

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ

На правах рукописи

БЕЗВЕРХИЙ Александр Игоревич

ДИНАМИКА ПРОТЯЖЕННЫХ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ
С УПРУГИМИ СВЯЗЯМИ

01.02.04 - механика деформируемого твердого тела

01.02.05 - механика жидкости, газа и плазмы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

К и е в 1992

78.2.1.115
Работа выполнена в Институте механики АН Украины

Научные руководители - член-корреспондент АН Украины
ШУЛЬГА Н. А.
- кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник САЛТАНОВ Н. В.

Официальные оппоненты - доктор физико-математических наук,
профессор ГОРОШКО О. А.
- кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник ПРОЦЕНКО О. П.

Ведущая организация - НПО "Славутич"

Защита состоится "28" апреля 1992г. в 11³⁰ часов
на заседании специализированного совета К 016.49.01
Института механики АН Украины (252057 г. Киев-57, ул. Нестерова 3)

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
Института механики АН Украины

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН УРСР

внесен "18" марта 1992г.

ного
ук

НАЗАРЕНКО В. М.

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00815794 (Y)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Изучение и освоение богатств вод Мирового океана с целью добычи сырья для промышленности и пищевых ресурсов для человечества связано с выходом на большие глубины и проведением исследований атмосферы и океана. Благодаря своей экономичности (легкость, простота изготовления) при решении этих задач нашли широкое применение гидрофизические системы. Для обеспечения надежной работоспособности таких систем и ставится вопрос исследования их динамики при взаимодействии с внешней средой (ветер, волны, поток) в разных режимных работах. Схематично гидрофизическую систему можно считать системой тел соединенных упругими связями (тросы, канаты, кабели).

В развитие теории динамики гибких стержней и нитей значительный вклад внесли ученые как СССР Алексеев Н.И., Горошко О.А., Динник А.Н., Иконников И.Б., Качурин В.К., Крылов А.Н., Кульмач П.П., Кочин Н.Е., Егоров В.И., Казакевич М.И., Савин Г.М., Салтанов Н.В., Светлицкий В.А., Меркин Л.Р., Якубовский Ю.В., так и зарубежные Берто О.Г., *Choo Y, Cassarella M. J., Dowling A.P, Meglior X, Nakt J.M, Webster R.* и др.

Существенные результаты в области решения прикладных задач буксирных и якорных систем, исследовании их нестационарных характеристик получены Букачем В.И., Горбанем В.А., Дедковым В.М., Золотенко Г.А., Каликовым В.Н., Королевым В.И., Калухом Ю.И., Никифоровым А.И., Тихоновым В.С., Ордановичем А.Е., Проценко О.П., Поддубным В.И., Ядыкиным Ю.В., Ястребовым В.С. и др.

Вместе с тем необходимо заметить, что вопросы связанные с исследованием нелинейных задач динамики для упругих систем с учетом действия гидродинамических сил на элементы таких конструкций изучены недостаточно и требуют отдельного рассмотрения. Разработка методов расчета, создание новых алгоритмов и программ, которые позволили бы учесть как можно больше факторов работы в реальных условиях при переходе к математическим расчетным моделям, которые будут при этом как геометрически, так и физически нелинейными, остаются важными и актуальными. Исследования по теме диссертации проводились в соответствии с планами основных научных исследований АИИ Украины " Проведение исследования акустических, гидрофизических и деформационных характеристик взаимодействия среды с элементами конструкций

гидрофизических и технических средств освоения Мирового океана" в рамках программы фундаментальных исследований механики "Повышение надежности систем "машина-человек-среда".

Цель работы - изучение основных закономерностей динамики гидрофизических систем при внешнем воздействии (ветер, волны, поток, буксировка, вынужденные смещения) включая :

- постановку задачи динамики дискретной гидрофизической системы в потоке ;
- выбор эффективных аппроксимационных функций для рассматриваемого класса задач при их дискретном моделировании и построение численного метода решения соответствующих начально-краевых задач ;
- анализ закономерностей силовых и кинематических характеристик гидрофизической системы при различных режимах ускоренных продольных движениях ;
- исследование особенностей переходных процессов в буксируемых системах при ускоренных и пространственных эволюциях .

