более для расчётов примем $m_i=1.96$.

В соответствии с формулой (9) может быть записано выражение для определения границ интервала суммарной случайной погрешности. Для бую с гидростатическим датчиком это выражение будет иметь вид:

$$\overset{0}{\Delta}P_X = \pm \sqrt{\tilde{\delta}_H^2 + \tilde{\delta}_T^2 + \tilde{\delta}_{ОРБ}^2}. \quad (10)$$

Здесь инструментальная погрешность $\tilde{\delta}_H = \tilde{\delta}_K + \tilde{\delta}_D + \tilde{\delta}_P$, где δ_K - погрешность от качки бую, δ_D - погрешность тракта измерения механических величин, δ_B погрешность от растяжения кабель - троса. Необходимо отметить, что для приборов на основе акселерометра погрешность $\tilde{\delta}_T = 0$.

Погрешность измерения периодов волн может быть оценена на основе исследований представленных в главе 3.

На основе обобщения полученных результатов предлагается метод расчёта конструкции волномерного бую, который в общем случае условно можно разделить на следующие этапы:

1. Расчёт массо - габаритных характеристик бую на основе расчёта частотных характеристик его качки.

2. Расчёт инструментальной и методических погрешностей измерений.

3. Синтез характеристик прибора на основе полученных результатов. . Указываются особенности расчётов на каждом этапе. Особое внимание уделяется расчёту сил дрейфа и влиянию на него массо — габаритных характеристик бую. Предлагается методика расчёта дрейфа бую с учётом особенностей его конструкции.

Предложенная прикладная теория волномерных буюв позволила разработать три волнографа, предназначенные для натурных испытаний судов. Эти приборы получили название «Дельфин», «Система измерения параметров волнения» и «Нептун».

Существенно отметить, что эти приборы предназначены для работы в различных условиях и служат решению разных задач. Прибор «Дельфин» предназначен для измерений интенсивного волнения в условиях открытых морей и океанов, волномерный буй «Нептун» предназначен для проведения натурных испытаний судов типа река — море на закрытых водоёмах с ограниченными глубинами при волне высотой до 4 м, а прибор «Система измерения параметров волнения» спроектирован для измерения волнения малой интенсивности при акустических испытаниях судов и кораблей. Рассмотрены конструкции этих приборов и алгоритмы их работы.

Указывается, что бую «Дельфин» и «Система измерения параметров волнения» оснащены микропроцессорными устройствами, позволяющими выполнять анализ статистических характеристик волн непосредственно после окончания измерений. Приводится алгоритм расчёта этих характеристик, позволяющий повысить точность измерений.

Шестая глава посвящена лабораторным и натурным экспериментальным исследованиям, проводившимся на всех стадиях создания прикладной теории волномерных буюв. Представлена методика определения гидродинамических коэффициентов при вертикальных колебаниях буюв. Предложены зависимости коэффициентов сопротивления от скорости вертикальных колебаний для буюв диаметром 0,3; 0,34; 0,44 м. и массой 17; 21; 27; 29; 36 кг., а также значения коэффициентов присоединённых масс. Выполнены расчёты указанных коэффициентов по известным методикам, их результаты сопоставлены с экспериментальными данными. Приведена методика исследований вертикальных колебаний буюв.

Для оценки качества разработанных методик расчёта волномерных буюв и эксплуатационных характеристик буюв с гидростатическим датчиком давления, были произведены сравнительные натурные испытания приборов, работающих на разных принципах действия. Испытания производились во время рейса научно-исследовательского судна "Академик Алексей Крылов".

В сравнительных испытаниях, кроме ВБ "Дельфин", использовались волномерный буй ЧФ ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова, имеющий в качестве датчика гидрометрическую вертушку, а также неконтактный прибор Remot Wave Height Meter (RWHM) американской фирмы TSK.

Этот прибор работает на принципе измерения расстояния от антенны, закреплённой на судне, до поверхности воды. Измерения производятся радиолокационным методом. Для определения вертикальных перемещений антенны вместе с судном и их дальнейшей компенсации служит акселерометр, установленный на антенне, сигналы которого дважды интегрируются и вычитаются из обработанного сигнала радиолокатора.

