

На правах рукописи



Любомиров Ярослав Мстиславович

**ИНТЕРАКТИВНЫЙ МЕТОД ГИДРОУПРУГОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
КОМПОЗИТНЫХ ЛОПАСТНЫХ СИСТЕМ**

2.5.17 Теория корабля и строительная механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Крыловский государственный научный центр» на отделении прочности и надежности конструкций объектов морской техники.

Научный руководитель:

Ярцев Борис Александрович

доктор технических наук, начальник сектора исследования свойств композиционных материалов и моделирования происходящих в них процессов ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Официальные оппоненты:

Пронина Юлия Григорьевна

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительных методов механики деформируемого тела ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»

Модестов Виктор Сергеевич

кандидат технических наук
заместитель заведующего лабораторией «Механика материалов»
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»

Защита состоится «__» _____ 20__ года в __ часов ____ минут на заседании диссертационного совета 31.1.003.01 при ФГУП «Крыловский государственный научный центр» по адресу: 196158, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на официальном сайте ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (<https://krylov-centre.ru/about/councils/obyavleniya-ob-otkrytykh-zashchitakh/>).

Автореферат разослан «__» _____ 20__ года

Ученый секретарь

диссертационного совета 31.1.003.01

кандидат технических наук, доцент

О.В. Малышев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из аспектов совершенствования эксплуатационных характеристик судовых двигателей является снижение уровней их вибрации. В результате высокой степени гидродинамической отработки формы лопастей современных двигателей, традиционные методы снижения уровней вибрации гребных винтов практически исчерпали себя. Приоритетным направлением по дальнейшему снижению виброскоростей, виброускорений и виброперемещений является поиск новых материалов и разработка специальных конструкций лопастей и элементов двигателя. К наиболее перспективным материалам относятся полимерные композиты, в первую очередь, углепластик. Высокая анизотропия физико-механических свойств однонаправленного углепластика позволяет создавать композитные конструкции, характеризующиеся рядом неклассических эффектов. Из множества эффектов следует выделить связь изгиба с кручением, возникающую при деформировании моноклинных композитных структур. Возможность управления уровнем изгибно-крутильной связанности композитных конструкций позволяет создавать моноклинные лопастные системы, адаптирующихся к переменным условиям нагружения набегающим неоднородным потоком воды. Использование адаптивных лопастей влечет за собой снижение уровней вибрации, повышение КПД и уменьшение износа двигателя на нерасчетных режимах движения.

Параметры динамического отклика композитных лопастных систем существенно зависят от величины сопротивления внешней среды. Поэтому реализация преимуществ композитных лопастей предполагает отказ от классической методологии разработки судовых двигателей, основанной на гипотезе бесконечной жесткости элементов лопастной системы, которая должна быть заменена методами математического моделирования связанных задач деформирования упругой лопасти и гидродинамики. В нашей стране в этом направлении систематические работы до сих пор не проводились.

Цель работы заключается в разработке интерактивного метода математического моделирования параметров динамического отклика взаимодействующих с водно-воздушной средой деформируемых композитных лопастных систем судовых двигателей, основанного на использовании различных стратегий численного решения связанных задач аэрогидроупругости.

Для достижения заявленной цели необходимо решить **основные задачи**:

- выполнить анализ существующих методов математического моделирования задач механики композитов и гидродинамики;

- сформировать схемы взаимодействия задач в процессе аэрогидроупругого моделирования композитных лопастных систем и выбрать математические модели их реализации;

- уточнить метод выбора рациональных составов и структур армирования погруженных в водную среду композитных лопастей судовых движителей, основанный на исследовании собственных частот и собственных форм их затухающих колебаний;

- апробировать разработанный интерактивный метод математического моделирования параметров динамического отклика взаимодействующих с водно-воздушной средой деформируемых композитных лопастных систем путем исследования динамики судового движителя, находящегося в покоящейся безвихревой идеальной жидкости или работающего в турбулентном потоке.

Методы исследования: при постановке и численном решении задач, рассматриваемых в диссертационной работе, использовались методы и положения теории упругости, теории вязкоупругости, механики композитов, аэрогидродинамики, методы и средства вычислительной механики сплошных сред как основного аппарата математического моделирования.

Достоверность результатов подтверждена хорошим согласованием расчетных и экспериментальных значений параметров динамического отклика (собственных частот и собственных форм колебаний, коэффициентов механических потерь, критических скоростей флаттера и дивергенции, кривых действия) исследуемых конструкций.

Научная новизна:

1. Разработан интерактивный метод математического моделирования параметров динамического отклика взаимодействующих с водно-воздушной средой деформируемых композитных лопастных систем судовых движителей, основанный на использовании различных стратегий численного решения связанных задач аэрогидроупругости.

2. Уточнен метод выбора рациональных составов и структур армирования погруженных в водную среду композитных лопастей судовых движителей,

основанный на исследовании собственных частот и собственных форм их затухающих колебаний.

3. Исследовано влияние:

– структуры армирования консольной пластины и обшивки адаптивного крыла, образованных совокупностью слоев однонаправленного углепластика, на величины их собственных частот, а также критических скоростей флаттера и дивергенции;

– состава и структуры армирования неоднородных по толщине «мокрых» композитных лопастей, образованных силовыми слоями из однонаправленного углепластика и вибропоглощающим слоем «мягкого» вязкоупругого материала, на величины собственных частот и коэффициентов механических потерь, а также на спектры эффективной мощности виброскоростей, средних амплитуд виброскоростей и реакций в зоне соединения ступицы с валом судового движителя.

Практическая значимость результатов работы: разработанный интерактивный метод математического моделирования параметров динамического отклика взаимодействующих с водно-воздушной средой деформируемых композитных лопастных систем судовых движителей, основанный на численной реализации различных стратегий решения связанных задач аэрогидроупругости, позволяет минимизировать объемы экспериментальной проверки разрабатываемых конструкций судовых движителей с адаптивными композитными лопастями. Использование этого метода позволило разработать два элемента конструкции сборного судового движителя с адаптивными композитными лопастями, новизна которых подтверждена двумя патентами Российской Федерации.

Реализация результатов работы. Результаты работы использованы при выполнении работ ФГУП «Крыловский государственный научный центр» по:

– государственным контрактам с Минпромторгом РФ №11411.1000400.09.010 от 02.12.2011 г., № 18208.4452018.09.001 от 24.12.2018 г.;

– договору с АО «Научно-производственное предприятие «МОРСКАЯ ТЕХНИКА», № 1218187301351010105000076/134-61/07 от 26.11.2007 г.;

– договорам с АО «Санкт-Петербургское морское бюро машиностроения «Малахит» № НИОКР/3-18/236-35/18 от 2.07.2018 г., № НИОКР/2-17/107-35/17 от 30.03.2017 г.;

– договору с АО «ЦКБ «Лазурит» №364-91/17 от 29.06.2018 г.

