

Н.Н. СПИРИДОНОВ, И.М. БЕЛОВ, А.И. ДУЛЬНЕВ, П.А. РОДОССКИЙ  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ КРУПНОТОННАЖНОГО АРКТИЧЕСКОГО ГАЗОВОЗА ПРИ ПЛАВАНИИ В ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ

Приведены результаты анализа данных эксплуатационного мониторинга параметров вибрации крупнотоннажного арктического газовоза двойного действия категории Arc7, полученных во время опытного рейса в Арктику. Для оценки влияния ледовой обстановки и режимов движения судна такие параметры, как мощность движительных установок, частота вращения гребных винтов, углы поворота рулевых колонок и скорость движения судна, регистрировались непрерывно и синхронно с параметрами вибрации корпуса. Исследованы зависимости вибрации корпуса от параметров движения при самостоятельном движении носом вперед и кормой вперед в сплошных льдах с толщиной, изменяющейся в широких пределах от 0,2 до 1,5 м, при движении в канале за ледоколом, а также при преодолении крупных торосов. Проанализированы долговременные распределения уровней вибрации в обитаемых помещениях, и произведено их сопоставление с действующими нормами. Выполнена дозная оценка вибрации на примере одного члена экипажа за время наблюдений, и показаны ее преимущества по сравнению с традиционными принципами нормирования.

**Ключевые слова:** вибрация, лед, суда ледового плавания, мониторинг.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Спиридонов Н.Н., Белов И.М., Дульнев А.И., Родосский П.А. Исследование параметров вибрации крупнотоннажного арктического газовоза при плавании в ледовых условиях. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; Специальный выпуск 2: 114–123.

УДК 629.551.2.023.242[629.557.2]:534.647

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-114-123

N.N. SPIRIDONOV, I.M. BELOV, A.I. DULNEV, P.A. RODOSKIY  
Krylov State Research Centre, Moskovskoe shosse, 44, St. Petersburg, Russia

## VIBRATION INVESTIGATION OF A LARGE-SIZE ARCTIC GAS CARRIER IN ICE CONDITIONS

The paper describes the results of analysis based on in-service vibration monitoring data obtained during a trial Arctic voyage of a large-size Arc-7 Arctic gas carrier. The power of propulsion units, propeller RPM, steering angles of pods and ship speed were recorded continuously and concurrently with hull vibration parameters for judging the effect of ice and ship operating conditions. Hull vibrations versus ship operation parameters are investigated at independent sailing ahead and astern in continuous ice field with broad variation of ice thickness from 0.2 to 1.5 m, as well as at sailing in ice channel behind icebreaker and large ice ridges. Long-term distribution of vibration levels in attended ship spaces are analysed and compared against existing standards. Vibration dose exposure estimates are done for one crew member. Advantages of this method are shown as compared with the traditional approaches to regulation of vibrations.

**Key words:** vibration, ice, ice-going vessels, monitoring.

Authors declare lack of the possible conflicts of interest.

For citations: Spiridonov N.N., Belov I.M., Dulnev A.I., Rodoskiy P.A. Vibration investigation of a large-size Arctic gas carrier in ice conditions. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; Special issue 2: 114–123 (in Russian).

UDC 629.551.2.023.242[629.557.2]:534.647

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-114-123

## Введение

Известно, что ледоколы и суда активного ледового плавания при плавании во льдах подвержены интенсивному воздействию вибрации, которая существенно влияет на их эксплуатационные качества. Параметры вибрации этих судов зависят от сочетания большого числа случайных факторов, таких как скорость движения судна, толщина, сплоченность и прочность ледового покрова, обороты винта и т.п. Их количественные закономерности не могут быть адекватно описаны детерминированными зависимостями. Следовательно, существующие подходы к оценке вибрации на стадии проектирования, построенные на указанных зависимостях, не гарантируют требуемого уровня надежности техники и приемлемой оценки вибрационного воздействия на экипаж за длительный период эксплуатации. Поэтому накопление экспериментальных данных по вибрации судов во льдах и их последующий статистический анализ являются на сегодня чрезвычайно актуальной задачей. В настоящее время накоплены представительные данные по вибрации ледоколов и судов активного ледового плавания водоизмещением до 25 тыс. т в различных ледовых условиях, например [1–3], однако измерения на крупнотоннажном арктическом газовозе проводились впервые.