Научная новизна :

- разработан способ дискретизации нелинейных уравнений динамики, который позволяет связать пространственные координаты расположения системы с текущей координатой длины ;
- для представления радиус-вектора выбраны параметрические локальные сплайн-функции и получены оценки таких аппроксимаций ;
- в линеаризованной постановке изучено влияние гидродинамических и упругих свойств на силовые и кинематические характеристики при различных режимах ускоренных движений ;
- для подвешенных и буксируемых систем получены области перехода на рывки в зависимости от амплитудно-частотных характеристик волн ;
- построение эффективного численного алгоритма решения соответствующих начально-краевых задач с учетом эффекта "зависания" ;
- экспериментальное подтверждение численных результатов по определению областей перехода на рывки и эффективность предложенного алгоритма решения ;
- получены качественные и количественные оценки влияния конструктивных, гидродинамических и упругих характеристик на буйковые, закоренные и буксируемые гидрофизические системы.

Достоверность полученных автором результатов и выводов диссертационной работы подтверждается полученными оценками используемых численных методов, удовлетворительным соответствием экспериментальных и численных результатов, а также в сравнении с результатами других авторов в отдельных случаях.

Практическая ценность диссертации заключается в возможности при помощи предложенного алгоритма расчета выбрать конструктивные, геометрические и упругие характеристики проектируемых гидрофизических систем для различных условий работы без проведения широкомасштабных экспериментальных исследований; в выборе режимов работы в зависимости от погодных условий, в расчете местоположения приборов при эволюциях.

Реализация результатов работы. Большинство рассматриваемых задач вошла как составная часть технических и научных отчетов по бюджетным и хозяйственным работам. Методика расчетов и пакет прикладных программ внедрены на НПО "АТОЛЛ" г.Дубна и получен экономический эффект.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на: XIII научно-технической конференции молодых ученых специалистов ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова (г.Ленинград, 1983 г.), конференции "Теоретические и экспериментальные исследования молодых ученых-океанологов" (г.Севастополь, 1983 г.), III Республиканской конференции "Проблемы гидромеханики в освоении океана" (г.Киев, 1984 г.), I республиканской школе-семинаре молодых ученых и специалистов по теоретической и прикладной гидромеханике" (г.Алушта, 1984 г.), У Всесоюзной конференции по статике и динамике пространственных конструкций (г.Киев, 1985 г.), Всесоюзной школе-семинаре "Динамика механических систем" (г.Томск, 1986 г.), IV научно-технической конференции "Проблемы создания новой техники для освоения шельфа" (г.Горький, 1986 г.), IV Республиканской конференции по прикладной гидромеханике (г.Киев, 1987 г.), III съезде Советских океанологов (г.Ленинград, 1987 г.), III Всесоюзной школе молодых ученых "Численные методы механики сплошных сред" (г.Абрау-Дурсо, 1991 г.), семинарах отдела технической гидромеханики ИГМ АН Украины (г.Киев, 1983-1988 г.г.), семинаре отдела деформируемого твердого тела Отделения геодинамики взрыва ИГФ АН Украины (г.Киев, 1990 г.), семинаре отдела электроупругости ИМ АН Украины (г.Киев, 1991 г.),

семинаре НПО "Славутич" (г. Киев, 1991 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка использованных литературных источников.

Работа содержит 140 страниц машинописного текста, включая 61 рисунок и список литературы из 102 названий.

Содержание диссертации

Во введении обсуждается актуальность темы, сформулированы цели и задачи работы, их новизна, а также практическая ценность. Кратко изложены научные результаты, которые выносятся на защиту.