На защиту выносятся:

- интерактивный метод математического моделирования параметров динамического отклика взаимодействующих с водно-воздушной средой деформируемых композитных лопастных систем судовых движителей, основанный на использовании различных стратегий численного решения связанных задач аэрогидроупругости;

– уточненный метод выбора рациональных составов и структур армирования погруженных в водную среду композитных лопастей судовых движителей, основанный на исследовании собственных частот и собственных форм их затухающих колебаний;

– результаты исследований влияния:

- структуры армирования консольной пластины и обшивки адаптивного крыла, образованных совокупностью слоев однонаправленного углепластика, на величины их собственных частот, а также критических скоростей флаттера и дивергенции;

- состава и структуры армирования неоднородных по толщине «мокрых» композитных лопастей, образованных силовыми слоями из однонаправленного углепластика и вибропоглощающим слоем «мягкого» вязкоупругого материала, на величины собственных частот и коэффициентов механических потерь, а также на спектры эффективной мощности виброскоростей, средних амплитуд виброскоростей и реакций в зоне соединения ступицы с валом судового движителя.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертационной работы нашли отражение в 7 научных публикациях, в т.ч. в 4 статьях, опубликованных в изданиях, включенных в Перечень изданий, определенный ВАК для публикации результатов научных исследований (из них 2 без соавторов), 1 публикация индексируется в БД SCOPUS и WoS; получены 2 патента на изобретение РФ; докладывались и получили положительную оценку на 10 научно-технических конференциях.

Личный вклад автора заключается в постановке задач исследования, планировании и организации всех этапов работы. Диссертанту принадлежат: интерактивный метод математического моделирования параметров динамического отклика взаимодействующих с водно-воздушной средой деформируемых композитных лопастных систем судовых движителей, основанный на использовании различных стратегий численного решения связанных задач аэрогидроупругости; уточнение метода выбора рациональных составов и структур

армирования погруженных в водную среду композитных лопастей судового движителя, основанного на исследовании собственных частот и собственных форм их затухающих колебаний; результаты численных исследований, обработка и обобщение экспериментальных данных лабораторных исследований.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 133 страницах машинописного текста, включая 54 рисунков, 1 таблицу, 2 страницы оглавления и список литературы из 166 источников

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, описана постановка задачи, сформулированы результаты, выносимые на защиту, а также научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава посвящена анализу методов математического моделирования задач механики композитов и гидродинамики, а также анализу методов их совместного решения.

При моделировании напряженно-деформированного состояния слоистых композитных лопастей применяются различные теории многослойных анизотропных пластин и оболочек. Для построения этих теорий используются методы гипотез (Г. Кирхгофф, С.П. Тимошенко, Е. Рейсснер, Х.М. Муштари); разложения в ряды по степеням поперечной координаты (И.Н. Векуа); асимптотического интегрирования трехмерных уравнений (А.Л. Гольденвейзер); представления о двумерных средах (П.А. Жилин).

В теориях, основанных на методе гипотез, существует два принципиально различающихся подхода: теории, основанные на гипотезе ломаной нормали (В.В. Болотин, Ю.Н. Новичков, Э.И. Григолюк, П.П. Чулков) и теории, основанные на гипотезе эквивалентного слоя (В.В. Васильев, Дж. Редди, В.А. Баженов, А.С. Сахаров). Их основное различие заключается в представлении о пакете слоев как о совокупности независимых слоев или как о целостном эквиваленте. Радикальным способом повышения точности прогнозирования напряженно-деформированного состояния композитных конструкций является использование соотношений теории упругости анизотропного тела (В. Фойгт, С.Г. Лехницкий, К.Ф. Черных, О. Ренд, В. Ровенский), не находивших практического применения до конца XX века. В настоящее время ситуация изменилась в результате возросших возможностей вычислительной техники и доступности коммерческих

программных комплексов, численно реализующих 3D-теории в конечно-элементной постановке.

Отмечено существование двух подходов к прогнозированию предельного состояния композитных конструкций: структурного и феноменологического. Поскольку в настоящее время структурный подход к проблеме разрушения композита представляется трудно реализуемым, то основное внимание уделяется феноменологическому подходу. При феноменологическом подходе неоднородный композит рассматривается как сплошная среда, математическая модель которой строится на основе экспериментально полученных данных без объяснения механизмов, определяющих поведение композита. Для оценки прочности композитной конструкции на основе феноменологических критериев нужно знать параметры ее напряженно-деформированного состояния и свойства материала, сравнение с которыми позволит сделать вывод о сохранении работоспособности конструкции. Специфичность композитных материалов, обладающих широким спектром упругих и прочностных свойств, а также большим количеством механизмов разрушения порождает разнообразие критериев прочности. Распространение среди инженеров получили критерии Е.К. Ашкенази, А.К. Малмейстера, И.И. Гондельблата-В.А. Копнова, Цая-Хилла, Цая-Ву и других исследователей.

Указано одно из важнейших преимуществ полимерных композитов – высокие диссипативные свойства, позволяющие рассматривать демпфирование в композитных конструкциях не как полезный вторичный эффект, а как один из основных параметров проектирования. Описаны три основных подхода к моделированию процессов рассеяния энергии в композитах: принцип упруго-вязкоупругого соответствия в линейной теории вязкоупругости, энергетический метод и использование простейших линейных вязкоупругих моделей.

Анализ методов гидродинамического моделирования гребных винтов (А.Ш. Ачкинадзе, В.Ф. Бавин, Н.Ю. Завадовский, Ю.Л. Левковский, Дж. Карлтон) позволил заключить, что прогнозирование распределения нагрузок по поверхностям деформируемых композитных лопастей целесообразно выполнять на основе методов вычислительной гидродинамики.

При решении связанных задач аэрогидроупругого взаимодействия различают две стратегии: монолитную и параллельную. Монолитная стратегия предполагает решение единой связанной системы уравнений

«жидкость-конструкция» в одном приложении. Параллельная стратегия использует специальное программное обеспечение, связывающего решения в двух параллельно работающих независимых приложениях. В задачах взаимодействия «жидкость-конструкция» всегда подразумевают наличие обратной связи, но различают сильную или слабую степень связанности.

Вторая глава посвящена описанию теоретических основ моделирования аэрогидроупругого взаимодействия. Отмечена сложность прогнозирования отклика композитной конструкции в рамках одной стратегии решения задач взаимодействия. Предложен интерактивный метод использования монолитной и параллельной стратегий как системы приложений, с которыми разработчик систематически взаимодействует, направляя их на решение определенных классов задач (рис 1).

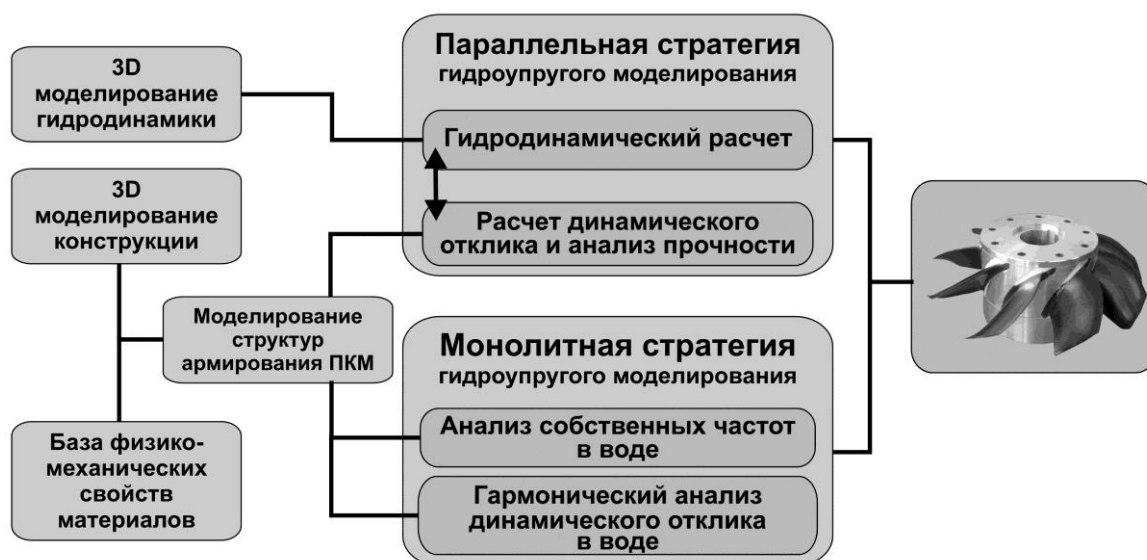


Рис. 1. Блок-схема интерактивного метода взаимодействия задач в процессе гидроупругого моделирования судового движителя с композитными лопастями