## Методология проведения мониторинга параметров вибрации и режимов движения судна

Эксплуатационный мониторинг параметров вибрации проводился во время опытного рейса в Арктику. Измерения вибрации корпуса выполнялись в районе надстройки, а также на транк-палубе в сечениях поперечных переборок. Регистрация сигналов осуществлялась на ПК с установленным специализированным программным обеспечением.

Контроль параметров вибрации и режимов движения судна производился непрерывно в течение 21 суток нахождения судна в ледовых условиях. При этом системное время комплекса мониторинга вибрации и штатной судовой системы, регистрировавшей основные параметры движения, было синхронизировано. В процессе обработки данных мониторинга были выделены основные группы режимов движения судна при плавании во льдах:

- движение носом вперед в сплошных льдах;
- движение кормой вперед в сплошных льдах;
- движение носом вперед в канале за ледоколом;

- режим размывания льда при преодолении ледовых торосов;
- швартовные режимы.

Каждая группа режимов характеризовалась своей суммарной продолжительностью. Наиболее продолжительным режимом являлось движение кормой вперед в сплошном льду. Наименее продолжительный режим – режим размывания льда. Суммарные продолжительности различных групп режимов, в процентах от общей продолжительности нахождения судна во льдах, представлены на рис. 1.

В связи с высокой степенью изменчивости условий ледовой эксплуатации традиционная оценка вибрационного воздействия на экипаж путем однократных измерений при последовательном обходе помещений [5] не является корректной. В связи с этим на судне в дополнение к традиционной произведена дозная оценка воздействия вибрации на экипаж по величине недельных экспозиций в соответствии с МУК 4.3.213-14 [6].

В настоящей статье приведены результаты дозной оценки на примере старшего помощника капитана. Недельная экспозиция вибрации определялась индивидуально, исходя из трех 8-часовых периодов рабочего времени (рулевая рубка), активного отдыха в каюте (салон) и сна (спальня). Входными данными для определения недельной экспозиции являлись:

- скорректированные по частоте среднеквадратические уровни виброускорений, определявшиеся в контрольной точке корпуса в процессе мониторинга;

Рис. 1. Продолжительность различных групп режимов в процентах от общего времени наблюдения



- передаточные коэффициенты, определяющие соотношение между виброускорениями в контрольной точке и точками в центре помещений.

Передаточные коэффициенты были определены на основании сопоставления измерений вибрации в обитаемых помещениях, полученных путем последовательного обхода, с показаниями стационарно установленного датчика на палубе ходовой рубки.

Значение недельной экспозиции виброускорения  $a_{\text{экв(нед)}}$ , определялось по формуле

$$a_{\text{нед}} = \sum_{i=1}^7 a_{\text{(сут)i}}, \quad (1)$$

где  $a_{\text{(сут)i}}$  – суточная экспозиция виброускорения, которая равна эквивалентному скорректированному виброускорению, характеризующему воздействию вибрации за все три восьмичасовых периода суточной активности (вахта, отдых, сон):

$$a_{\text{(сут)}} = \sqrt{\frac{(a_{\text{экв(раб)}}^2 + a_{\text{экв(отдых)}}^2 + a_{\text{экв(сон)}}^2)}{3}}; \quad (2)$$

$$a_{\text{экв}} = \sqrt{\left( \sum_{i=1}^{720} a_w^2 \right) / 720}. \quad (3)$$

В свою очередь  $a_w$  – скорректированное значение виброускорения за время воздействия 120 с – определялось по формуле

$$a_w = \sqrt{\sum_{j=1}^n (W_j \cdot a_j)^2}, \quad (4)$$

где  $a_j$  – среднеквадратическое значение виброускорения в  $j$ -й 1/3-октавной полосе частот;  $W_j$  – коэффициент частотной коррекции для  $j$ -й 1/3-октавной полосы в соответствии с [7];  $n$  – число третьоктавных полос.

