

УДК 539.3+533.662.3:678.067
EDN: OUSFII

Я.М. Любомиров, Б.А. Ярцев 
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ВАЛИДАЦИЯ МЕТОДА ГИДРОУПРУГОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ЛОПАСТНЫХ СИСТЕМ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования являются судовые движители, состоящие из изотропной металлической ступицы и анизотропных композитных лопастей. Композитные лопасти могут быть как квази-однородными, так и неоднородными по толщине. Цель работы – валидация метода гидроупругого моделирования композитных лопастных систем на примере масштабной конструкции рабочего колеса водометного движителя.

Материалы и методы. Численное и экспериментальное исследование пропульсивных характеристик и параметров динамического отклика композитных лопастных систем судовых движителей.


Основные результаты. Выполненные численные и экспериментальные исследования позволили обосновать достоверность метода гидроупругого моделирования композитных лопастных систем судовых движителей. Приведена оценка сходимости численной процедуры нахождения собственных частот и собственных форм связанных колебаний «сухих» одиночных лопастей из сплава Д16 и однонаправленного углепластика. Оценка достоверности математической модели и метода численного решения, выполненная путем сопоставления расчетных и экспериментальных значений пропульсивных и диссипативных характеристик, а также монолитной стратегии гидроупругого моделирования рабочего колеса водометного движителя продемонстрировала их хорошее согласование.

Заключение. В продолжении статьи будут обсуждены результаты апробации разработанного метода гидроупругого моделирования композитных лопастных систем судовых движителей.

Ключевые слова: углепластик, вязкоупругий материал, рабочее колесо, лопасть, судовой движитель.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 539.3+533.662.3:678.067
EDN: OUSFII

Ya.M. Lyubomirov, B.A. Yartsev 
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

VALIDATION OF HYDROELASTIC SIMULATION METHOD FOR COMPOSITE BLADE SYSTEMS

Object and purpose of research. This paper discusses marine propulsors consisting of isotropic metal hub and anisotropic composite blades. The thickness of these blades can be both quasi-uniform and non-uniform. The purpose of the study was to validate the method of hydroelastic simulation for composite blade system on a case study of a scaled model for waterjet impeller.

Materials and methods. Numerical and experimental study of propulsion performance and dynamic response parameters of composite blade systems for marine propulsors.

Main results. Numerical and experimental studies performed by the authors have confirmed the reliability of suggested hydroelastic simulation method for composite blade systems of marine propulsors. The paper includes convergence assessment of the numerical calculation procedure for natural frequencies and modes of coupled vibrations of “dry” solitary blades made of D16 alloy and unidirectional carbon-reinforced plastic (CRP). Reliability of the mathematical model and numerical calculation method was estimated through comparison of calculation results and experimental data for propulsion and dissipation performance, as well as monolithic strategy of hydroelastic simulation for waterjet impeller, demonstrating their good correlation with each other.

Для цитирования: Любомиров Я.М., Ярцев Б.А. Валидация метода гидроупругого моделирования композитных лопастных систем. Труды Крыловского государственного научного центра. 2025; 4(414): 79–86.

For citations: Lyubomirov Ya.M., Yartsev B.A. Validation of hydroelastic simulation method for composite blade systems. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2025; 4(414): 79–86 (in Russian).

Conclusion. The next part of this article will discuss appraisal results for the developed method of hydroelastic simulation for composite blade systems of marine propulsors.

Keywords: carbon-reinforced plastic (CRP), viscoelastic material, impeller, blade, marine propulsor.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Данная работа посвящена оценке достоверности предложенного в [1] метода гидроупругого моделирования композитных лопастных систем. Исследования выполнялись на примере масштабной конструкции рабочего колеса водометного движителя (рис. 1), имеющего следующие технические характеристики:

- диаметр проточной части в зоне лопастей $D = 0,32$ м;
- число лопастей $Z = 9$;
- шаговое отношение $(H/D) - 2,35$ при $R = 0,7$;
- число лопастей направляющего аппарата насадки $Z_n = 11$;
- профиль лопастей: $NACA\ 66\ mod\ a = 0,8$.

Влияние кормовой части судна моделировалось сферой, касательные к поверхности которой совпадают с касательными к поверхности ступицы направляющего аппарата насадки.

