

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF THE PROPERTIES OF MOTOR OILS ON THE LEVEL OF TORSIONAL VIBRATIONS OF THE SHAFT LINE OF THE YAROSLAVETS TYPE VESSEL

M. M. Gorbachev¹, V. G. Bukin¹, A. V. Vasiliev².

¹Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation,

²Volgograd State University, Volgograd, Russian Federation

The article presents the results of an experimental study of the influence of motor oil properties on the level of torsional vibrations of the propeller shaft of a Yaroslavets-type vessel. The tests were carried out on mooring lines to create the maximum load on the 3D6 main engine using standard MS-20 motor oil and oil with copper additives. Torsional vibrations were measured using a certified verified strain gauge complex "Astech Electronics" (Great Britain) installed on the propeller shaft. The study found that the use of oil with copper additives and MS-20 oil does not significantly affect the amplitudes of torsional vibrations of the ship's propeller shaft in the range of crankshaft speeds of the 3D6 main engine from the minimum stable to nominal. It was found that during the start-up of the main engine with oil with copper additives, the level of torsional vibrations decreases, which requires research on more powerful marine diesel engines and an assessment of this effect. When using oil with copper additives, a reduction in the overall spectrum of harmonic component amplitude oscillations is achieved, which leads to a positive effect of reducing stress in the crankshaft and gearbox. Torsional vibrations in the elements of the machine-propulsion complex of a Yaroslavets-type vessel when used as a tug do not exceed the permissible values calculated according to the RCO rules, so additional measures to reduce them are not required. Additional experimental studies are needed to assess the effect of lubricating oil with copper additives on the vibroacoustic characteristics of marine diesel engines — vibration level and external noise.

Keywords: torsional vibrations, marine propulsion systems, marine propeller shaft, copper-added oil, strain gauge, diesel

For citation:

Gorbachev, Maksim M., V. G. Bukin and A. V. Vasiliev "Experimental study of the effect of the properties of motor oils on the level of torsional vibrations of the shaft line of the Yaroslavets type vessel." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.6 (2024): 964–973. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-964-973.

УДК 629.12

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВ МОТОРНЫХ МАСЕЛ НА УРОВЕНЬ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВАЛОПРОВОДА СУДНА ТИПА «ЯРОСЛАВЕЦ»

М. М. Горбачев¹, В. Г. Букин¹, А. В. Васильев²

¹Астраханский государственный технический университет,

²Волгоградский государственный университет

В статье приведены результаты экспериментального исследования влияния свойств моторных масел на уровень крутильных колебаний валопровода судна типа «Ярославец». Испытания производились на швартовах для создания максимальной нагрузки на главный двигатель 3Дб при использовании стандартного моторного масла МС-20 и масла с присадками меди. Измерение крутильных колебаний выполнялось при помощи сертифицированного поверенного тензометрического комплекса Astech Electronics (Великобритания), установленного на гребном валу. В результате исследования установлено, что применение масла с присадками меди и масла МС-20 не оказывает существенного влияния на амплитуды крутильных колебаний судового валопровода в диапазоне частот вращения коленчатого вала главного двигателя 3Дб от минимальной устойчивой до номинальной. Установлено, что в период пуска главного двигателя с маслом с присадками меди уровень крутильных колебаний снижается, что требует проведения исследований

на более мощных судовых дизелях и оценки данного эффекта. Отмечается, что при использовании масла с присадками меди достигается снижение в общем спектре колебаний амплитуд гармонических составляющих, что приводит к положительному эффекту снижения напряжений в коленчатом валу и редукторе. Крутильные колебания в элементах машинно-двигательного комплекса судна типа «Ярославец» при использовании его в качестве буксира не превышают допустимых значений, рассчитанных согласно правилам РКО, поэтому дополнительные меры для их снижения не требуются. Необходимы дополнительные экспериментальные исследования по оценке влияния смазочного масла с присадками меди на виброакустические характеристики судовых дизелей: уровень вибрации и внешний шум.

Ключевые слова: крутильные колебания, судовые машинно-двигательные комплексы, судовой валопровод, масло с присадками меди, тензометрирование, дизель.

Для цитирования:

Горбачев М. М. Экспериментальное исследование влияния свойств моторных масел на уровень крутильных колебаний валопровода судна типа «Ярославец» / М. М. Горбачев, В. Г. Букин, А. В. Васильев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 964–973. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-964-973.