Сопоставление статистических характеристик, построенных по результатам измерений трёх приборов показывает, что средний период волн, измеряемый с помощью неконтактного прибора, существенно отличается от значений, полученных волномерными буями. Сопоставление спектральных и статистических характеристик волнения по результатам измерений буюв "Дельфин" и ЧФ ЦНИИ, показывает на незначительное их отличие друг от друга. Однако, основываясь на исследованиях характеристик гидрометрической вертушки и датчика буюа "Дельфин", можно утверждать, что это отличие обусловлено нелинейностью динамических характеристик чувствительного преобразователя ВБ ЧФ ЦНИИ.

Таким образом, результаты сравнительных натурных испытаний различных приборов, подтвердили высокое качество разработанных методов расчёта волномерных буюев.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана математическая модель нелинейной качки волномерного буюа произвольной формы, позволяющая выполнить расчёт погрешностей от всех видов качки волномерных буюев, имеющих любые геометрические формы так как даёт исчерпывающую информацию о качке буюа. Разработанная модель может использоваться как для проектирования приборов измеряющих одномерный спектр, так и при проектировании буюев для измерения двухмерного спектра морского волнения.

2. Разработаны новые инженерные методы расчёта качки волномерных буюев. Предложенные математические модели позволили оценить влияние массогабаритных характеристик буюа на параметры его качки. Точность математического моделирования подтверждена сравнением результатов расчёта с экспериментальными данными.

3. Разработана методология расчёта погрешностей и конструкции волномерных

бுவ, использующих различные принципы действия, что позволяет в некоторых случаях уменьшить погрешность приборов на 4%, а их массу на 20%.

4. Результаты исследований влияния демпферов различных типов и кабель-троса на гидродинамические характеристики бுவ позволили выработать рекомендации к их применению в конструкциях приборов.

5. Экспериментально определены гидродинамические коэффициенты и функции сопротивления при вертикальных и бортовых колебаниях цилиндрических бுவ различных диаметров, которые легли в основу разработанных методов и позволяют существенно повысить точность расчётов качки цилиндрических бுவ диаметром 0,3 - 0,44 м.

6. Созданные, на основе результатов исследований методики расчёта погрешностей прибора, позволили впервые в судостроительной промышленности аттестовать ВБ «Дельфин», а также нормировать точность измерения волнения при проведении натурных испытаний судов.

7. Разработан новый метод, расширяющий возможности применения ВБ с гидростатическим датчиком давления, что позволяет его применять в условиях мелководья.

8. Результаты теоретических и экспериментальных исследований различных чувствительных преобразователей ВБ позволили применить их в специфичных режимах функционирования, характерных для измерения волнения.

9. Результаты диссертации использованы при выполнении тематических и опытно - конструкторских работ ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова, ЦНИИ «Гидроприбор», КБ «Связьморпроект», ЦМКБ «Алмаз», ЦКБ «Балтсудопроект», ПО «Севмашпредприятие», НИЦ РЭВ в/ч 30895. ГУП «Адмиралтейские верфи», НИИ ФООЛИОС, Волжской государственной академии водного транспорта. На основе предложенных методик расчёта, разработанных технических решений и алгоритмов, составляющих методологию проектирования, созданы три прибора, два из которых используются в течении многих лет при проведении мореходных испытаний гражданских судов и кораблей военно - морского флота СССР, а затем России. Эти приборы зарекомендовали себя надёжными средствами измерения обеспечивающими метрологические характеристики при работе на волнении до 6 баллов в условиях тропиков и северных морей.

ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ СДЕЛАНЫ СЛЕДУЮЩИЕ ДОКЛАДЫ И ПУБЛИКАЦИИ

Монография

1. Грязин Д.Г. Расчёт и проектирование буюв для измерения морского волнения.
СПб.: СПбГИТМО(ТУ) 2000 133 с.