В качестве материала лопастей рабочего колеса рассматривались сплав Д16 ($\rho = 2770\ \text{кг/м}^3$; $E = 71\ \text{ГПа}$; $G = 26,7\ \text{ГПа}$; $\nu = 0,33$) и композитные структуры, komponуемые из слоев однонаправленного углепластика CM-Preg-C-230/600 CP004 39 ($E_1 = 120\ \text{ГПа}$; $E_2 = E_3 = 8\ \text{ГПа}$; $G_{12} = G_{13} = 4,4\ \text{ГПа}$; $G_{23} = 2,7\ \text{ГПа}$; $\nu_{12} = 0,27$; $\eta_1 = 9 \cdot 10^{-4}$; $\eta_2 = \eta_3 = 9,6 \cdot 10^{-3}$; $\eta_{12} = \eta_{13} = 1,6 \cdot 10^{-2}$; $\eta_{23} = 1,5 \cdot 10^{-2}$; $\rho = 1500\ \text{кг/м}^3$; $h_{ply} = 2 \cdot 10^{-4}$ м) и вязкоупругого материала ВПС-2,5 (рис. 2). Все лопасти имели одинаковую внешнюю геометрию и защемлялись в одинаковых ступицах из сплава Д16. Различие масс вариантов конструкции рабочего колеса водометного движителя в основном обусловлено различием масс лопастей вследствие разницы плотностей углепластика CM-Preg-C-230/600 CP004 39 и алюминиевого сплава Д16. Массы ступиц рабочего колеса с лопастями из сплава Д16 и с лопастями из углепластика приблизительно равны.

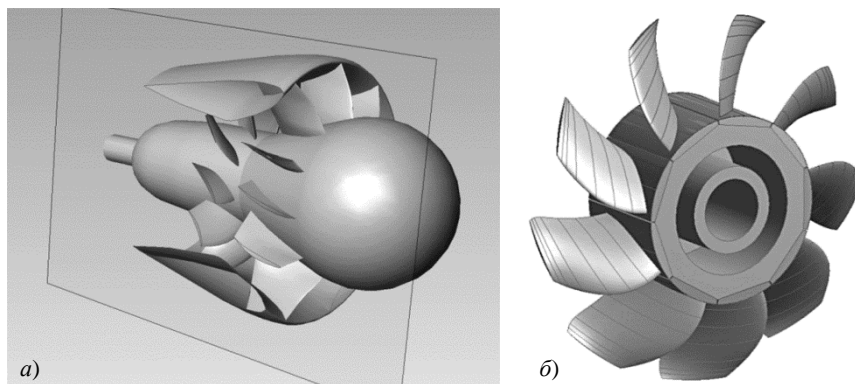


Рис. 1. Конструкция а) водометного движителя и б) рабочего колеса

Fig. 1. Components of waterjet unit itself (a) and its impeller (b)

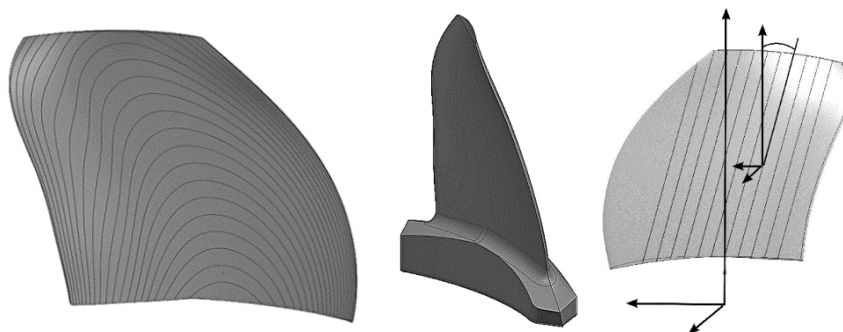


Рис. 2. Композитная лопасть судового движителя

Fig. 2. Composite blade of marine propulsor

1. Сходимость численной процедуры решения

1. Convergence of numerical solution

Сходимость численной процедуры нахождения собственных частот и собственных форм связанных колебаний эксплуатируемой в воздушной среде («сухой») одиночной лопасти исследовалась путем варьирования характерного размера 3D конечных элементов (КЭ) $h \in [0,01; 0,0002]$ м. Для одиночной лопасти из сплава Д16 результаты исследования приведены на рис. 3а, рис. 4. Из приведенных на рис. 3а зависимостей следует, что для «сухой» лопасти из сплава Д16 наблюдается монотонная схо-

димость величин собственных частот и форм собственных колебаний по мере уменьшения характерного размера h 3D КЭ сетки. Анализ полученных результатов показал, что для 12 низших тонов колебаний лопасти из сплава Д16 при $h = 0,001$ м величина относительной погрешности определения собственных частот $\Delta_i = f_i(h)/f_i(h) = 0,0002 - 1$ удовлетворяет неравенству $\Delta_i < 0,005$ (точечная линия на рис. 3а). Сходимость собственных форм колебаний контролировалась визуально (рис. 4).