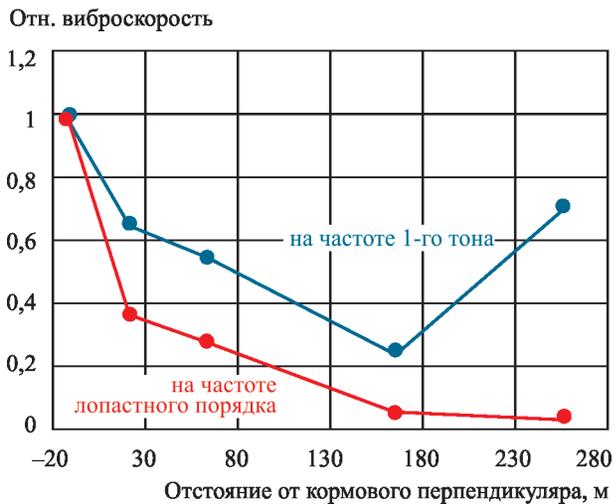
Допустимая суточная экспозиция для члена экипажа складывалась из трех парциальных 8-часовых экспозиций, соответствующих времени пребывания на рабочем месте, активного отдыха и сна. Допустимая суточная экспозиция определяется исходя из постоянного 8-часового воздействия скорректированного виброускорения, допускаемого [7] для помещений класса В (отдых, сон) и С (работа). Допустимая недельная экспозиция равна сумме допустимых суточных экспозиций и определяется аналогично формуле (1).

### Анализ вибрации корпуса судна при движении в сплошных льдах

В результате наблюдений установлено, что каждая группа режимов характеризуется своими уровнями вибрации и составом возмущающих сил. При движении в сплошных ровных льдах в спектре виброускорений корпуса присутствуют значительные уровни вибрации корпуса на его низших частотах, а также на частоте лопастного порядка. На режимах движения, близких к швартовным, когда скорость судна становится меньше 2 уз, при мощности гребных электродвигателей 60–100 % от максимальной наибольшие уровни вибрации наблюдаются на частоте лопастного порядка. На рис. 2 сопоставлены

**Рис. 2.** Пример спектра виброускорений кормовой оконечности при движении в сплошных ровных льдах и на швартовном режиме



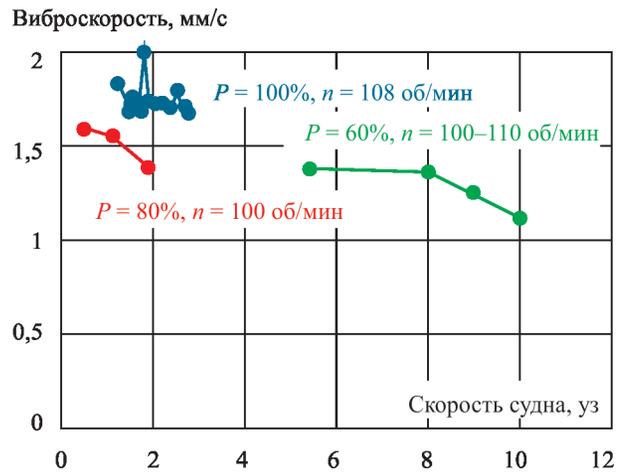


**Рис. 3.** Распределение относительных уровней вибрации на частоте 1-го тона и на частоте лопастного порядка по длине корпуса

спектр виброускорений кормовой оконечности при движении в сплошных льдах и на режиме, близком к швартовному.

На рис. 3 представлено типовое распределение уровней вибрации 1-го тона корпуса и на частоте лопастного порядка по длине корпуса в безразмерных единицах. Из рисунка видно, что наибольшие значения уровней вибрации наблюдаются в точке G1, расположенной на транце. Поэтому в статье приведен анализ вибрации применительно к этой точке. В рамках данного исследования проанализированы уровни вибрации, вызванной работой гребных винтов и взаимодействием корпуса со льдом, толщина которого изменялась в широких пределах от 0,2 до 1,5 м. При этом во льдах толщиной до 0,8 м судно двигалось, как правило, носом вперед, а во льдах до 120 см – преимущественно кормой вперед.