В первом разделе дается обзор работ, относящихся к рассматриваемой проблеме. Приводится вывод нелинейных уравнений динамики упругих нитей в жидкости. Для упругой нити уравнение движения в жидкости в безразмерном виде будет:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{v}} - \left(\left(1 - \frac{1}{|\vec{r}|} \right) \right) \frac{\partial \vec{r}}{\partial \ell} - \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|^3} (\vec{r} \cdot \frac{\partial \vec{r}}{\partial \ell}) = \\ = - \vec{q}_* \eta^2 \left(1 - \frac{1}{m_n} \right) + C_f^* \frac{1}{|\vec{r}|^2} ((\vec{v}\eta - \vec{v})\vec{r})\vec{r} |(\vec{v}\eta - \vec{v})\vec{r}| + \\ + C_n^* \frac{1}{|\vec{r}|^2} ((\vec{v}\eta - \vec{v})|\vec{r}|^2 - ((\vec{v}\eta - \vec{v})\vec{r})\vec{r}) |(\vec{v}\eta - \vec{v}) \times \vec{r}| + \\ + \lambda_m^* \left(\frac{1}{|\vec{r}|} \vec{r} \times (\dot{\vec{v}}\eta - \dot{\vec{v}}) + \frac{1}{|\vec{r}|^3} ((\vec{v}\eta - \vec{v})\vec{r})\vec{r} \times (\vec{r} \cdot \dot{\vec{r}}) + \right. \\ \left. + \frac{1}{|\vec{r}|^3} \vec{r} (\dot{\vec{r}} \times ((\vec{v}\eta - \vec{v}) \times \vec{r})) \right) \end{aligned}$$

$$\vec{r} = \frac{\partial \vec{R}}{\partial \ell}$$

Здесь \vec{R} , \vec{v} - радиус-вектор и скорость текущей точки длины нити, ℓ - текущая координата длины точки нити до растяжения,

C_n^* , C_f^* , λ_m^* - безразмерные коэффициенты сопротивления

при нормальном и касательном обтекании и присоединенной массы соответственно, \vec{V} - вектор скорости потока жидкости, η - отношение скоростей распространения возмущения в жидкости и нити, m_{ni} - отношение погонной массы нити к массе вытесненной жидкости, \vec{q}_* - единичный вектор ускорения свободного падения, $(\dot{\quad})$ - производные по времени.

Обсуждаются вопросы обезразмеривания, а также выбора начальных и краевых условий соответствующих целям данной работы.

Во втором разделе описывается способ дискретизации уравнений движения, основанный на представлении радиуса-вектора i -го элемента через функции выражающие связь текущей координаты длины и пространственных координат точек разбиения на дискретные участки. Далее, записав уравнения Лагранжа II-го рода для дискретных элементов получим систему $3(N + 1)$ дискретных уравнений описывающих динамику гидрофизической системы в жидкости