Результаты исследования сходимости численной процедуры нахождения собственных частот и собственных форм связанных колебаний одиночной «сухой» композитной лопасти структуры армирова-

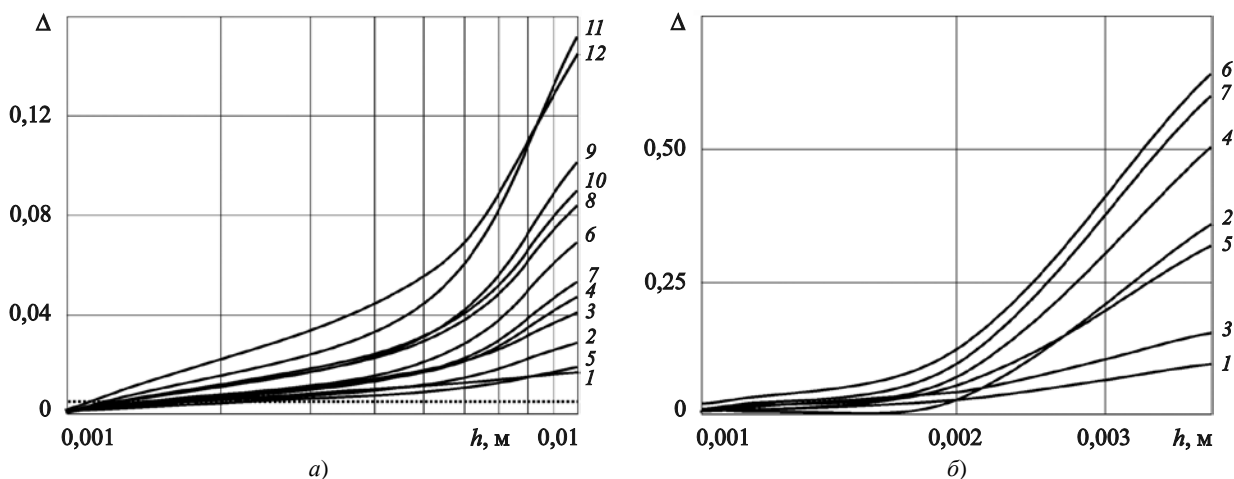


Рис. 3. Сходимость процедуры нахождения низших собственных частот одиночной «сухой» лопасти: а) из сплава Д16; б) из композитного материала структуры армирования $[90^\circ/0^\circ_{n-1}]_s$

Fig. 3. Convergence of the calculation procedure for lowest natural frequencies of solitary “dry” blade made of а) D16 alloy; б) composite material with stacking sequence $[90^\circ/0^\circ_{n-1}]_s$

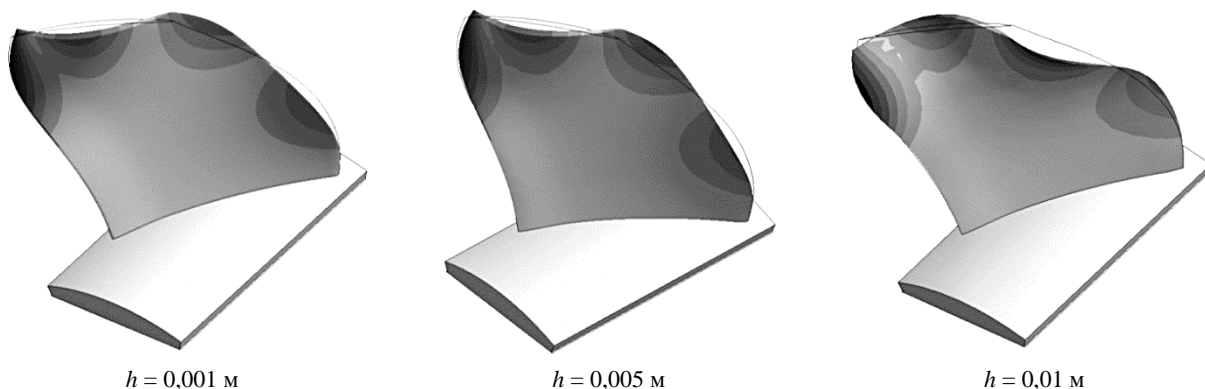


Рис. 4. Изменение форм собственных колебаний одиночной «сухой» лопасти из сплава Д16 в зависимости от характерного размера h 3D КЭ сетки

Fig. 4. Natural vibration modes of solitary “dry” blade made of D16 alloy as functions of characteristic size h of finite-element 3D mesh