Введение (Introduction)

Моторные масла в судовых дизелях выполняют несколько важных функций: снижают трение в трущихся деталях, охлаждают и очищают их от продуктов износа. На выполнение основных функций большое влияние оказывают качество масла и его состав, что в свою очередь отражается на решении дополнительных задач, таких как демпфирование колебаний (поперечных, продольных и крутильных). Для судовых дизелей наибольшую опасность представляют крутильные колебания, длительное воздействие которых приводит к усталостным разрушениям элементов судового машинно-двигательного комплекса: коленчатых, промежуточных и гребных валов, упругих муфт и т. д. Несмотря на предпринимаемые усилия со стороны инженеров и ученых, поломки гребных, промежуточных и коленчатых валов продолжают происходить, что приводит к большим затратам судовладельцев из-за незапланированного ремонта и простоя судов.

Снижение амплитуд крутильных колебаний осуществляется в судовом валопроводе по причине демпфирующих сопротивлений в виде работы трения в дизеле, демпфере крутильных колебаний, потоке воды при работе гребного винта, подшипниках валопровода и т. д. Одним из видов демпфирования крутильных колебаний в дизеле является жидкостное трение в коренных и шатунных подшипниках коленчатого вала и цилиндро-поршневой группе, которое обеспечивается в том числе смазочным маслом. Оценка влияния характеристик смазочного масла на снижение крутильных колебаний в установках с ДВС расчетными методами является достаточно сложной задачей. Поэтому как в ранних в данной области работах (Истомина П. А. Крутильные колебания в судовых ДВС. — Л.: Судостроение, 1968. — 303 с., Бухарина Г. И. Демпфирование в поршневых двигателях при резонансных крутильных колебаниях. — Л.: Машиностроение, 1965), так и в современных изданиях (Гоц А. Н. Крутильные колебания коленчатых валов автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие. — Владимир: Владимирский. гос. ун-т, 2008. — 199 с.), а также в исследованиях других специалистов отмечается, что демпфирование в трущихся парах ДВС с жидкостным трением зависит в большей степени от скорости перемещения деталей, при этом свойства смазочного масла не учитываются. Кроме того, можно выделить неоднозначность результатов исследований влияния смазочных масел на уровень крутильных колебаний в различных механизмах. Например, в исследовании [1] указано, что смазочное масло оказывает слабое влияние на снижение амплитуд крутильных колебаний в редукторных передачах. В результаты данные, приведенные в работе [2], свидетельствуют о существенном влиянии характеристик смазочных масел на уровень крутильных колебаний в червячных передачах.

В настоящее время моторные масла отличаются большим разнообразием присадок, включая инновационные на базе меди, которые, согласно ряду исследований, оказывают положительное влияние на работу двигателей внутреннего сгорания [3], [4], что приводит к необходимости проведения исследований влияния свойств масел на крутильные колебания в судовых дизелях.

Следует отметить, что практически все коэффициенты, учитывающие различные факторы, влияющие на уровень крутильных колебаний в двигательных установках, являются эмпирическими или полумпирическими [5]–[7], поэтому исследование было основано на ряде экспериментов, проведенных в натурных условиях на судне. Для исследований было использовано масло, рекомендованное техническим паспортом МС-20 и масло с присадками меди, по своим основным характеристикам соответствующее требованиям производителем дизеля 3Дб.

Целью работы является экспериментальное исследование влияния свойств самозочного масла на крутильные колебания в энергетической установке судна «Ярославец».

Методы и материалы (Methods and Materials)

Судно типа «Ярославец» было выбрано в качестве объекта для исследований ввиду следующих причин:

- катера типа «Ярославец» с дизелями типа 3Дб до сих пор находятся в эксплуатации в качестве обслуживающих, снабжающих и прогулочных судов на внутренних путях в России;
- доступность установки на валовой линии элементов тензометрического комплекса «Астеч Электроникс» для измерения напряжений в валопроводе без необходимости перерасчета угловых перемещений вала и возникновения дополнительных погрешностей;
- повышенная оборотность дизеля 3Дб (до 1500 мин⁻¹) и работа в широком диапазоне частоты вращения с возможностью охвата большого количества режимов работы судна;
- отсутствие в составе валопровода устройств, снижающих крутильные колебания — демпфера и муфты, что приводит к росту влияния внутренних демпфирующих моментов и сопротивлений;
- на внутренних водных путях России имеется опыт и тенденция использования данных судов в качестве тяговых буксиров для паромных переправ и транспортировки барж, что приводит к изменению характера работы судового валопровода и действующих на него динамических нагрузок, включая крутильные колебания;
- авторский опыт исследования крутильных колебаний на данном судне [8].

В состав машинно-двигательного комплекса судна «РК-2091» входят: дизель 3Дб; реверс-редуктор; гребной вал; гребной винт фиксированного шага.

Дизель 3Дб имеет следующие технические характеристики:

- номинальная мощность 110 кВт (150 л. с.);
- число цилиндров — 6 шт.;
- номинальная частота вращения КВ — 1500 мин⁻¹;
- минимально-устойчивая частота вращения КВ — 500 мин⁻¹;
- диаметр цилиндра: 150 мм;
- ход поршня — 180 мм;
- удельный эффективный расход топлива — 240 г/(кВт·ч) ± 5 %.