На этапе выбора рациональных составов и структур армирования для прогнозирования параметров динамического отклика погруженной в воду диссипативной слоистой композитной конструкции применяется монолитная стратегия. Решение гидроупругой задачи упрощается введением предположения о погружении конструкции в покоящуюся невязкую безвихревую жидкость. Полученные результаты используются в параллельной стратегии решения гидроупругой задачи о расчете конструкции, находящейся в нестационарном потоке вязкой несжимаемой жидкости. Итеративный метод гидроупругого моделирования опирается на программную реализацию ПО ANSYS.

Моделирование движения композитной лопасти выполнялось на основе соотношений динамической теории упругости анизотропного тела. Считалось, что упругие, диссипативные и прочностные свойства ортотропных слоев, компонуемых в состав композитной структуры, определены из соответствующих испытаний параллельно армированных образцов, изготовленных тем же технологическим методом, что и слои рассматриваемой конструкции. Для прогнозирования предельного состояния композитных лопастей использовался тензорно-полиномиальный критерий прочности Цзя-Ву.

Моделирование несжимаемого турбулентного течения выполнялось в рамках решения нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (URANS). Замыкание этой системы уравнений осуществлялось SST-моделью турбулентности Ментера.

Различия монолитной и параллельной стратегий решения задач взаимодействия «жидкость-конструкция» порождают особенности в механизмах реализации граничных условий на контактной поверхности газа/жидкости и упругой конструкции.

В параллельной стратегии системы уравнений URANS и динамической теории упругости решаются отдельно в параллельно работающих приложениях CFD и CSD соответственно. У каждого приложения свои граничные и начальные условия. Согласованное решение на границе Γ в обоих приложениях формируется соблюдением условий равновесия и совместности:

$$\sigma_{ij}(x_k, t)n_i = p(x_k, t), \quad x_k \in \Gamma \quad (1)$$

$$n_i u_F(x_k, t) = n_i u_S(x_k, t), \quad x_k \in \Gamma \quad (2)$$

где t - время, $\sigma_{ij}(x_k, t)$ - напряжения в упругой конструкции, $p(x_k, t)$ - давление жидкости, $u_F(x_k, t)$ - перемещения частиц жидкости, $u_S(x_k, t)$ - перемещения частиц конструкции на границе Γ , n_i - проекции вектора внешней нормали на оси координат. В рамках параллельной стратегии решается слабосвязанная задача. Тогда на текущем временном шаге новое положение границы Γ в приложении CSD определяется полученным на предыдущем временном шаге распределением поля давления $p(t)$ в приложении CFD. Изменение положения границы Γ в приложении CFD осуществляется алгоритмами подвижных сеток перед началом расчета на следующем временном шаге. Обменом полями давления $p(t)$ и перемещений $u_i(t)$ на границе Γ управляет специальное приложение.

В монолитной стратегии вводится предположение об отсутствии импеданса на границе раздела «жидкость – конструкция». Система уравнений, описывающая взаимодействие «жидкость – конструкция» с учетом гармонического характера колебаний, записывается в виде:

$$\left(-\omega^2 \begin{bmatrix} [M_S] & 0 \\ 0 & -\frac{[M_F]}{\rho_F} \end{bmatrix} + i\omega \begin{bmatrix} [C_S] & -[R] \\ -[R]^T & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_S] & 0 \\ 0 & -\frac{[K_F]}{\rho_F} \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{u_F\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_S\} \\ 0 \end{Bmatrix}. \quad (3)$$

Из системы уравнений (3) следует, что помимо внутреннего трения в материале ($[C_S]$) в погруженной в воду конструкции появляется дополнительное, так называемое гидродинамическое демпфирование ($[R]$).

Третья глава посвящена апробации интерактивного метода моделирования динамики взаимодействия композитных конструкций с набегающим потоком несжимаемого турбулентного газа в рамках параллельной стратегии решения.

Рассматривались образованные слоями однонаправленного углепластика Hercules AS/3501-6 пять консольных композитных пластин ортотропной $[0_2^0 / 90^0]_s$ и моноклинных $[+30_2^0 / 0^0]_s$, $[-30_2^0 / 0^0]_s$, $[+45_2^0 / 0^0]_s$, $[-45_2^0 / 0^0]_s$ структур армирования. Известно, что в моноклинных структурах возникает взаимодействие между нормальными и касательными напряжениями и деформациями, исчезающее в ортотропных структурах. Приложение изгибающего момента к моноклинным пластинам порождает изгиб и кручение, а приложение крутящего момента помимо закручивания сопровождается изгибом. Указанное явление проявляется и при исследовании собственных колебаний конструкций. Поэтому спектры собственных изгибных и крутильных колебаний ортотропной пластины $[0_2^0 / 90^0]_s$ разделены, а спектры собственных изгибно-крутильных колебаний моноклинных пластин связаны. Эта связанность сопровождается изменением собственных частот и искажением собственных форм колебаний. Как правило, формы связанных колебаний можно характеризовать как квазиизгибные (со слабо выраженными крутильными деформациями) или как квазикрутильные (со слабо выраженными изгибными деформациями).

Сопоставление полученных расчетных с опубликованными в научной литературе экспериментальными значениями собственных частот и графиками зависимостей критических скоростей флаттера и дивергенции от величины начального угла атаки консольных пластин α_0 позволило установить, что при

$\alpha_0 \leq 4^\circ$ параллельная стратегия решения обеспечивает достаточную для практики точность прогнозирования указанных параметров.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что свойственная моноклинным композитным структурам связанность нормальных и сдвиговых деформаций и напряжений, по существу, представляет собой пассивную обратную связь, открывающую перспективы создания адаптивных конструкций. Одной из таких конструкций является композитное крыло, работающее в набегающем турбулентном потоке несжимаемого газа. Для демонстрации сказанного рассмотрено крыло ($L = 1,2$ м; $c = 0,345$ м; $b = 0,01$ м; $h = 0,0012$ м; $\alpha_0 = 0^\circ$), обшивка которого образована слоями углепластика Ст-11043//DION FR 9300. Структура армирования обшивки: $[90^\circ/\theta_2]_s$, $\theta \in [-90^\circ, 90^\circ]$ (рис. 2).