$$\int_0^{N+1} \sum_{i=0}^{N+1} L_i \left\{ m_{ni} \ddot{\vec{R}}_i \frac{\partial \vec{R}_i}{\partial \dot{x}_{kj}} + m_{ni} \dot{\vec{R}}_i \frac{\partial \vec{R}_i}{\partial x_{kj}} - m_{ai} (\dot{\vec{V}} - \dot{\vec{R}}_i) |\vec{\tau}_i| \frac{\partial \vec{R}_i}{\partial x_{kj}} + \right. \\ \left. + C_{ei} (|\vec{\tau}_i| - 1) \frac{\partial}{\partial x_{kj}} (|\vec{\tau}_i|) + C_{yi} (\vec{\tau}_i \times \frac{\partial \vec{\tau}_i}{\partial \ell}) \frac{\partial}{\partial x_{kj}} (\vec{\tau}_i \times \frac{\partial \vec{\tau}_i}{\partial \ell}) + \right. \\ \left. + \left\{ (m_{ni} - \rho_c F_{ni} |\vec{\tau}_i|) \vec{q} - \frac{C_{\ell i}}{|\vec{\tau}_i|} |\vec{\tau}_i (\vec{V} - \dot{\vec{R}}_i)| |\vec{\tau}_i| ((\vec{V} - \dot{\vec{R}}_i) \vec{\tau}_i) \frac{1}{(\vec{\tau}_i)^2} - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{C_{ni}}{|\vec{\tau}_i|} |\vec{\tau}_i \times (\vec{V} - \dot{\vec{R}}_i)| ((\vec{V} - \dot{\vec{R}}_i) - \vec{\tau}_i ((\vec{V} - \dot{\vec{R}}_i) \vec{\tau}_i)) \frac{1}{(\vec{\tau}_i)^2} \right\} \frac{\partial \vec{R}_i}{\partial x_{kj}} \right\} d\xi + \\ + M_{Tj} \ddot{x}_{kj} + \left\{ (M_{Tj} - \rho_c V_{Tj}) \vec{q} - \rho_c C_{Tj} S_{Tj} |\vec{V} - \dot{\vec{R}}_{Tj}| (\vec{V} - \dot{\vec{R}}_{Tj}) + \right. \\ \left. + \lambda_{Tj} \rho_c V_{Tj} (\dot{\vec{V}} - \dot{\vec{R}}_{Tj}) \right\} \frac{\partial \vec{R}_{Tj}}{\partial x_{kj}} = 0, \quad \xi = (\ell - \ell_i) / L_i, \\ \begin{matrix} k = 1, 2, 3. \\ j = 0, 1, \dots, N \end{matrix}$$

Здесь \vec{R}_i - радиус-вектор, ℓ - текущая координата длины связи до деформации, m_{ni} , m_{ai} - погонные масса и присоединенная масса, L_i - длина до деформации, F_{ni} - площадь сечения, C_{ei} , C_{yj} ,

C_{ni} , C_{fi} - коэффициенты жесткости на растяжение и изгиб, сопротивления при нормальном и касательном обтекании i -го элемента связи, \bar{R}_{Tj} - радиус-вектор, M_{Tj} - масса, S_{Tj} - площадь мидела, V_j - объем, C_{Tj} - коэффициент сопротивления, λ_{Tj} - коэффициент присоединенной массы жидкости j -го тела, \bar{V} - вектор скорости потока, ρ_c - плотность жидкости, \bar{q} - вектор ускорения свободного падения, x_{kj} - координаты точек разбиения, (\dots) , (\dots) - производные по времени.

Для определения радиус-векторов введены функции связи координат x_{kj} и текущей длины ℓ с помощью параметрических локальных сплайнов первой степени

$$\bar{R}_i = \sum_{k=1}^3 (x_{ki} + (x_{k,i+1} - x_{ki}) \xi) \bar{e}_k$$

или третьей степени

$$\bar{R}_i = \sum_{k=1}^3 \left(x_{ki} (1 - \xi) + x_{k,i+1} \xi - \frac{\xi(1-\xi)^2}{6} L_i [(2-\xi)M_{ki} + (1+\xi)M_{k,i+1}] \right) \bar{e}_k$$

Даны оценки такой аппроксимации. Для численного решения систем нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, к которым сводится система дискретных уравнений динамики, исходя из экономичности и точности расчетов выбраны многошаговые методы Адамса и Гира.