Исследование производилось в несколько этапов:

Этап 1 — *расчет свободных крутильных колебаний*. Был выполнен расчет свободных крутильных колебаний валопровода судна «РК-2091» в последней модификации в соответствии с требованиями РКО и общепринятой методикой В. П. Терских и получены параметры основных форм колебаний: одноузловая валопроводная с частотой 1528 кол./мин (кол. — колебаний) и двухузловая моторная с частотой 9391 кол./мин. Далее были определены резонансные частоты вращения коленчатого вала главного двигателя для основных форм и гармонических порядков крутильных колебаний. Одноузловая форма (валопроводная форма): резонанс 3-го порядка — 510 мин⁻¹. Двухузловая форма (моторная форма): резонанс 9-го порядка — 1045 мин⁻¹; резонанс 12-го порядка — 785 мин⁻¹.

Этап 2 — *расчет допустимых напряжений от крутильных колебаний*. Допустимые напряжения от крутильных колебаний рассчитывались согласно Правилам Российского классификационного общества (РКО)¹. С учетом применения судна в качестве тягового буксира допустимые напряжения для гребного вала составляют 28,42 МПа, а для коленчатого вала дизеля — 28,31 МПа во всем диапазоне частот вращения.

¹ Российское классификационное общество. Правила классификации и постройки судов. М., 2019. — 1685 с.

Этап 3 — *измерение напряжений от суммарных крутильных колебаний*. Измерения крутильных колебаний производились при использовании двух видов моторного масла: с присадками меди и марки МС-20 (рекомендованного техническим паспортом дизеля ЗД6). Оценка амплитуд крутильных колебаний осуществлялась при помощи поверенного сертифицированного тензометрического комплекса Astech Electronics (Великобритания), используемого специалистами испытательного центра «MTS» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» при оценке крутильных колебаний на реальных судах [9], [10]. Переводной коэффициент для расчета напряжений в гребном валу для тензометрических резисторов 2ФКП5-400 был определен при помощи тарировки на стандартной балке равных перемещений СМ-25 и равен 0,023872 у. е./МПа. Трансмиттер с измерительными датчиками 1 был размещен на гребном валу, данные передавались при помощи радиосигнала на измерительный блок 3 и в ноутбук 2 с программным обеспечением Astech C-Range Logging Version 2.5.0.1825, размещенные на палубе (рис. 1).

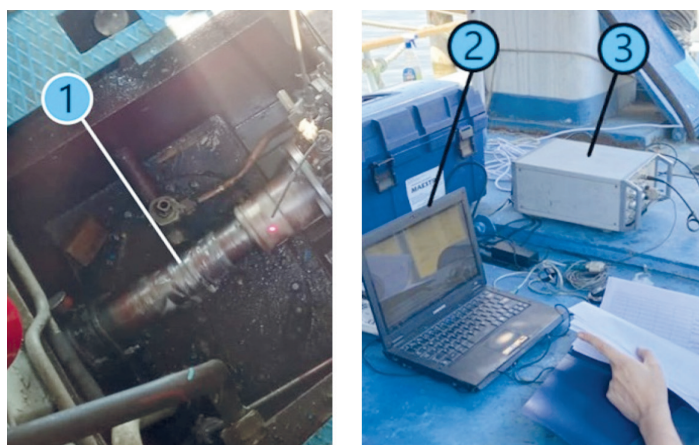


Рис. 1. Размещение оборудования для измерения крутильных колебаний

Измерения производились при испытаниях судна на швартовах для достижения максимальной нагрузки со ступенчатым повышением частоты вращения коленчатого вала дизеля от минимальной устойчивой до максимальной и дальнейшим постепенным снижением частоты вращения до минимальной.

Результаты (Results)

В итоге были получены тензограммы при использовании в дизеле масла МС-20 (рис. 2) и масла с присадками меди. Следует отметить рост амплитуд крутильных колебаний в начальной части тензограммы, поэтому на рис. 3 приведены участки с увеличенным масштабом графика при пуске.