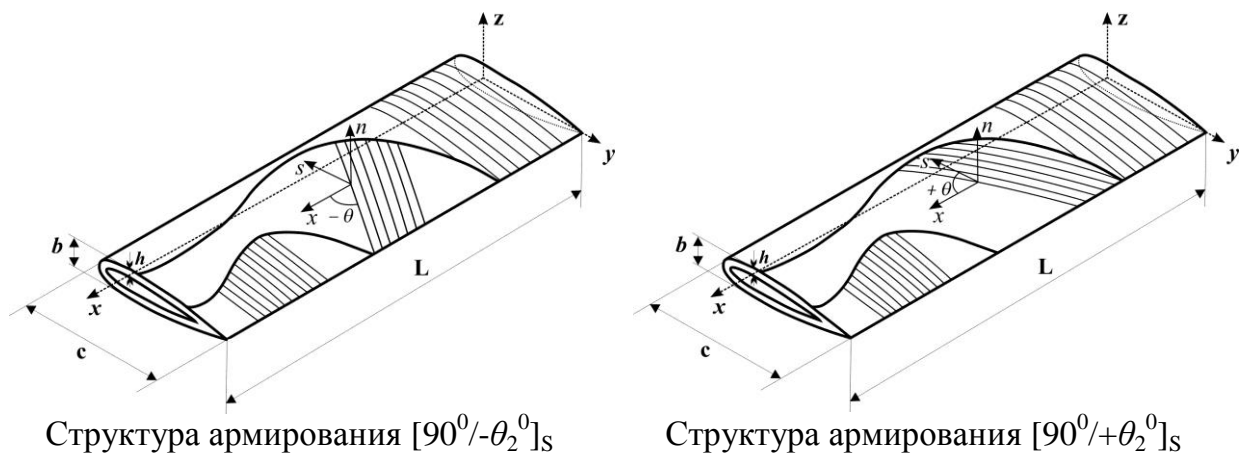


Рис. 2. Схемы армирования обшивки композитного крыла

В процессе проведения численных исследований определялись зависимости собственных частот связанных $f_i = f_i(\theta)$ и парциальных $\bar{f}_i = \bar{f}_i(\theta)$ колебаний, частот флаттера $f_{fl} = f_{fl}(\theta)$ и установившихся автоколебаний $f_{so} = f_{so}(\theta)$ (рис. 3а), а также критических скоростей флаттера $V_{fl} = V_{fl}(\theta)$ и дивергенции $V_{div} = V_{div}(\theta)$ (рис. 3б.) композитного крыла от угла ориентации армирования θ .

Экспериментальные исследования композитных крыльев с обшивками со структурами армирования $[90^\circ/0_2^0]_s$ и $[90^\circ/-20_2^0]_s$ из углепластика Ст-11043/DION FR 9300 проводились в малотурбулентной аэродинамической трубе ФГУП «Крыловский государственный научный центр». На рис. 3 непрерывными линиями изображены результаты расчета, а точки соответствуют экспериментальным данным.

Величины парциальных собственных частот $\bar{f}_i = \bar{f}_i(\theta)$ определялись по

соотношениям для ортотропных структур с использованием «свободных» модулей упругости $E_x = E_x(\theta)$, $E_y = E_y(\theta)$ и «свободных» модулей межслойного сдвига $G_{xz} = G_{xz}(\theta)$, $G_{yz} = G_{yz}(\theta)$. При этом «свободный» модуль сдвига в плоскости армирования $G_{xy} = G_{xy}(\theta)$ заменялся «чистым» модулем сдвига в плоскости армирования $\bar{G}_{xy} = G_{xy}(\theta) [1 - \mu_{x,xy}(\theta) \mu_{xy,x}(\theta)]$, что соответствует полному запрещению изгибных деформаций при кручении крыла. Здесь $\mu_{x,xy}(\theta)$, $\mu_{xy,x}(\theta)$ – коэффициенты взаимного влияния.

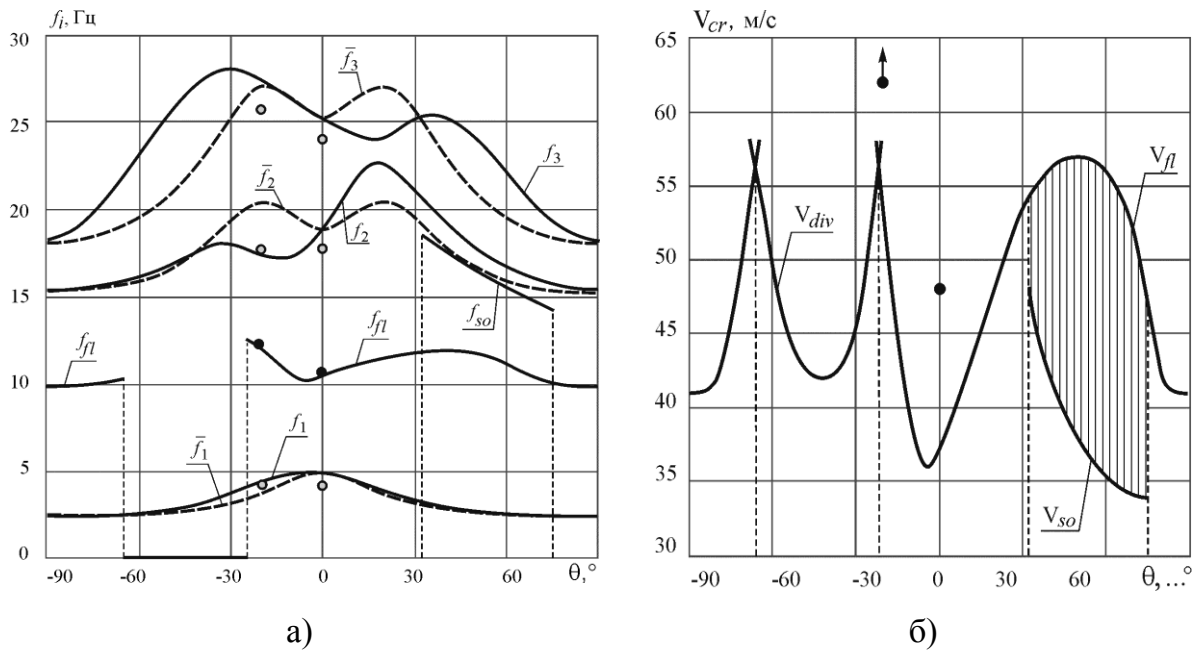


Рис. 3. Зависимость а) связанных и парциальных собственных частот, частот флаттера и автоколебаний, б) критической скорости флаттера/дивергенции от угла ориентации армирования θ

Выбор рациональной структуры армирования основан на анализе взаимного расположения графиков зависимостей собственных частот связанных $f_i = f_i(\theta)$ и парциальных $\bar{f}_i = \bar{f}_i(\theta)$ колебаний от угла ориентации армирования θ (рис. 3а). Показателем повышения или понижения уровня инерционной изгибно-крутильной связанности взаимодействующих мод колебаний является взаимное расположение зависимостей связанных $f_i = f_i(\theta)$ и парциальных $\bar{f}_i = \bar{f}_i(\theta)$ собственных частот при изменении угла θ . Если на отрезке $[\theta_m, \theta_n]$ ($m < n$) для пары связанных частот $f_i(\theta)$, $f_{i+1}(\theta)$ ($f_i(\theta) < f_{i+1}(\theta)$) выполняются неравенства $f_i(\theta) \geq \bar{f}_i(\theta)$ и $f_{i+1}(\theta) \leq \bar{f}_{i+1}(\theta)$ ($\bar{f}_i(\theta) < \bar{f}_{i+1}(\theta)$), то уровень инерционной изгибно-крутильной связанности i -ой и $i+1$ -ой мод колебаний крыла понижается. Приведенные на рис. 3б расчетные зависимости критических скоростей флаттера $V_{fl} = V_{fl}(\theta)$ и дивергенции $V_{div} = V_{div}(\theta)$ от угла ориентации армирования θ , согласующиеся с характером

изменения функций связанных $f_i = f_i(\theta)$ и парциальных $f_i = \bar{f}_i(\theta)$ собственных частот (рис. 3а), демонстрирует влияние ориентации армирования на изгибно-крутильную связанность мод колебаний крыла и, следовательно, на значения критических скоростей флаттера/дивергенции.