Журнальные публикации

2. Грязин Д.Г. Инженерный метод расчёта колебаний волномерного бую. // Известия ВУЗов, Приборостроение.- т.45.- 2002.-№1.-с.36-40.
3. Грязин Д.Г. Моделирование качки волномерного бую. // Научное приборостроение, 2001, т. 11.-№ 1.-с. 81-88.
4. Грязин Д.Г. Исследование влияния конструктивных элементов буюв на демпфирование их вертикальной качки. // Научное приборостроение.-2001.-т.11.- №1.- с.89-93.
5. Грязин Д.Г. Определение значений присоединённых масс воды при вертикальных колебаниях волномерных буюв. //Научное приборостроение.-2000.-т.10.- №2.- с.72-75.
6. Грязин Д.Г. Измерение волнения на мелководье с помощью волнографа с гидростатическим датчиком давления. // Научное приборостроение.-1999.-т.9.-№1.- с.78-81.
7. Грязин Д.Г. Влияние растяжения кабель-троса на погрешность измерения морского волнения посредством волномерного бую с гидростатическим датчиком давления. // Научное приборостроение.-1999.-т.9.- №1.-с. 82-86.
8. Грязин Д.Г. Исследование динамических погрешностей гировертикали с помощью специального стенда. // Научное приборостроение.-1999.-т.9.-№1.-с.87-88.
9. Грязин Д.Г. Исследование погрешности волномерного бую, обусловленной его продольными колебаниями. // Научное приборостроение.-1999.-т.9.-№2.-с.59-63.
10. Грязин Д.Г. Методика расчёта конструкции волномерного бую с гидростатическим датчиком давления. // Научное приборостроение.-1999.-т.9.-№4.-с.95-99.
11. Грязин Д.Г. Оптимизация гидродинамических характеристик волномерного бую. // Научное приборостроение.-1999.-т.9.- №2.-с.108-110.
12. Грязин Д.Г. Волнограф для обеспечения мореходных испытаний судов. // Известия ВУЗов, Приборостроение.-1993.-№ 3.-с.45-51.
13. Грязин Д.Г. Автономный волномерный буй для мореходных испытаний судов. // Судостроительная промышленность. Серия «Проектирование судов», тематический сборник. Судостроение.-1991.-вып.18.
14. Грязин Д.Г., Сабо Ю.И. Применение индуктивных датчиков давления в приборах

для измерения волнения. // Датчики и системы.-2001.-№8(27).-с. 23-26.

15. Грязин Д.Г., Ткалич В.Л. Применение индуктивных датчиков абсолютного давления в качестве чувствительных преобразователей для волномерных буев. // Научное приборостроение.-2000.-т.10.-№1.-с.84-88.

16. Грязин Д.Г., Ткалич В.Л., Бочин К.В. Исследование характеристик сильфонов и мембран, применяемых в датчиках давления для динамических измерений. // Научное приборостроение.-2000.-т.10.-№3.-с.55-59.

17. Грязин Д.Г., Ткалич В.Л. Устройство для демпфирования вертикальной качки волномерного бую. // Научное приборостроение.-1999.-т.9.-№2.-с. 88-90.

18. Грязин Д.Г., Ткалич В.Л. Исследование амплитудно - частотных характеристик герконов, применяемых в датчиках скорости вращения вала. // Научное приборостроение.-1999.-т.9.-№2.-с. 91-93.

19. Грязин Д.Г., Яковлев В.Н. Динамические характеристики гидрометрической вертушки волномерного бую. // Известия ВУЗов, Приборостроение.-1998.-№9.-с.41-44.

20. Грязин Д.Г., Труб М.С., Андреев И.Н. Комплексные натурные испытания сейнера - траулера «Дальнереченск»//Судостроительная промышленность. Серия «Проектирование судов»: Тприприематический сборник. Судостроение.-1991.-вып.18.

Прочие публикации

21. Грязин Д.Г., Сабо Ю.И. Волномерные буи для натурных испытаний судов. // Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции «Приборы и приборные системы» Тула, 26-27 октября 2001 г.-с.95-99.

22. Грязин Д.Г. Моделирование качки волномерного бую. // Труды VI международной научной конференции «Проблемы пространства, времени, движения» СПб, 25-29 сентября 2000 г.-с. 16.

23. Грязин Д.Г. Опыт разработки средств измерения морского волнения для натурных испытаний судов. // Труды VI международной научной конференции «Проблемы пространства, времени, движения» С-Пб, 25-29 сентября 2000 г.-с.17.