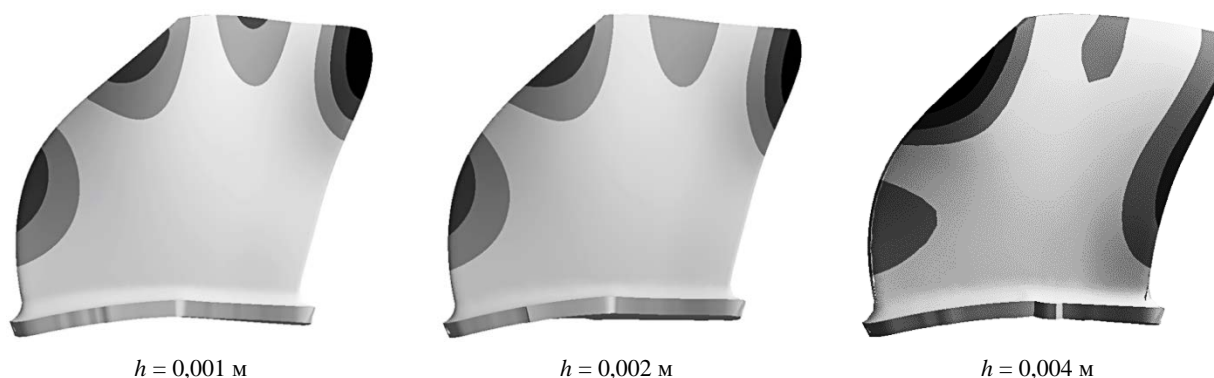


Рис. 5. Изменение форм собственных колебаний одиночной «сухой» лопасти структуры армирования $[90^\circ_1/0^\circ_{n-1}]_s$ в зависимости от характерного размера h 3D КЭ сетки

Fig. 5. Natural vibration modes of solitary “dry” blade made of composite material with stacking sequence $[90^\circ_1/0^\circ_{n-1}]_s$ as functions of characteristic size h of finite-element 3D mesh

ния $[90^\circ/0^\circ_{n-1}]_s$, образованной слоями однонаправленного углепластика CM-Preg-C-230/600 CP004 39, показаны на рис. 3б, рис. 5.

Анализ приведенных на рис. 3б, рис. 5 данных позволяет отметить, что уменьшение характерного размера h КЭ-сетки сопровождается монотонной сходимостью численной процедуры нахождения собственных частот и собственных форм связанных колебаний одиночной «сухой» композитной лопасти структуры армирования $[90^\circ/0^\circ_{n-1}]_s$. В этом случае сходимость более чувствительна к изменению величины h . Например, для седьмого тона связанных колебаний «сухой» композитной лопасти при $h = 0,004$ величина $\Delta_7 = 0,6$, в то время как для «сухой» лопасти из сплава Д16 при $h = 0,005$ величина $\Delta_7 = 0,0175$.

Тем не менее величина относительной погрешности определения собственных частот для семи низших тонов колебаний композитной лопасти не превышает 1,0 % при $h \leq 0,001$ м. Этот характерный размер дискретизации использовался в дальнейших расчетах как для лопасти из сплава Д16, так и для лопасти, образованной совокупностью слоев однонаправленного углепластика CM-Preg-C-230/600 CP004 39.

2. Достоверности моделирования пропульсивных характеристик

2. Reliability of propulsion performance simulations

Оценка достоверности численного моделирования пропульсивных характеристик выполнялась путем

сопоставления расчетных диаграмм действия рабочего колеса водометного движителя с лопастями из сплава Д16 с экспериментальными данными, полученными в большой кавитационной трубе ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

Внешняя неподвижная расчетная область представляет собой цилиндр диаметром, равным трем диаметрам проточной части насадки в зоне лопастей (рис. 1а). Внутри проточной части насадки в зоне лопастей создавался дополнительный домен, в котором расчет выполнялся в подвижной системе координат, вращающейся с частотой, равной частоте вращения рабочего колеса. Из-за ограниченности вычислительных ресурсов расчетная сетка составляла ~1 млн узлов с минимальным ортогональным качеством 0,136, обеспечивая достаточную скорость сходимости гидродинамического расчета. На всех поверхностях водометного движителя установлены граничные условия «прилипания» жидкости. На боковых поверхностях цилиндрической расчетной области установлены условия непроницаемости. На входящей поверхности перед водометным движителем задавалась скорость набегающего потока с интенсивностью турбулентности 5 %. На выходящей поверхности установлены свободные граничные условия. На поверхностях вращающегося домена определены интерфейсные поверхности.