Достигнутое соответствие расчетных и экспериментальных значений собственных частот и критических скоростей флаттера/дивергенции композитных крыльев структур армирования $[90^0/0_2^0]_s$ и $[90^0/-20_2^0]_s$ подтверждает достоверность используемого метода моделирования параметров динамического отклика композитного крыла, работающего в набегающем турбулентном потоке несжимаемого газа.

Четвертая глава содержит описание результатов апробации монолитной стратегии гидроупругого моделирования судового движителя с композитными лопастями. Исследованы особенности динамики взаимодействия «жидкость-конструкция» отдельной лопасти и лопастной системы судового движителя.

Рассматривался водометный движитель (рис. 4), имеющий следующие основные характеристики: диаметр проточной части в зоне лопастей $D=0,32$ м; число лопастей рабочего колеса движителя $Z=9$; шаговое отношение $(H/D)=2,35$ при $R=0,7$; число лопастей направляющего аппарата насадки $Z_n=11$; профиль лопастей: $NACA\ 66\ mod\ a=0,8$.

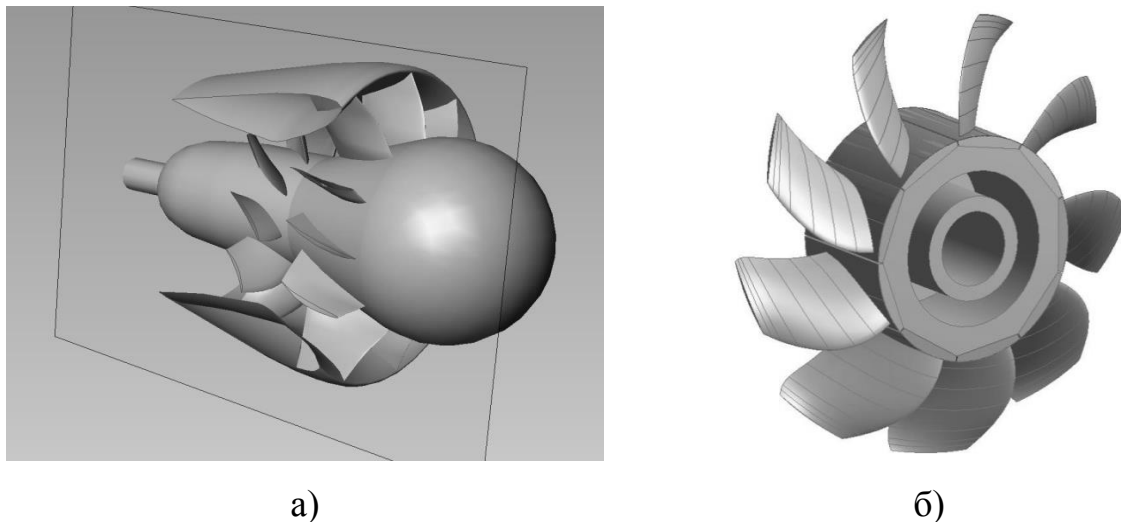


Рис. 4. Конструкция а) водометного движителя и б) его рабочего колеса

Исследования проводились для пяти вариантов конструкции рабочего колеса (РК) водометного движителя (ВД), отличающихся материалом лопастей. Лопасти одного РК были изготовлены из сплава Д16. Лопасти четырех РК представляли собой композитные структуры, основные силовые элементы которых образованы

совокупностью слоев углепластика CM-Preg-C-230/600 CP004 39. Все лопасти имели одинаковую внешнюю геометрию и защемлялись в одинаковых ступицах из сплава Д16.

Достоверность численного моделирования пропульсивных характеристик РК ВД с лопастями из сплава Д16 подтверждена путем сопоставления расчетных диаграмм действия с экспериментальными данными, полученными в большой кавитационной трубе ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

Исследования сходимости численной процедуры определения собственных частот колебаний f_i одиночных «сухих» металлической и композитной лопастей показали, что при $h=0,001$ м погрешность определения собственных частот $\Delta_{f_i} \leq 1\%$ ($i=\overline{1,7}$). Здесь h – величина характерного размера 3D конечных элементов. Численные и экспериментальные исследования «сухого» и «мокрого» РК ВД показали, что конечная жесткость ступицы Z-лопастного РК порождает образование групп близких по величине Z значений собственных частот глобальных мод колебаний.

Достоверность монолитной стратегии гидроупругого моделирования подтверждена хорошим согласованием расчетных и экспериментально определенных значений собственных частот колебаний «мокрого» РК с лопастями из сплава Д16. Расчетные значения собственных частот f_i находились из решения связанной системы уравнений (3) при $\{F_S\}=0$. Влияние присоединенных масс жидкости на собственные частоты колебаний характеризуется коэффициентом уменьшения собственной частоты $\Lambda_i=f_{i\ water}/f_{i\ air}$. Здесь $f_{i\ water}$ – собственная частота i -ой моды связанных колебаний «мокрой» лопасти, $f_{i\ air}$ – собственная частота i -ой моды связанных колебаний «сухой» лопасти. Показано, что на значения Λ_i «мокрого» РК влияют не только величины присоединенных масс, соответствующих каждому тону колебаний, но и соотношение жесткостей лопастей и ступицы. Поэтому учет влияния воды и жесткости ступицы необходимы при моделировании параметров гидроупругого динамического отклика лопастной системы.

Выбор рациональной структуры армирования, обеспечивающей минимальную изгибно-крутильную связанность композитной лопасти РК ВД, выполнялся в логике метода моделирования параметров аэроупругого деформирования адаптивного композитного крыла. Расчетные зависимости первых четырех связанных $f_i = f_i(\theta)$ и парциальных $f_i = \bar{f}_i(\theta)$ собственных частот «сухой» и «мокрой» композитных лопастей структуры армирования $[90^0_1/\theta_{n-1}]_S$ ($\theta \in [-90^0, 90^0]$)

в зависимости от угла ориентации однонаправленных слоев углепластика θ показаны на рис. 5. Анализ приведенных на рис. 5а результатов показал, что минимум изгибно-крутильной связанности первой и второй мод колебаний «сухой» композитной лопасти обеспечивает структура армирования $[90^0_1/-10^0_{n-1}]_S$. Погружение лопасти в воду, сопровождающееся изменением собственных частот и собственных форм колебаний, обусловленным влиянием присоединенных масс жидкости, потребовало уточнения рациональной структуры армирования: $[90^0_1/-20^0_{n-1}]_S$ (рис. 5б).

Экспериментальные исследования диссипативных характеристик «сухой» и «мокрой» композитных лопастей из однонаправленного углепластика CM-Preg-C-230/600 CP004 39 структур армирования $[90^0/-10^0_{n-1}]_S$ и $[90^0/-20^0_{n-1}]_S$ показали, что величины коэффициентов механических потерь трех низших тонов колебаний не превышают значений $\eta_{\max} = 0,003$ и $\eta_{\max} = 0,006$ соответственно. Повышение диссипативных характеристик судового движителя возможно за счет создания неоднородных по толщине композитных лопастей, в состав которых интегрирован слой «мягкого» изотропного вязкоупругого материала.