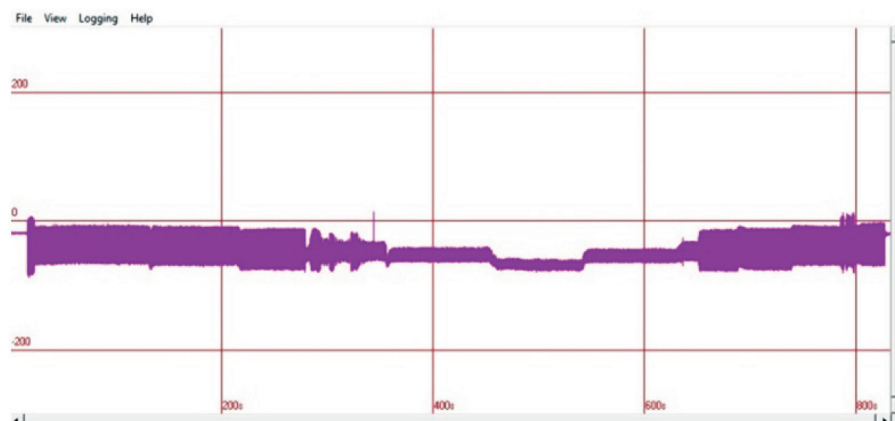


Рис. 2. Тензограмма при использовании в главном двигателе моторного масла МС-20

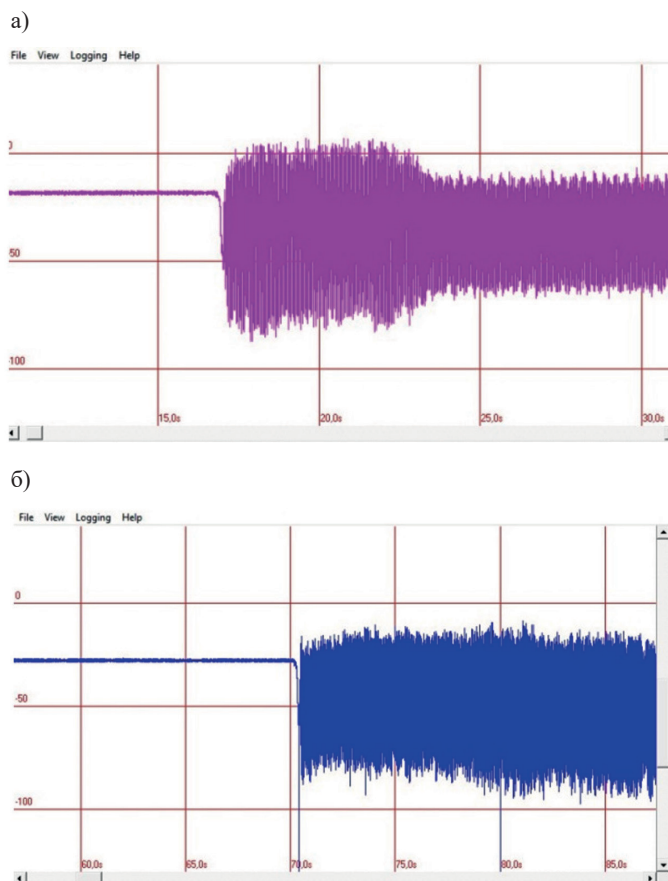


Рис. 3. Графики амплитуд крутильных колебаний при пуске дизеля:
а — на моторном масле МС-20; б — на моторном масле с присадками меди

Из рис. 3 видно, что при пуске дизеля на масле МС-20 (рис. 3, а) замечен скачок амплитуды крутильных колебаний, что требует дополнительного анализа тензограмм.

Обсуждение (Discussion)

Анализ напряжений, возникающих в гребном валу от крутильных колебаний. Для оценки влияния свойств смазочного масла на крутильные колебания был проведен анализ тензограммы с шагом частоты вращения 100 мин^{-1} с момента пуска до достижения максимальной частоты вращения коленчатого вала дизеля при швартовых испытаниях. В результате был получен график изменения напряжений в гребном валу от суммарных гармонических крутильных колебаний, возникающих при работе валопровода (рис. 4).

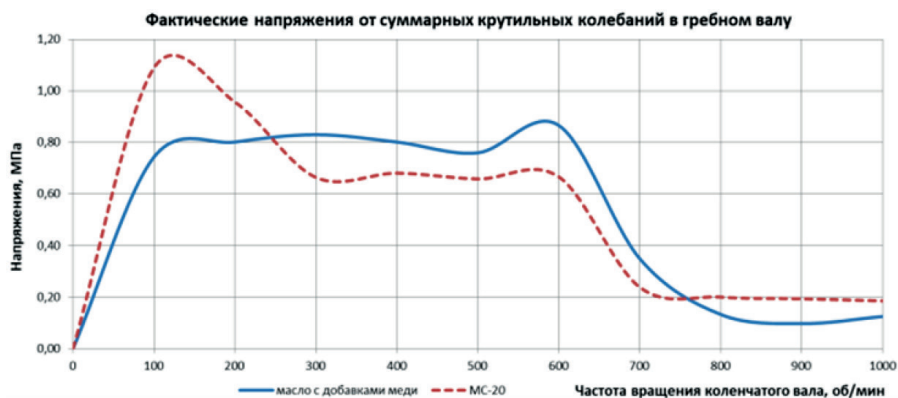


Рис. 4. График развития фактических напряжений от крутильных колебаний в гребном валу