Результаты сравнения расчетных и экспериментальных кривых действия в зависимости от величины относительной поступи ($J = V/nD$, V – скорость набегающего потока) представлены на рис. 6. На этом рисунке точками нанесены экспериментальные значения коэффициента упора $K_T = T/\rho n^2 D^4$

(T – упор гребного винта, ρ – плотность воды, n – число оборотов гребного винта в секунду, D – диаметр проточной части в зоне лопастей) и коэффициента крутящего момента $K_Q = Q/\rho n^2 D^5$ (Q – крутящий момент гребного винта); сплошными линиями обозначены соответствующие расчетные величины.

Сопоставление приведенных на рис. 6 результатов позволяет отметить хорошее согласование расчетных и экспериментальных значений величин K_T при удовлетворительном согласовании величин K_Q в рабочем диапазоне относительной поступи $J = 0,9-1,2$. Несколько завышенная относительно экспериментальных данных расчетная величина K_Q (~4,5 %) является следствием неучета ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое на лопасти, порожденном необходимостью выполнения гидродинамического расчета на грубых сетках, обусловленной ограниченностью вычислительных ресурсов. Тем не менее можно считать, что численная оценка стационарной нагрузки на лопастях выполняется с удовлетворительной точностью для последующего использования в расчетах параметров упругого деформирования конструкции.

3. Достоверность монолитной стратегии гидроупругого моделирования

3. Reliability of monolithic strategy for hydroelastic simulation

Оценка достоверности монолитной стратегии гидроупругого моделирования выполнялась путем сопоставления расчетных и экспериментальных значений собственных частот колебаний «мокрого» (погруженного в воду) рабочего колеса водометного движителя с лопастями из сплава Д16. Экспериментальные значения собственных частот рабочего колеса, находящегося на дне открытого резервуара с водой, определялись по спектрам виброскоростей каждой из девяти лопастей. Расчетная область представляла собой сферу, радиус которой равен диаметру рабочего колеса. 3D КЭ-модель «мокрого» рабочего колеса закреплялась в трех точках основания ступицы, что соответствовало условиям эксперимента. На границе контакта «вода – упругое тело» задавалась интерфейсная поверхность. Считалось, что на внешней границе жидкости давление равно нулю.

На рис. 7 представлены результаты сопоставления экспериментальных спектров виброскоростей и расчетных собственных частот «мокрого» рабочего колеса с лопастями из сплава Д16. Для удобства сравнения девяти спектров на рис. 7 приведены

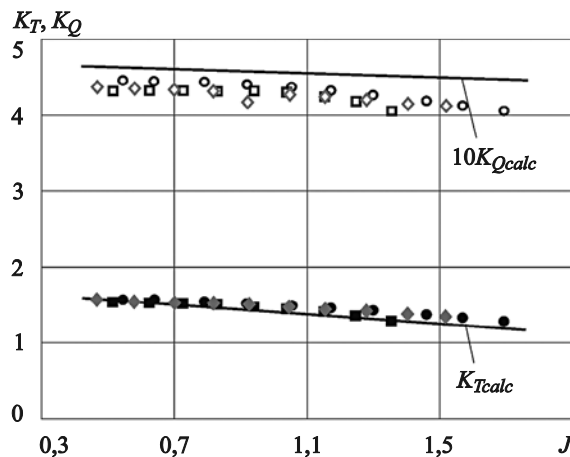


Рис. 6. Сравнение расчетных и экспериментальных кривых действия рабочего колеса водометного движителя

Fig. 6. Calculation results vs experimental data for performance curves of waterjet impeller

огнивающие минимального и максимального отклика. Расчетные значения собственных частот изображены точками на горизонтальной линии над огнивающими зависимостями минимального и максимального отклика. Т.к. рабочее колесо содержит девять лопастей, собственные частоты образуют кратные их числу группы с близкими значениями. Появление таких групп обусловлено конечной жесткостью ступицы рабочего колеса. Для удобства сравнения группы расчетных собственных частот подсвечены вертикальными серыми областями.

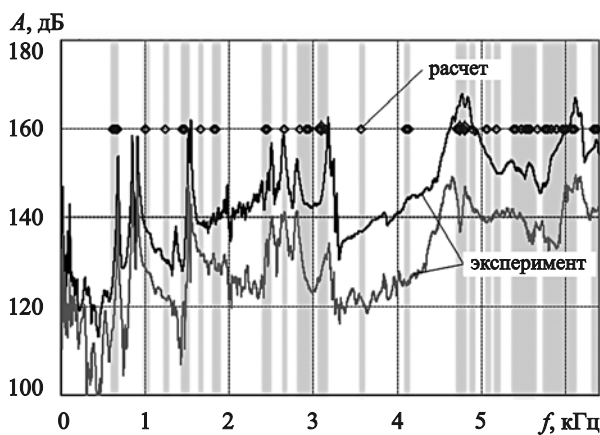


Рис. 7. Результаты оценки достоверности собственных частот «мокрых» лопастей рабочего колеса, изготовленных из сплава Д16

Fig. 7. Reliability assessment results for natural frequencies of “wet” impeller blades made of D16 alloy

Из сопоставления представленных расчетных и экспериментальных значений собственных частот «мокрых» лопастей рабочего колеса следует вывод о том, что используемая монолитная стратегия моделирования гидроупругого взаимодействия позволяет с достаточной точностью в широком диапазоне определять величины собственных частот «мокрых» лопастей, включая диапазон кромочных частот.