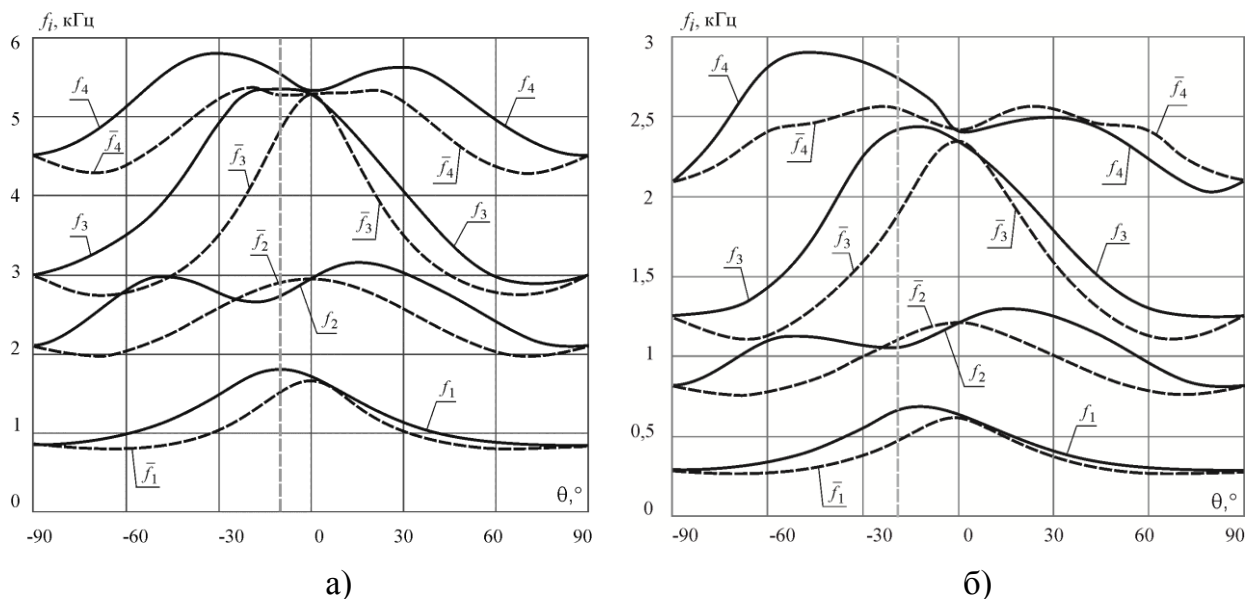


Рис 5. Зависимости связанных и парциальных собственных частот а) «сухой» и б) «мокрой» композитных лопастей структуры армирования $[90^0_1/\theta_{n-1}]_S$ от угла θ

Оценка диссипативных характеристик неоднородных по толщине композитной лопасти получена путем исследования ее собственных затухающих колебаний. Исследования выполнялись для изотермических условий в предположении идеальной упругости материала силовых слоев и учета

температурно-частотной зависимости упруго-диссипативных свойств изотропного вязкоупругого материала.

Температурно-частотная зависимость упруго-диссипативных свойств «мягкого» изотропного вязкоупругого материала в процессе расчета при изменении частоты порождает необходимость корректировки элементов матрицы жесткости неоднородной структуры C . Для преодоления этого затруднения задается некоторый начальный диапазон $[\omega_{\text{start}}, \omega_{\text{finish}}]$, содержащий искомую частоту. Затем вычисляются упруго-диссипативные свойства вязкоупругих слоев при некоторой фиксированной частоте из этого диапазона, например, для $[\omega_{\text{start}}, \omega_{\text{finish}}]/2$, после чего решается задача на собственные значения с вычисленной «постоянной» матрицей C . Далее берётся некоторая небольшая окрестность полученной частоты и повторяется описанная процедура до тех пор, пока не будет достигнута желаемая точность.

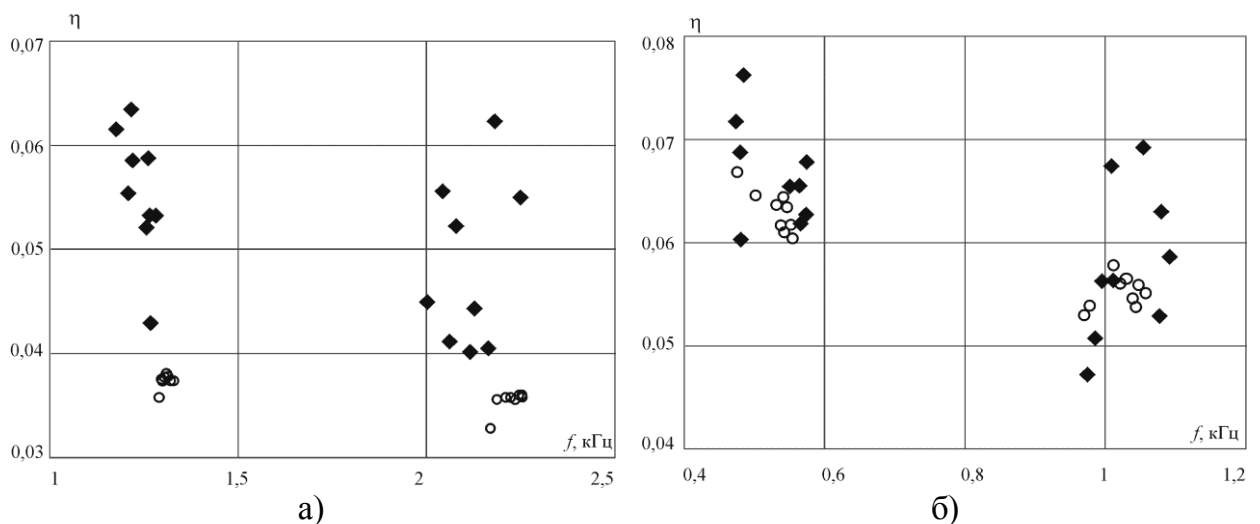


Рис. 6. Значения коэффициентов механических потерь а) «сухих» и б) мокрых РК ВД с неоднородными по толщине композитными лопастями:

◆ - эксперимент; ○ - расчет

Достоверность предложенного алгоритма вычисления собственных частот и коэффициентов механических потерь неоднородных по толщине структур подтверждена хорошим соответствием результатов, вычисленных по предложенному алгоритму, с опубликованными результатами решения комплексной задачи на собственные значения. Еще одно подтверждение достоверности указанного алгоритма получено путем сравнения расчетных и экспериментальных величин собственных частот и коэффициентов механических потерь РК ВД с неоднородными по толщине композитными лопастями

$[90^0_1/0^0_4/VPNS_3/0^0_{n-8}]_S$, в состав которых включен слой «мягкого» вязкоупругого материала (рис. 6). Силовые слои лопастей изготовлены из однонаправленного углепластика CM-Preg-C-230/600 CP004 39. Результаты, приведенные на рис. 6 свидетельствуют о том, что введение в состав лопастей слоя «мягкого» вязкоупругого материала сопровождается увеличением диссипативных свойств РКВД на один десятичный порядок. Сопоставление приведенных на рис. 6 расчетных и экспериментальных величин коэффициентов механических потерь «сухих» и «мокрых» РКВД демонстрирует значимость вклада гидродинамического демпфирования в диссипативные характеристики конструкции.