Резонансные напряжения в диапазоне частот вращения коленчатого вала от 500 до 600 мин⁻¹, хорошо заметные на графике (см. рис. 4), вызваны резонансом от валопроводной формы крутильных колебаний 3-го порядка. На резонансных частотах вращения коленчатого вала дизеля 785 и 1045 мин⁻¹ резонансные напряжения от моторной формы крутильных колебаний в гребном валу не проявляются. Характер развития крутильных колебаний и вызванных ими напряжений в гребном валу позволяет сделать вывод об идентичности как при работе на масле МС-20, так и на масле с присадками меди. Различие напряжений от крутильных колебаний можно отметить фактически только на первоначальном этапе набора частоты вращения, что, вероятно, связано с более легким пуском дизеля при работе на масле с присадками меди и требует проведения дальнейших исследований. Уровень крутильных колебаний в гребном валу ниже, чем нормы, рассчитанные по правилам РКО, даже с учетом работы разъездного катера в режиме тягового буксира на паромных переправах.

Анализ развития напряжений, возникающих в коленчатом валу дизеля от крутильных колебаний. Поскольку напряжения в гребном валу существенно ниже допустимых норм, необходимо выполнить анализ напряжений, возникающих в коленчатом валу дизеля. Для этого используется масштаб напряжений, определенный при расчете свободных колебаний. В результате для моторной формы колебаний 12-го порядка напряжения в коленчатом валу при использовании масла с присадками меди составили 17,73 МПа, а при использовании масла МС-20 — 17,26 МПа. Отличия незначительные, поэтому влияние смазочного масла с присадками меди на крутильные колебания заметно только в части их снижения при пуске дизеля.

Вейвлет-анализ тензограммы на этапе пуска дизеля. Поскольку в ранее проведенном анализе рассматривались только напряжения от суммарных крутильных колебаний, необходимо дополнительная оценка характера гармонических составляющих, которые влияют на развитие напряжений в отдельных составляющих машинно-двигательного комплекса: коленчатый вал, валы редукторной передачи, промежуточный вал и т. д. Был выполнен вейвлет-анализ тензограмм (на участке 1-го оборота), полученных на резонансной частоте вращения 510 мин⁻¹ валопроводной формы крутильных колебаний.

Вейвлет-анализ выполнялся при помощи материнской функции вейвлета Морле, как наиболее соответствующий поведению функции крутильных колебаний. Непрерывное вейвлет-преобразование функции сигнала $f(t)$ будет выражаться в виде представления сигнала в частотно-временной области по системе базисных функций:

$$W_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (1)$$

где $W_{a,b}$ — матрица вейвлет-коэффициентов;

$\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ — производные вейвлеты, полученные из материнского вейвлета $\psi(t)$ при помо-

щи изменения масштаба a и временного сдвига b .

Комплексный вейвлет Морле описывается формулой

$$\psi(t) = e^{i\omega_0 t} e^{-\frac{t^2}{2}}, \quad (2)$$

где ω_0 — параметр, позволяющий манипулировать избирательностью базиса вейвлета.

Результаты анализа, выполненного в программном продукте Wolfram Mathematica, приведены на рис. 5 (соответственно при использовании масла МС-20 (рис. 5, а) и масла с присадками меди (рис. 5, б)). В верхней части рис. 5 приведены тензограммы (синий график) за один оборот и соответствующий график при обратном преобразовании вейвлет-функции (оранжевый график).