24. Грязин Д.Г. Расчёт погрешности измерения параметров морского волнения, обусловленной продольными колебаниями волномерного бую. // Труды международного научного семинара «Прикладные вопросы точности механизмов приприборов и машин» ИТМО СПб, 1998.-с.32-34

25. Грязин Д.Г. Разработка математической модели вертикальной качки волномерного бую. // Труды второй международной конференции «Приборостроение в экологии и безопасности человека» СПб, 27 —28 октября 1998 г.-с.48-49.

26. Грязин Д.Г., Иванов В.А. Экспериментальное определение присоединённых масс

средств измерения морского волнения. // Труды XXX научно-технической конференции профессорско - преподавательского состава СПбГИТМО(ТУ) СПб, 25 - 28 января 1999 г.-с.56.

27. Грязин Д.Г., Кайтанов Ю.С., Ткалич В.Л., Гвоздев С.С. // Методология оценки погрешностей средств измерения морского волнения. Труды Всероссийской конференции «Методологические проблемы разработки и внедрения методик выполнения измерений» С-Пб ГНЦ РФ ВНИИМ им. Д.И.Менделеева, 31 мая - 01 июня 1999 г.-с.48-50.

28. Грязин Д.Г., Ткалич В.Л. Основы теории акселерометров. // Учебное пособие СПбГИТМО(ТУ).-1998.

29. Грязин Д.Г., Ткалич В.Л. Инженерный метод расчёта динамических характеристик элементов приборов, работающих в водной среде. // Труды международной конференции «Нелинейные науки на рубеже тысячелетий» СПб, 22-24 июня 1999 г.- с.110.

30. Грязин Д.Г., Ткалич В.Л. Исследование возможности применения датчиков абсолютного давления в качестве чувствительных преобразователей для волнографов // Труды международной научно-технической конференции «Конверсия, приборостроение, медицинская техника» г.Владимир, 6-8 октября 1999 г.-с. 97-99.

31. Грязин Д.Г., Ткалич В.Л. Оценка динамических характеристик герконов, применяемых для измерения частоты вращения вала. // Труды юбилейной научно - технической конференции профессорско - преподавательского состава СПбГИТМО(ТУ), посвящённой 100 летию Университета СПбГИТ-МО(ТУ), 2000.- с.39.

32. Грязин Д.Г., Ткалич В.Л. Особенности применения датчиков абсолютного давления в качестве чувствительных преобразователей волномерных буев // Труды юбилейной научно - технической конференции профессорско -преподавательского состава СПбГИТМО(ТУ) , посвящённой 100 летию Университета СПбГИТМО(ТУ), 2000.-с.39.

33. Грязин Д.Г., Ткалич В.Л. Инженерный метод расчёта динамических характеристик элементов приборов, работающих в водной среде. // Труды международной конференции «Нелинейные науки на рубеже тысячелетий» С-Пб, 22-24 июня 1999 г.- с.110.

34. Грязин Д.Г., Ткалич В.Л., Васильев И.В. ,Бочин К.В. Экспериментальная установка для исследования динамических характеристик упругих чувствительных элементов. // Труды юбилейной научно - технической конференции профессорско - преподавательского состава СПбГИТМО(ТУ), посвящённой 100 летию Университета

СПб ГИТМО(ТУ), 2000.-с.42.

35. Грязин Д.Г., Ткалич В.Л., Михеева О.Д. Повышение надёжности датчиков волномерного буя с чувствительными преобразователями на основе магнитных контактов. // Деп. ВИНТИ №3785-В98 18.12.98.

36. Грязин Д.Г., Шейко И.В. Использование волнографа с гидростатическим датчиком давления для испытания гидросамолётов. // Труды международной молодёжной научной конференции XXV Гагаринские чтения. Москва МАТИ им. К.Э.Циолковского, 6-10 апреля 1999 г.-т. 2.-с.515.

37. Грязин Д.Г. Разработка и исследование аппаратуры для измерения параметров морского волнения, используемой при проведении натурных испытаний судов : Диссертация на соискание учёной степени к.т.н. СПбГИТМО(ТУ) Санкт-Петербург, 1995 г.

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97.

Подписано в печать 04.03.2002

Объем в п.л. 2 и.

Тираж 100.

Заказ № 132

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного автором,

в типографии Издательства СПбГТУ

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29