4. Достоверность моделирования диссипативных характеристик

4. Reliability of dissipation performance simulations

Оценка достоверности предложенного в [1] метода прогнозирования диссипативных характеристик композитных структур выполнялась путем сравнения расчетных и экспериментальных значений собственных частот и коэффициентов механических потерь неоднородной по толщине композитной лопасти, в состав которой включен слой «мягкого» вязкоупругого материала.

Неоднородная по толщине композитная лопасть состоит из жесткого сердечника, на поверхность которого нанесен слой «мягкого» вязкоупругого материала ВПС-2,5 толщиной $h_{[2]} = 3h_{lay}$, изолированный от внешней среды жестким прикрывающим слоем. Здесь h_{lay} – толщина слоя однонаправленного

углепластика. Жесткий сердечник структуры армирования $[\theta_n]$ и жесткий прикрывающий слой структуры армирования $[90^\circ/0^\circ_4]_s$ образованы совокупностью однонаправленных слоев углепластика CM-Preg-C-230/600 CP004 39. Частотные зависимости вещественной части комплексного модуля упругости и коэффициента механических потерь «мягкого» вязкоупругого материала ВПС-2,5 [2] показаны на рис. 8.

На рис. 9 приведены результаты расчетных (прозрачные точки, соединенные сплошной линией) и экспериментальных (черные точки) исследований собственных частот и коэффициентов механических потерь безопорной «сухой» неоднородной по толщине композитной лопасти при температуре окружающей среды $T = 23^\circ\text{C}$, представленные в виде частотной зависимости коэффициента механических потерь. Сопоставляя величины коэффициентов механических потерь «сухой» лопасти, образованной совокупностью однонаправленных слоев углепластика CM-Preg-C-230/600 CP004 39 $[\theta_n]$, $\eta \in [0,0032; 0,0036]$, и «сухой» неоднородной по толщине композитной лопасти, отметим, что включение в состав последней слоя «мягкого» вязкоупругого материала сопровождается увеличением диссипативных свойств конструкции на один десятичный порядок.

Сравнение расчетных значений коэффициентов механических потерь по номерам мод собственных колебаний, заземленных в основании «сухой»

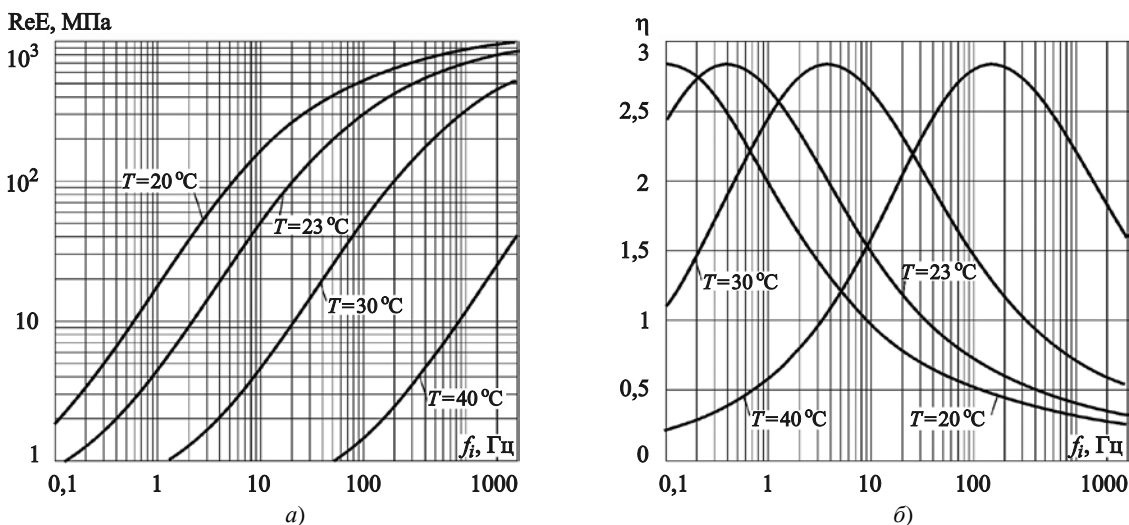


Рис. 8. Частотная зависимость а) модуля накопления и б) коэффициента механических потерь вязкоупругого материала ВПС-2,5 при различных температурах окружающей среды