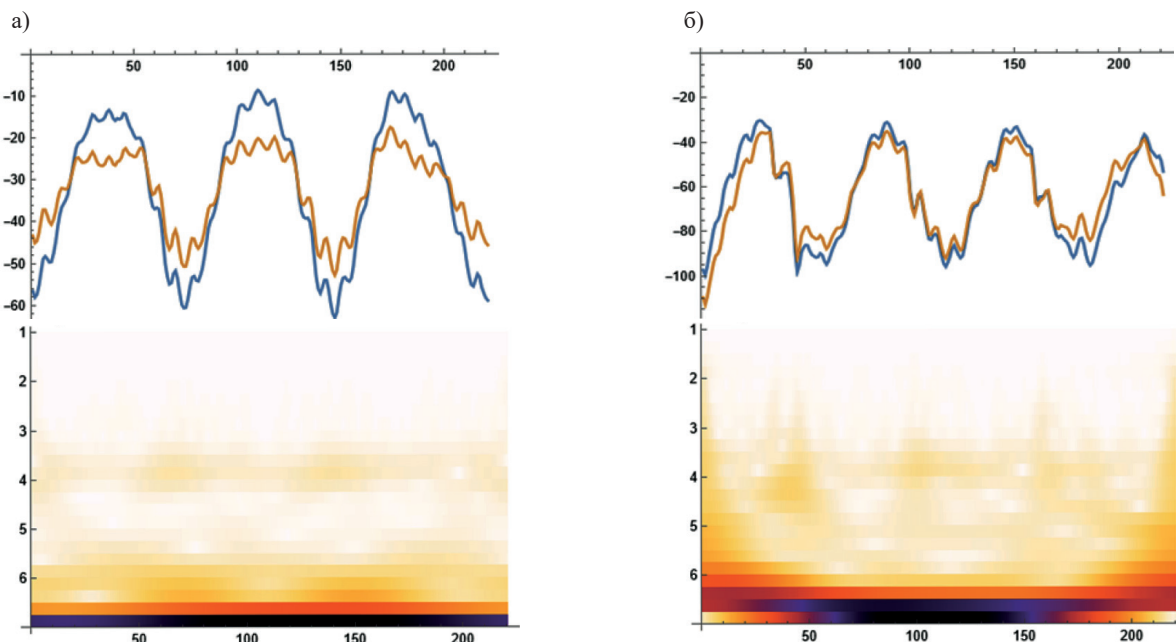


Рис. 5. Графики крутильных колебаний и скалограммы вейвлет-анализа тензограмм при частоте вращения 510 мин^{-1} : *а* — при использовании масла МС-20; *б* — при использовании масла с присадками меди

Как видно из рис. 6, при использовании масла МС-20 отклик функции крутильных колебаний является более равномерным, чем при использовании масла с присадками меди. Темные цвета соответствуют максимальным откликам функции, т. е. высокой интенсивности роста амплитуд крутильных колебаний. При использовании масла с присадками меди высокая интенсивность отклика сосредоточена в средней части тензограммы, что свидетельствует о проявлении гармонических составляющих крутильных колебаний в средней части в большей степени, чем на крайних участках торсиограмм. Тот же самый эффект, но уже с ослаблением гармонических амплитуд в средней части тензограммы при использовании масла с присадками меди проявляется при вейвлет-анализе торсиограммы на частоте вращения 785 мин^{-1} моторной формы (рис. 6).

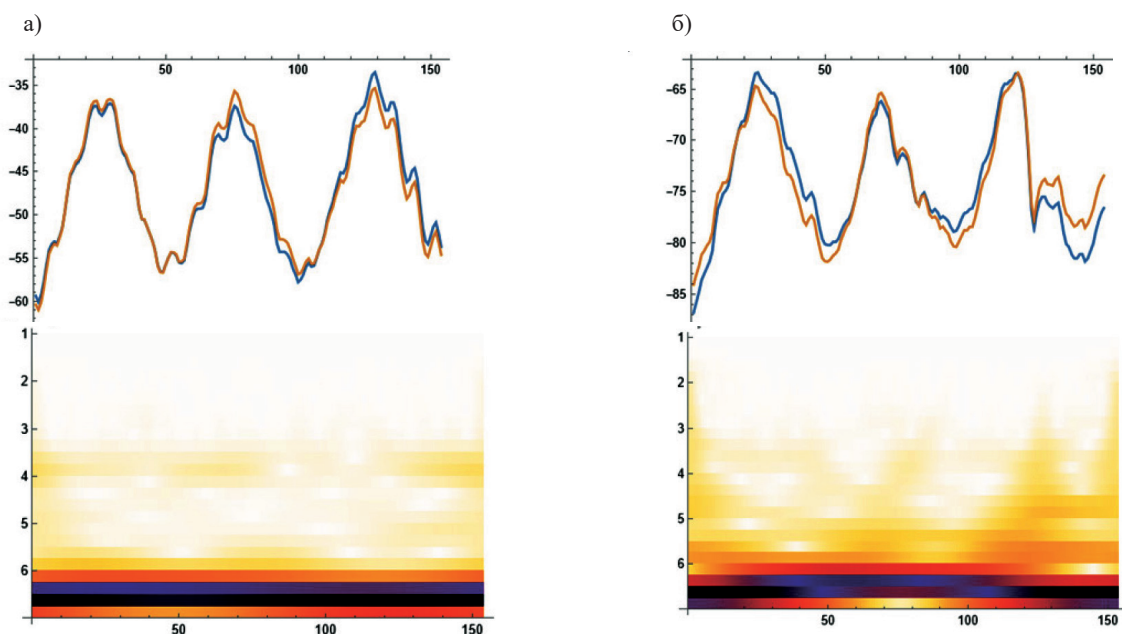


Рис. 6. Графики крутильных колебаний и скалограммы вейвлет-анализа тензограмм при частоте вращения 785 мин^{-1} : *а* — при использовании масла МС-20; *б* — при использовании масла с присадками меди

Таким образом, можно сделать вывод о снижении гармонических амплитуд крутильных колебаний при использовании масла с присадками меди, что положительно отразится на крутильных колебаниях в коленчатом валу и редукторе судовой установки.