В третьем разделе проведен анализ одномерных движений. Для выяснения влияния гидродинамических параметров и кинематики различных заданных движений одного из концов системы на силовые и кинематические характеристики ее движения в п.3.1 рассмотрены линеаризованные уравнения. Для продольных перемещений при равноускоренном движении и ускоренном по закону гиперболического тангенса найдены точные решения. Распространение возмущения носит при этом волновой характер. Изменение продольного усилия во времени существенно зависит от сопротивления движению в жидкости, величина же первого пика продольного усилия практически не зависит от него. Для произвольного заданного закона движения точки $\ell = 0$ решение находится методом разделения переменных с дальнейшим численным решением задачи Коши для переменной по времени. По такой методике рассмотрены переходы с одной скорости движения точки $\ell = 0$ на другую по закону гиперболического тангенса, участка синусоиды и мгновенный переход (переход ступенькой). Прослежено изменение продоль-

ного усилия в точке буксировки по времени при различных режимах перехода, различном сопротивлении движению в жидкости. Рассмотрены вынужденные продольные колебания системы с телом, определены резонансные частоты в зависимости от массовых характеристик, троса и тела и их коэффициентов сопротивления.

С использованием разработанной во втором разделе численной методики в пункте 2.3 проведены исследования колебаний подвешенной системы в жидкости. Получено, что максимум и минимум усилий с ростом частоты растут нелинейно до той частоты, при которой $T_{min} = 0$, а $T_{max} = 2T_{ст}$. Так как трос на сжатие не работает, то происходит эффект зависания. После зависания происходит рывок, что приводит к значительному росту T_{max} , т.е. имеем случай мгновенного перехода с одной скорости движения на другую, при этом на частоте вынужденных колебаний появляются колебания с частотой собственных колебаний и так до следующего зависания. От амплитуды вынужденных колебаний T_{min} и T_{max} изменяется линейно и так до момента, когда $T_{min} = 0$. Так как с ростом и частоты, и амплитуды происходит переход на рывковый режим работы, то построена кривая в системе координат амплитуда-частота вынужденных колебаний, которая характеризует этот переход (рис.1).

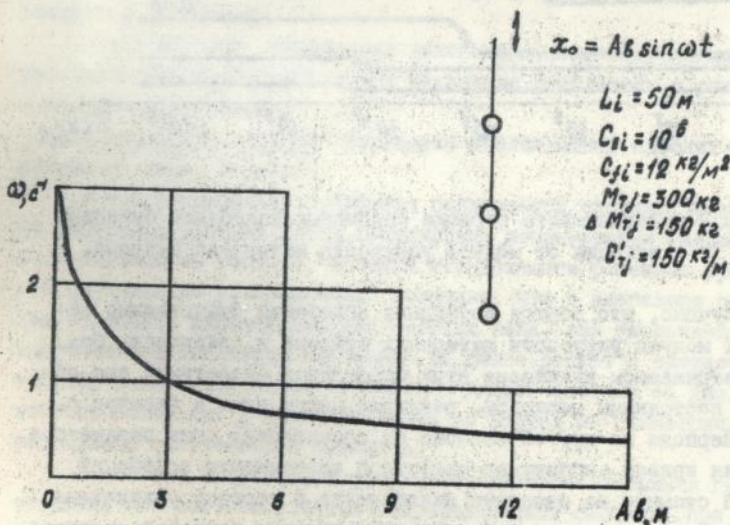


Рис.1. Кривая перехода к рывкам при колебаниях.

Амплитудно-частотные зависимости вынужденных колебаний, которые лежат выше этой кривой приводят к рывковому режиму работы, а ниже - к колебаниям. Получены также зависимости амплитуды колебаний тел и усилия на различных участках троса от механических характеристик системы (длины, упругости). Даны параметры, при которых появляются резонансы.

В 3.3 рассмотрено поведение буйковой станции на волнении. Определены периоды свободных колебаний в зависимости от плавучести буйа при различных модулях упругости материала буйрепа (Рис. 2).