Fig. 8. Frequency relationships for a) accumulation modulus and b) mechanical loss coefficient for VPS-2.5 viscoelastic material at different ambient temperatures

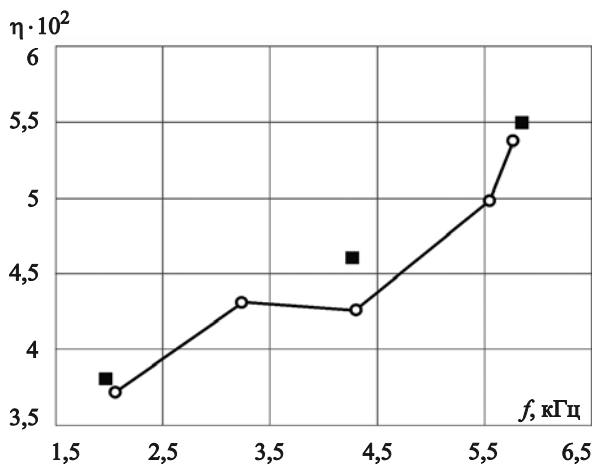


Рис. 9. Частотная зависимость коэффициента механических потерь безопорной «сухой» неоднородной по толщине композитной лопасти

Fig. 9. Frequency relationship for mechanical loss coefficient of unsupported “dry” composite blade with non-uniform thickness

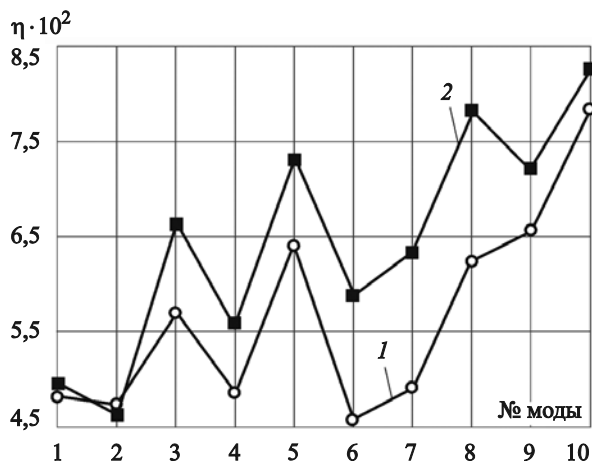


Рис. 10. Расчетные значения коэффициентов механических потерь «сухой» (1) и «мокрой» (2) неоднородной по толщине композитной лопасти

Fig. 10. Calculation results for mechanical loss coefficients of “dry” (1) and “wet” (2) composite blade with non-uniform thickness

и «мокрой» неоднородной по толщине композитной лопасти, показано на рис. 10. Приведенные данные свидетельствуют о том, что диссипативные характеристики «мокрой» лопасти начиная с третьей моды колебаний превышают диссипативные характеристики «сухой» на величину $\Delta\eta \in [0,01; 0,015]$. Это увеличение η порождено гидродинамическим демпфированием, обусловленным влиянием присоединенных масс, различных для каждой собственной формы колебаний рассматриваемой композитной лопасти.

Достоверность применения монолитной стратегии для определения величин коэффициентов механических потерь η «сухого» и «мокрого» рабочего колеса водометного движителя с неоднородными по толщине композитными лопастями подтверждена путем сравнения расчетных результатов с экспериментальными значениями η (рис. 11).

Расчетные и экспериментальные значения собственных частот f и коэффициентов механических потерь η «сухого» и «мокрого» рабочего колеса водометного движителя с неоднородными по тол-