Выбор динамически рациональной конструкции лопасти выполнялся на основе использования интегрального показателя, в качестве которого выбрана эффективная мощность виброскоростей W :

$$W = 101g \frac{W_{abs}}{W_{ref}},$$

где $W_{abs} = \rho_w c_w \int_S |v_{S,n}|^2 dS$, ρ_w - плотность жидкости, c_w - скорость звука в жидкости,

$v_{S,n}$ - нормальная составляющая виброскорости к поверхности dS ,
 $W_{ref} = 10^{-12}$ Вт - пороговое значение.

Гармонический анализ «мокрых» РКВД выполнялся с двумя видами возбуждения: 1) статическим давлением $p=1$ Па, приложенным к поверхностям лопастей и ступицы; 2) равномерно распределенной по нагнетающей поверхности каждой лопасти нагрузкой, главный вектор которой $P=1$ Н направлен вдоль оси вала движителя.

Расчетные треть-октавные спектры $W(f)$ «мокрых» РКВД с лопастями из сплава Д16 (линия 1) и с неоднородными по толщине композитными лопастями ортотропной ($[90^0_1/0^0_4/VPNS_3/0^0_{n-8}]_S$) (линия 2) и моноклинной $[90^0_1/0^0_4/VPNS_3/-20^0_{n-8}]_S$ (линия 3) структур армирования представлены на рис. 7. Из приведенных результатов следует, что за счет высоких диссипативных характеристик РКВД с ортотропными композитными лопастями в диапазоне «кромочных» частот $f \in [1,5; 6,0]$ кГц обеспечивает снижение уровней $W(f)$ на 5-15 дБ по сравнению с РКВД с лопастями из сплава Д16. Переход на РКВД с моноклинными композитными лопастями дополнительно снижает уровни $W(f)$ на 3-4 дБ в диапазоне $f \in [0,4; 1,5]$ кГц.

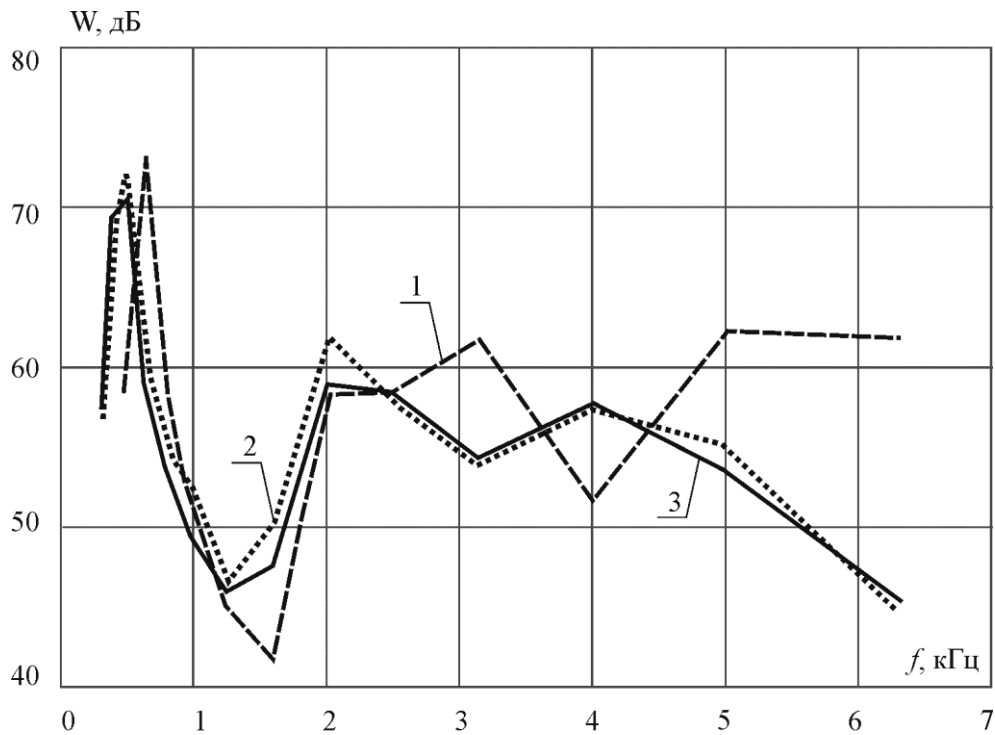


Рис. 7. Расчетные уровни треть-октавных спектров $W(f)$ «мокрых» РК ВД

Динамический анализ РК ВД в неоднородном турбулентном потоке выполнен на основе параллельной стратегии совместного решения гидродинамической (CFD) и упругой задач (CSD). Расчетные спектры нестационарных средних амплитуд виброскоростей установившихся колебаний и нестационарных амплитуд реакций в зоне соединения ступицы с валом (рис. 8) подтверждают предпочтительность использования для РК ВД неоднородных по толщине композитных лопастей (черные линии) по сравнению с лопастями из сплава Д16 (серые линии).

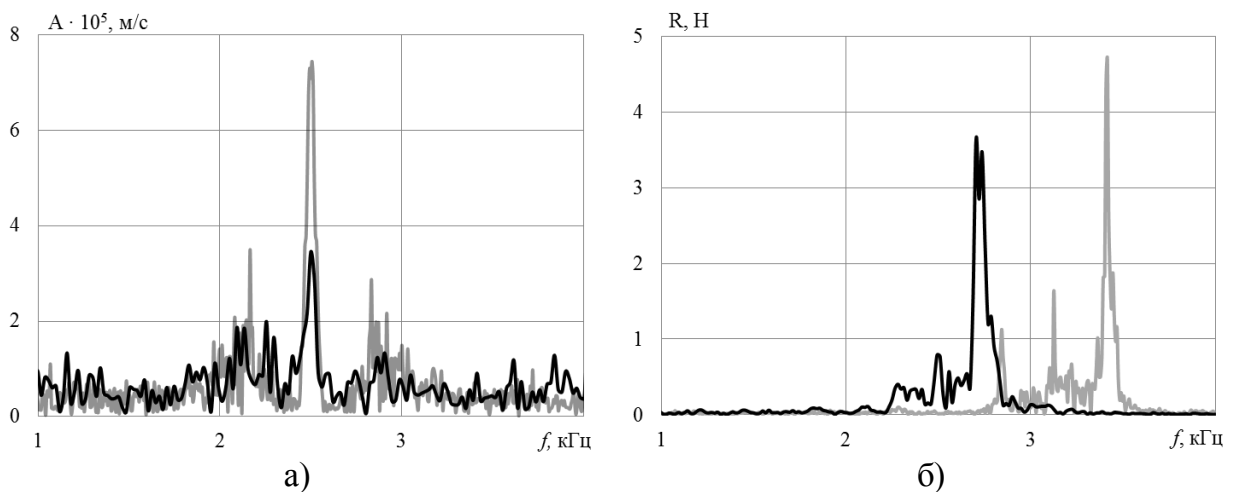


Рис. 8. Спектры а) средних амплитуд виброскоростей на лопастях, б) реакций в зоне соединения ступицы с валом

Считалось, что находящаяся под действием максимальной гидродинамической нагрузки композитная лопасть достигает предельного состояния, если хотя бы в одной ее точке удовлетворяется критерий прочности Цая Ву. У всех приведенных на рис. 9 графиков зависимостей коэффициентов безопасности по напряжениям по критерию Цая Ву композитных лопастей $K_6 = K_6(\theta)$ существует глобальный минимум при значениях углов ориентации армирования θ , соответствующих минимуму изгибно-крутильной связанности первой и второй мод их колебаний. Следовательно, минимизация уровня изгибно-крутильной связанности композитной лопасти сопровождается повышением запаса ее прочности. Переход от структуры армирования $[\theta_n]$ к структуре $[90^0_1/\theta_{n-1}]_S$ увеличивает запас прочности композитной лопасти. В тоже время частичное замещение армирующих слоев слоями «мягкого» вязкоупругого материала ведет к некоторому уменьшению прочности.