Следует отметить, что применение смазочных масел различных видов может привести к снижению общего уровня вибрации и связанных колебаний судовой энергетической установки, проблема которых рассматривается в работах [11], [12].

Выводы

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Применение масел с присадками меди не оказывает существенного влияния на амплитуды крутильных колебаний судового валопровода в диапазоне частот вращения от минимальной устойчивой до номинальных. При пуске масло с присадками меди снижает уровень крутильных колебаний, что требует проведения исследований на более мощных судовых дизелях и количественной оценки данного эффекта.

2. При использовании масла с присадками меди достигается эффект снижения в общем спектре колебаний амплитуд гармонических составляющих, что приведет к положительному эффекту снижения напряжений в коленчатом валу и редукторе.

3. Крутильные колебания в элементах машинно-двигательного комплекса судна типа «Ярославец» не превышают допустимых значений, рассчитанных согласно Правилам РКО, поэтому дополнительные меры для их снижения не требуются.

4. Необходимы дополнительные экспериментальные исследования по оценке влияния смазочного масла с присадками меди на виброакустические характеристики судовых дизелей: уровень вибрации и внешний шум.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин Д. В. Анализ влияния сил трения в зацеплении на динамические нагрузки в зубчатых передачах / Д. В. Калинин, Ю. М. Темис // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2018. — № 6(699). — С. 32–43. DOI: 10.18698/0536-1044-2018-6-32-43. — EDN XTUMUX.

2. Поляков С. А. Учет пленкообразующих и демпфирующих свойств смазочных материалов при проектировании червячных передач / С. А. Поляков, М. Н. Захаров, В. В. Лычагин [и др.] // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. — 2014. — № 12. — С. 96–106. DOI: 10.7463/1214.0747386. — EDN TEVFZR.

3. Ким С. Ч. Применение наночастиц меди в качестве добавки к смазочному маслу / С. Ч. Ким, В. П. Рева // Computational nanotechnology — 2019. — Т. 6. — № 1. — С. 23–25. — EDN ZBUCAX.

4. Якунина К. А. Механизм действия и повышение эффективности маслорастворимых противоизносных присадок: дис. ... канд. техн. наук / К. А. Якунина. — Челябинск, 2022. — 129 с. — EDN GZMBPB.

5. Ефремов Л. В. Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий / Л. В. Ефремов. — СПб.: Наука, 2007. — 276 с. — EDN UBASSH.

6. Чистяков В. К. Динамика поршневых и комбинированных ДВС / В. К. Чистяков. — М.: Машиностроение, 1989. — 256 с.

7. Лашко В. А. Использование компьютерных технологий при расчетах крутильных колебаний в установках с двигателем внутреннего сгорания / В. А. Лашко, М. В. Лейбович // Математическое моделирование: сб. науч. тр. НИИ КТ. — Вып. 9. — Хабаровск: Хабар. гос. техн. ун-т, 1999. — С. 36–45.

8. Покусаев М. Н. Исследование крутильных колебаний машинно-двигательного комплекса развездного речного судна «РК-2091» пр. 376 / М. Н. Покусаев, В. А. Мамонтов, А. Р. Рубан [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. — 2019. — № 1–4(43). — С. 88–92. — EDN XCKQLH.

9. Мамонтов В. А. Экспериментальное исследование поперечных и крутильных колебаний валопроводов буксира типа ОТ-2400 / В. А. Мамонтов, А. Н. Глухов, М. М. Горбачев, Г. А. Кушнер // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2017. — № 46–47. — С. 86–88. — EDN WHMGOQ.

10. Сибряев К. О. Оценка технического состояния силиконовых демпферов крутильных колебаний машинно-двигательных комплексов судов / К. О. Сибряев, М. Н. Покусаев, М. М. Горбачев, А. Д. Ибадуллаев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2022. — № 4. — С. 67–72. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-4-67-72. — EDN IELNHS.

11. Мартянов В. В. Оценка угрозы возникновения резонансных колебаний на примере расчета крутильных колебаний судового валопровода пассажирского теплохода пр. Р118 / В. В. Мартянов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 359–368. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-359-368. — EDN XPFCJV.

12. Мартянов В. В. Условия работы и возможные причины вибрации на прогулочных пассажирских судах под действием крутильных колебаний и поперечных колебаний / В. В. Мартянов // Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России: материалы 5-й межвузовской научно-практической конференции. — СПб.: Изд-во ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2014. — С. 131–135.

REFERENCES

1. Kalinin, D. V. and Yu. M. Temis “Analiz vliyaniya sil treniya v zatseplenii na dinamicheskie nagruzki v zubchatykh peredachakh.” *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Mashinostroenie* 6(699) (2018): 32–43. DOI: 10.18698/0536-1044-2018-6-32-43.