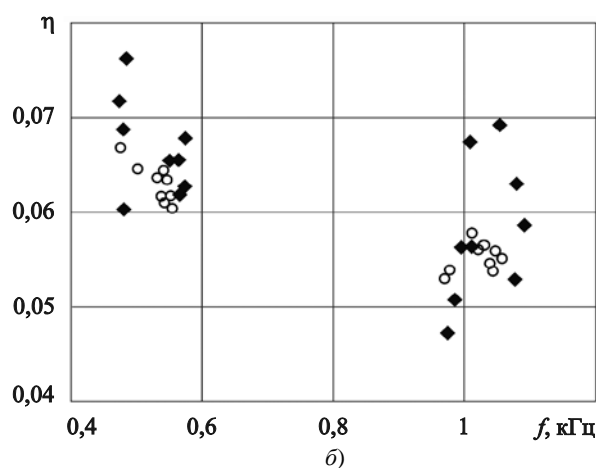
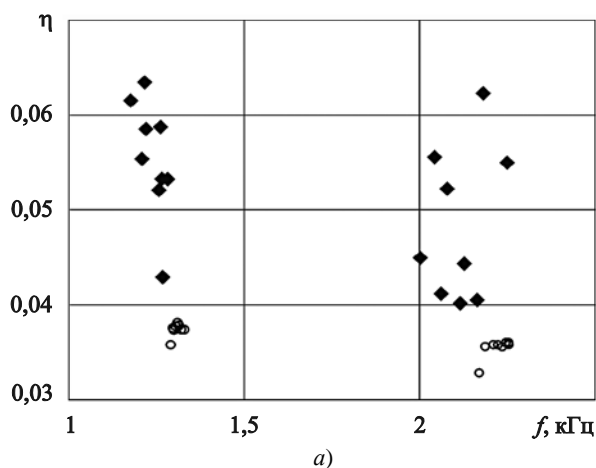


Рис. 11. Значения коэффициентов механических потерь а) «сухого» и б) «мокрого» рабочего колеса водометного движителя с неоднородными по толщине композитными лопастями: ♦ – эксперимент; ○ – расчет

Fig. 11. Mechanical loss coefficients of “dry” (a) and “wet” (b) waterjet impeller with composite blades of non-uniform thickness: ♦ – experiment; ○ – calculation

щине композитными лопастями образуют группы из Z значений для каждой моды колебаний (рис. 11). В каждой из групп «сухого» рабочего колеса с неоднородными по толщине композитными лопастями различие расчетных значений коэффициентов механических потерь η ниже различия аналогичных экспериментальных величин. Это обусловлено сложностью обеспечения постоянства толщины вязкоупругого слоя в композитных лопастях в процессе изготовления. Поэтому расчетные значения η можно рассматривать как консервативную оценку коэффициента механических потерь рассматриваемого рабочего колеса.

Погружение рабочего колеса с неоднородными по толщине композитными лопастями, в состав которых включен слой «мягкого» вязкоупругого материала, в воду сопровождается уменьшением собственных частот f и увеличением коэффициентов механических потерь η по сравнению с аналогичными значениями «сухого» рабочего колеса. Увеличение значений коэффициента механических потерь на величину $\eta_b \approx 0,015-0,02$ обусловлено гидродинамическим демпфированием. Значения гидродинамического демпфирования для каждой собственной частоты в группе различны, что увеличивает разницу расчетных величин η для «мокрого» рабочего колеса с неоднородными по толщине композитными лопастями.

Заключение

Conclusion

Выполнены численные и экспериментальные исследования, позволившие обосновать достоверность метода гидроупругого моделирования композитных лопастных систем судовых двигателей. Представлена оценка сходимости численной процедуры нахождения собственных частот и собственных форм связанных колебаний «сухих» одиночных лопастей из сплава Д16 и однонаправленного углепластика. Достоверность результатов численного моделирования пропульсивных и диссипативных характеристик, а также монолитной стратегии гид-

роупругого моделирования подтверждена хорошим согласованием расчетных и экспериментальных значений параметров динамического отклика рабочего колеса водометного движителя.

Список использованной литературы

1. Любомиров Я.М., Ярцев Б.А. Метод гидроупругого моделирования композитных лопастных систем // Труды Крыловского государственного научного центра. 2025. Вып. 3(413). С. 37–46.
2. Ярцев Б.А. Связанные колебания композитных конструкций. Санкт-Петербург: Крыловский государственный научный центр, 2024. 214, [2] с.

References

1. Lyubomirov Ya.M., Yartsev B.A. Hydroelastic modeling method for composite blade systems // Transactions of Krylov State Research Centre. 2025. Vol. 3(413). P. 37–46
2. Yartsev B.A. Coupled oscillations of composite structures. St. Petersburg: Krylov State Research Centre, 2024. 216 p. (in Russian).

Сведения об авторах

Любомиров Ярослав Мстиславович, к.т.н., ведущий инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: yaroslav58@yandex.ru.

Ярцев Борис Александрович, д.т.н., начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: boris_yar@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7443-1039>.

About the authors

Yaroslav M. Lyubomirov, Cand. Sci. (Eng), Lead Engineer, Krylov State Research Centre, St. Petersburg. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: yaroslav58@yandex.ru.

Boris A. Yartsev, Dr. Sci. (Eng.), Head of Sector, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: boris_yar@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7443-1039>.

Поступила / Received: 27.10.25
Принята в печать / Accepted: 14.11.25
© Любомиров Я.М., Ярцев Б.А., 2025