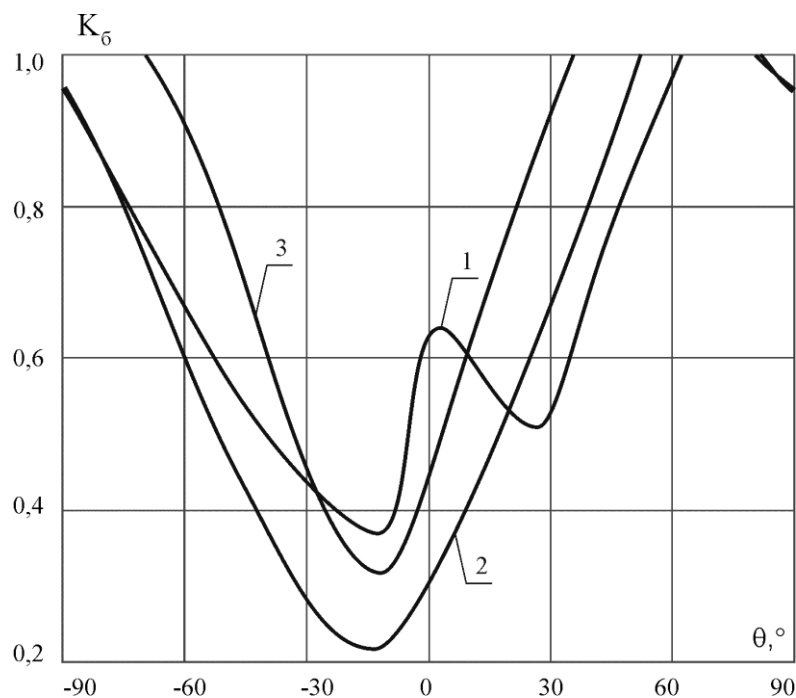


Рис. 9. Зависимости коэффициентов безопасности по напряжениям по критерию Цая Ву композитных лопастей структур армирования $[\theta_n]$ (кривая 1), $[90^0_1/\theta_{n-1}]_S$ (кривая 2) и $[90^0_1/\theta_{n-4}/VPNS_3/\theta_{n-8}]_S$ (кривая 3) от ориентации армирования

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты диссертационной работы заключаются в следующих положениях:

1. Выполнен анализ существующих методов математического моделирования задач механики композитов и гидродинамики

2. Разработан интерактивный метод математического моделирования параметров динамического отклика взаимодействующих с водно-воздушной средой деформируемых композитных лопастных систем судовых движителей, основанный на использовании различных стратегий численного решения связанных задач аэрогидроупругости. Достоверность предложенного метода подтверждена хорошим согласованием расчетных и экспериментальных значений параметров динамического отклика (собственных частот и собственных форм колебаний, коэффициентов механических потерь, критических скоростей флаттера и дивергенции, кривых действия) исследуемых конструкций.

3. Уточнен метод выбора рациональных составов и структур армирования погруженных в водную среду композитных лопастей судовых движителей, основанный на исследовании собственных частот и собственных форм их затухающих колебаний.

4. Исследовано влияние:

– структуры армирования консольной пластины и обшивки адаптивного крыла, образованных совокупностью слоев однонаправленного углепластика, на величины их собственных частот, а также критических скоростей флаттера и дивергенции;

– состава и структуры армирования неоднородных по толщине «мокрых» композитных лопастей, образованных силовыми слоями из однонаправленного углепластика и вибропоглощающим слоем «мягкого» вязкоупругого материала, на величины собственных частот и коэффициентов механических потерь, а также на спектры эффективной мощности виброскоростей, средних амплитуд виброскоростей и реакций в зоне соединения ступицы с валом судового движителя.

5. Показано снижение амплитуд вибрации и увеличение запаса прочности судового движителя, обусловленное минимизацией изгибно-крутильной связанности композитных лопастей за счет выбора рациональных структур их армирования.

6. Установлено снижение уровней треть октавного спектра мощности виброскоростей судового движителя с композитными лопастями на 3-15 дБ по сравнению с металлическим прототипом в широком диапазоне частот, порождаемое комплексом мероприятий, направленных на минимизацию изгибно-крутильной связанности и повышение диссипативных характеристик композитных лопастей.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях рекомендованных ВАК при Минобрнауки России

1. Любомиров Я.М., Ярцев Б.А. Изгибно-крутильный флаттер консольной композитной пластины в потоке несжимаемого газа // Труды Крыловского государственного научного центра. 2014. Вып. 83(367). С. 89-108.
2. Любомиров Я.М., Ярцев Б.А. Аэроупругий отклик анизотропного композитного крыла. // Труды Крыловского государственного научного центра. 2015. Вып. 90 (374). С. 171-178.
3. Любомиров Я.М. Аэроупругий отклик анизотропного композитного крыла под воздействием турбулентного течения // Труды Крыловского государственного научного центра. 2016. Вып. 91 (375). С. 119-124.
4. Любомиров Я.М. Гидроупругое моделирование – эффективный инструмент разработки композитных лопастей судовых движителей // Труды Крыловского государственного научного центра. 2022. Специальный выпуск 1. С. 92-97.

В изданиях индексируемых в БД SCOPUS и WoS:

5. Lyubomirov Y., Yartsev B. Classical flutter anisotropic composite wing // 2015 International Conference on Mechanics – Seven Polyakhov’s Readings: Proceedings. Saint Petersburg, 2015. P. 7106750.

В других изданиях:

6. Lyubomirov Ya.M., Yartsev B.A. Prospects for application of composite blades for reducing the levels of hydroelastic vibrations of ship propellers // XI International Conference NAVY AND SHIPBUILDING NOWADAYS NSN’2021. June 24-25, 2021. St. Petersburg, Russia. Proceedings. Conference theme Hydrodynamics & Strength in Modern Shipbuilding. P. 163-168.
7. Shaposhnirov V.M., Yartsev B.A., Lyubomirov Ya.M. Adaptive composite structures // XIII International Conference NAVY AND SHIPBUILDING NOWADAYS NSN’2024. June 20-21, 2024. St. Petersburg, Russia. Proceedings. Conference theme Construction materials. Strength and structural mechanics. P. 9-18.

Патенты:

1. Узел соединения композитной лопасти с металлической ступицей гребного винта: пат. 2667999 Рос. Федерация / Лысенко А.П., Любомиров Я.М., Ярцев Б.А. № 2017136949; заявл. 19.10.2017; опубл. 25.09.2018, Бюл. № 27. 9 с.
2. Композитная лопасть гребного винта: пат. 2709865 Рос. Федерация / Лысенко А.П., Любомиров Я.М., Ярцев Б.А. № 2019113630; заявл. 30.04.2019; опубл. 24.12.2019, Бюл. № 36. 10 с.