2. Polyakov, S. A., M. N. Zakharov, V. V. Lychagin et al. “Uchet plenkoobrazuyushchikh i dempfiroyushchikh svoystv smazochnykh materialov pri proektirovanii chervyachnykh peredach.” *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N. E. Bauman* 12 (2014): 96–106. DOI: 10.7463/1214.0747386.

3. Kim, S. Ch. and V. P. Reva “Primenenie nanochastits medi v kachestve dobavki k smazochnomu maslu.” *Computational nanotechnology* 6.1 (2019): 23–25.

4. Yakunina K. A. Mekhanizm dejstviya i povyshenie effektivnosti maslorastvorimykh protivoznosnykh prisadok. PhD diss. CHelyabinsk: 2022.

5. Efremov, L. V. *Teoriya i praktika issledovaniy krutilnykh kolebaniy silovykh ustanovok s primeneniem kompyuternykh tekhnologij*. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskaya izdatelsko-knigotorgovaya firma “Nauka”, 2007.

6. Chistyakov, V. K. *Dinamika porshnevnykh i kombinirovannykh DVS*. M: Mashinostroenie, 1989.

7. Lashko V. A., Lejbovich M. V. “Ispol’zovanie komp’yuternykh tekhnologij pri raschetah krutil’nykh kolebaniy v ustanovkakh s dvigatelem vnutrennego sgoraniya.” *Matematicheskoe modelirovanie 9 Sb. nauch. tr. NII KT. Habar.*: Habar. gos. tekhn. un-t, 1999: 36–45.

8. Pokusaev, M. N., V. A. Mamontov and A. R. Ruban i dr. “Issledovanie krutilnykh kolebaniy mashinno-dvizhitelnogo kompleksa razezdnogo rechnogo sudna “RK-2091” proekta 376.” *Morskie intellektualnye tekhnologii* 1–4(43) (2019): 88–92.

9. Mamontov, V. A., A. N. Glukhov, M. M. Gorbachev and G. A. Kushner “Eksperimentalnoe issledovanie poperechnykh i krutilnykh kolebaniy valoprovodov buksira tipa OT-2400.” *Nauchno-tekhnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudokhodstva* 46–47 (2017): 86–88.

10. Sibryaev, K. O., M. N. Pokusaev, M. M. Gorbachev and A. D. Ibadullaev “Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya silikonovykh dempferov krutilnykh kolebaniy mashinno-dvizhitelnykh kompleksov sudov.” *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* 4 (2022): 67–72. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-4-67-72.

11. Martyanov, V. V. “Otsenka ugrozy vozniknoveniya rezonansnykh kolebaniy na primere rascheta krutilnykh kolebaniy sudovogo valoprovoda passazhirskogo teplokhoda pr. R118.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 359–368. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-359-368.

12. Mart’yanov, V. V. “Usloviya raboty i vozmozhnye prichiny vibratsii na progulochnykh passazhirskikh sudakh pod deistviem krutil’nykh kolebaniy i poperechnykh kolebaniy.” *Materialy 5-i mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii»*. SPb.: Izd-vo GUMRF, 2014: 131–135.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горбачев Максим Михайлович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация водного транспорта и промышленное рыболовство», ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», 414025, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16 e-mail: max9999_9@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gorbachev, Maksim M. — assistant professor of the Department «Operation of Water Transport and Industrial Fishing», FSBEI HE «Astrakhan State Technical University», 414056, Russian Federation, Astrakhan, Tatishcheva, 16, e-mail: max9999_9@mail.ru

Букин Владимир Григорьевич —
доктор технических наук, профессор кафедры
«Теплоэнергетика и холодильные машины»,
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»,
414025, Российская Федерация, г. Астрахань,
ул. Татищева, 16
e-mail: bukinvg@mail.ru

Васильев Александр Викторович —
доктор технических наук, профессор кафедры
Информационной безопасности Волгоградский
государственный университет 400062,
Российская Федерация, г. Волгоград,
пр-т Университетский, 100
e-mail: vasilyev_a_v_59@mail.ru

Bukin, Vladimir G. —
Dr. Sci. (Eng)
Professor of the Department of Heat Power
Engineering and Refrigerating Machines
FSBEI HE «Astrakhan State
Technical University», 414056, Russian Federation,
Astrakhan, Tatishcheva, 16,
e-mail: bukinvg@mail.ru

Vasiliev, Aleksander V. —
Dr. Sci. (Eng), Professor of the Department of
Information Security,
Volgograd State University 400062,
Russian Federation, Volgograd,
Universitetskiy Avenue, 100,
e-mail: vasilyev_a_v_59@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 14 ноября 2024 г.
Received: Nov. 14, 2024.*