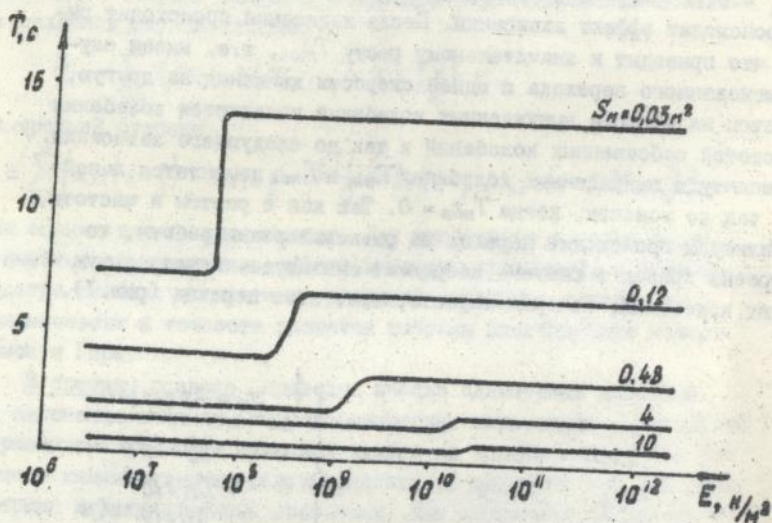


Рис. 2. Зависимость периода свободных колебаний буйковой станции от модуля упругости материала буйрепа.

Получено, что период свободных колебаний существенно зависит от модуля упругости материала буйрепа и плавучести буйа. В рассматриваемом диапазоне этих параметров существуют две области с постоянным периодом, различие между ними и переход с одного периода на другой зависит от соотношения этих параметров. Скелетная кривая амплитудно-частотной зависимости колебаний буйковой станции на волнении наклоняется в сторону увеличения периода. Получены механические характеристики буйковой станции

которые позволяют выбрать их такими, чтобы или буй стоял на волне, или измерители под всдой имели наименьшую амплитуду колебаний.

Для изучения явлений, связанных с появлением рывков при колебаниях были проведены эксперименты на двух моделях: на стальном тросе длиной 7,5 м и диаметром 3,5 мм подвешена или сфера диаметром 0,421 м и массой 72 кг, или цилиндрическое тело диаметром 0,11 м и длиной 0,87 м с полусферическими днищами. Эксперименты показали, что при росте частоты, при постоянной амплитуде, при движении вниз тело начинает отставать от движения троса. При этом усилие в тросе падает до нуля, в следующий момент времени при движении вверх происходит рывок, то есть резкий рост усилия в тросе. Условием появления рывков при колебаниях системы в жидкости является полскежие при котором в некоторый момент времени сумма динамических инерционных и демпфирующих сил, действующих на систему становится равной или большей веса. Получено, что при уменьшении периода вынужденных колебаний динамические усилия быстро растут, как и в расчетах, быстрый рост усилий начинается для больших амплитуд раньше, то есть при больших периодах. Качественная же картина изменения усилий совпадает с расчетной.

Таким образом, физические закономерности, полученные в теоретических решениях дополняют численные результаты с совпадают с экспериментальными.

В четвертом разделе проведены исследования плоских и пространственных задач динамики.

В 4.1 рассмотрены колебания закоренной системы. В качестве начальных условий взяты статические конфигурации гидрофизической системы на течении, которые определяются решением уравнений динамики до установления. Получено, что в диапазоне периодов колебаний характерных для морских волн, при уменьшении периода максимум амплитуды колебаний по длине растет и смещается к нижнему концу, что может привести к ударам системы об дно. Изменение натяжения в клюзовой точке за период не симметрично относительно статического значения.

Далее в 4.2 проведены результаты расчетов динамики гибкого стержня, как составной части гидрофизической системы, при заданных ускоренных движениях по нормали к оси стержня, одного из его концов. Получено, что распространение возмущений носит волновой характер. Максимальное значение первого пика продольного усилия

в стержне при равноускоренном движении от величины ускорения зависит нелинейно. При мгновенном изменении скорости движения одного конца максимальная скорость движения второго линейно зависит от величины заданного перепада скоростей.