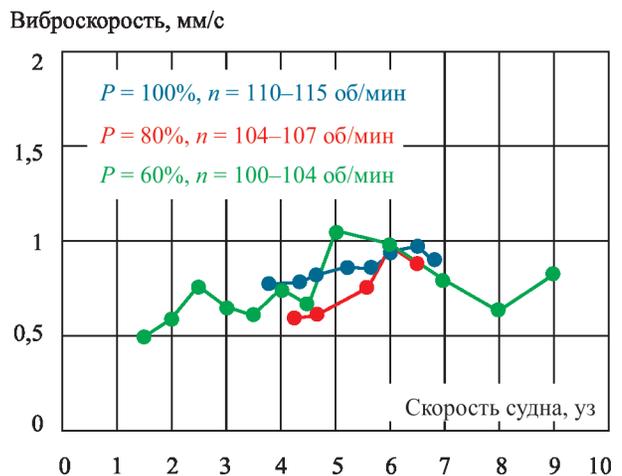
На рис. 4, 5 представлены уровни вибрации кормовой оконечности на частоте лопастного порядка и соответствующие им скорости движения судна при различных уровнях мощности гребных электродвигателей. Из рисунков следует, что уровни вибрации при движении носом вперед и кормой вперед изменяются незначительно с изменением скорости движения судна и мощности на гребных валах. Также стоит отметить, что при движении кормой вперед уровни вибрации в 1,5–2 раза ниже, чем при движении носом вперед.

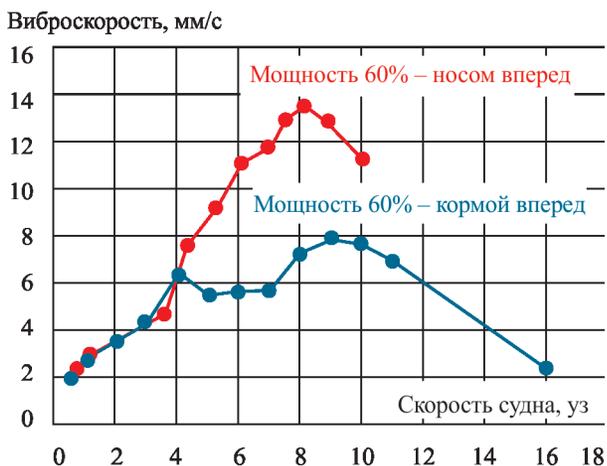


**Рис. 4.** Зависимость уровней вибрации от работающих винтов при движении во льдах носом вперед:  $P$  – мощность на винтах, в процентах от максимальной;  $n$  – частота вращения гребных винтов

Второй значимой причиной возникновения вибрации является взаимодействие корпуса со льдом. При этом наибольшие уровни наблюдаются на частоте 1-го тона вертикальных колебаний. На рис. 6 представлены зависимости уровней указанной вибрации при 60 % мощности гребных валов. Во время рейса максимально достижимая скорость при движении

**Рис. 5.** Зависимость уровней вибрации от работающих винтов при движении во льдах кормой вперед:  $P$  – мощность на винтах, в процентах от максимальной;  $n$  – частота вращения гребных винтов





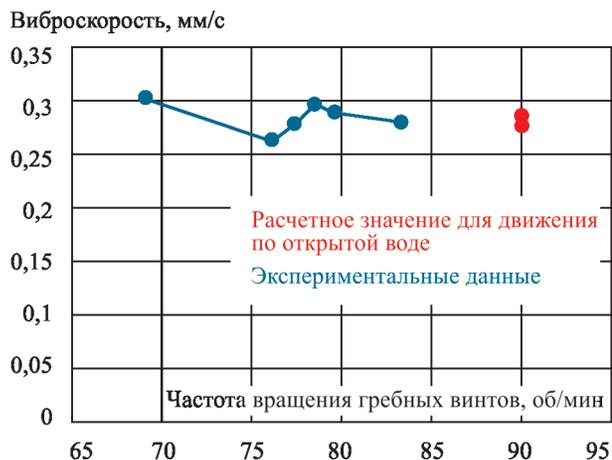
**Рис. 6.** Зависимость уровней вибрации на частоте 1-го тона вертикальных колебаний от скорости судна

с данной мощностью носом вперед составляла 10 уз, в то время как при движении кормой вперед она достигала 16 уз.