Для прогнозирования и оценки динамических усилий, возникающих в буксируемой системе при развороте судна-буксировщика в 4.3. изучены основные особенности поведения буксируемой системы. Получено, что максимальное усилие в буксировочном фале возникает сразу же после выхода с разворота на прямое буксирование, причем увеличение натяжения происходит практически рывком. Величина же максимума натяжения при уменьшении радиуса разворота нелинейно увеличивается.

Основные результаты и выводы работы заключаются в следующем :

1. Разработан способ дискретизации векторного уравнения динамики гидрофизической системы, позволяющей связать пространственные координаты расположения системы с текущей координатой длины.
2. Для аппроксимации дискретных радиус-векторов использованы параметрические локальные сплайн-функции первой и третьей степени, что позволило разработать универсальный и эффективный алгоритм численного расчета динамики системы.
3. На основе полученных точных решений линеаризованных уравнений движения проанализировано влияние гидродинамических, упругих и кинематических параметров системы на силовые и кинематические характеристики ее движения при различных режимах вынужденных ускоренных движений.
4. В зависимости от амплитудно-частотных параметров вынужденных колебаний подвешенной системы получены зависимости усилий в системе при различных конструктивных, упругих и гидродинамических ее характеристиках. Определены области перехода на рывковые режимы работы. Экспериментально подтверждены теоретические результаты и эффективность предложенного способа расчета динамики.
5. Для буйковой станции в зависимости от упругости буйрепа и плавучести буя существуют две области с постоянным периодом свободных колебаний.
6. Получены качественные и количественные оценки влияния конструктивных, гидродинамических и упругих характеристик на

закоренные и буксируемые гидрофизические системы при плоских и пространственных движениях при этом в частности обнаружено, что :

- максимальные амплитудные значения колебаний закоренной системы при увеличении частоты колебаний смещается вниз, что может привести к ударам системы о дно ;
- максимальное натяжение при развороте буксируемой системы наступает при выходе на прямое буксирование, а величина нелинейно зависит от радиуса разворота .

Основные результаты диссертационной работы отражены в публикациях :

1. Безверхий А.И., Горбань В.А. Применение методов сплайн-функций в задачах динамики тросовых систем в жидкости // Проблемы гидромеханики в освоении океана. - Киев: Наукова думка, 1984. - С. 132-134.
2. Безверхий А.И. Поведение свободно плавающего гидрометеорологического буя с измерительной линией на волнении // Там же : - С. 134-135.
3. Безверхий А.И. Метод расчета динамики гибких стержней в потоках // Тез. докл. У Всесоюз. конф. по статике и динамике пространственных конструкций. - Киев : инж.-строит. ин-т, 1965. - С. 24-25.
4. Безверхий А.И. Расчет динамики системы тел соединенных гибкими связями в жидкости // Динамика механических систем. - Томск : ТГУ, 1986. - С.8-9.
5. Безверхий А.И., Королев В.И. Динамика опускаемых в воду тел // Проблемы гидромеханики в освоении океана. - Киев : ИГМ АН УССР, 1987. - С.25-26.
6. Безверхий А.И. Расчет динамики растяжимых нитей в жидкости // Там же : - С. 23-24.
7. Безверхий А.И. О динамических рывках в гибких элементах конструкций средств освоения океана // III съезд Советских океанологов. Тез. докл. - Л.: Гидрометеиздат, 1987. - С.18-19.
8. Безверхий А.И. Расчеты динамики гибких стержневых систем в жидкости // Численные методы механики сплошной среды. Тез. докл. III Всесоюз. школы молодых ученых. - Красноярск : 1991. - С. 106-107.

186

Подписано к печати 05.09.1992г. Формат 60x84/16
Бумага офсетная Усл.-печ.лист 1,0. Уч.-изд. лист 1,0.
Тираж 100. Заказ 254. Бесплатно

Полиграф. уч-к Института электродинамики АН Украины,
252057, Киев-57, проспект Победы, 56.

466800

AB 25.479

28