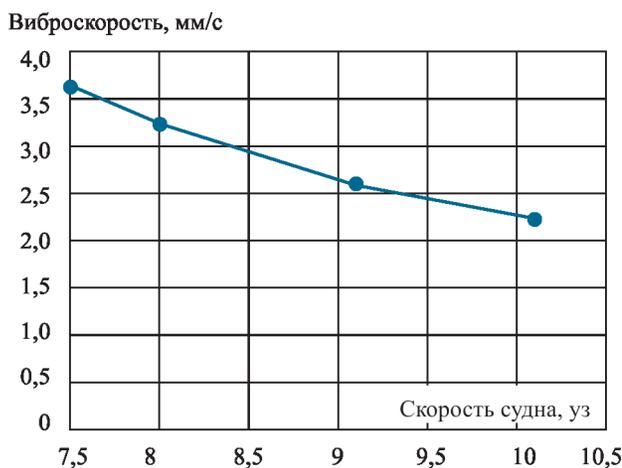
Из рис. 6 видно, что при движении носом вперед уровни вибрации существенно больше, чем при движении кормой вперед. Зависимости уровней вибрации от скорости при постоянной мощности двигателей имеют выраженные максимумы. Уровни вибрации кормовой оконечности одинаковы в диапазоне скоростей 1–4 уз. При росте скорости с 4 до 8 уз уровни вибрации при движении носом вперед увеличиваются с 6 до 14 мм/с, а при дальнейшем увеличении скорости начинают снижаться. При движении кормой вперед уровни вибрации возрастают незначительно с увеличением скорости и достигают своего максимального значения 8 мм/с при 10 уз. При дальнейшем увеличении скорости вибрация снижается. Наличие выраженных максимумов в зависимостях от скорости связано с тем, что при средней скорости движения силы от взаимодействия корпуса со льдом имеют наибольшие значения. Теоретическое обоснование этого явления представлено в [4].

### Анализ вибрации корпуса судна при движении в канале за ледоколом

Проводка судна осуществлялась атомным ледоколом, ширина канала составляла 30 м при ширине рассматриваемого судна 50 м. Судно двигалось в канале со скоростью 7–10 уз при мощности порядка 7–30 % от максимальной. Уровни вибрации на частоте лопастного порядка представлены на рис. 7.



**Рис. 7.** Уровни вибрации на лопастной частоте при движении в канале за ледоколом



**Рис. 8.** Зависимость уровней вибрации корпуса газовоза на частоте 1-го тона от скорости движения при мощности 30 %

Для наглядности на графике также представлен расчетный уровень вибрации для движения по открытой воде с частотой вращения гребных винтов 90 об/мин. Из рис. 7 видно, что уровни вибрации на лопастной частоте при движении в канале за ледоколом изменяются незначительно, в пределах 0,25–0,3 мм/с, и примерно совпадают с расчетным уровнем при движении по открытой воде. Из этого можно сделать вывод о том, что на данном режиме взаимодействия лопастей гребных винтов со льдом практически не происходит.

На рис. 8 представлена зависимость уровней вибрации на частоте 1-го тона вертикальных колебаний от скорости судна при 30 % мощности. Из рисунка видно, что наибольшие уровни вибрации возникают при движении со скоростью 7,5 уз. С ростом скорости, обусловленным снижением толщины льда, уровни вибрации уменьшаются. При движении на режимах с меньшей мощностью уровни вибрации на частоте 1-го тона незначительны и не превышают 0,5–1 мм/с.

### Анализ вибрации корпуса судна при работе на швартовых режимах

Швартовый режим характеризуется нулевой скоростью движения судна при вращающихся гребных винтах. При этом ВРК повернуты либо на 0°, что соответствует режиму упора носом, либо на 180°, что соответствует упору кормой. Вибрация на частоте 1-го тона вертикальных колебаний незначительна в силу отсутствия процесса разрушения ледового поля корпусом. Результаты измерения на швартовых режимах для случаев упора носом и упора кормой представлены на рис. 9. На рассматриваемых режимах все ВРК работали с одинаковыми частотами вращения.

Из рисунка следует, что уровни вибрации на частоте лопастного порядка при упоре носом в основном существенно выше, чем при упоре кормой. При упоре носом происходит значительное увеличение вибрации при подъеме мощности на гребных винтах с 75 до 100 %, примерно пропорционально 6-й степени частоты вращения гребных винтов. Аналогичное явление

наблюдалось на ледоколах типа «Арктика» [1], где для его объяснения было высказано предположение о возникновении кавитации на гребных винтах при работе на швартовых режимах, которая приводит к резкому увеличению уровней вибрации на частоте лопастного порядка. Следует отметить, что возрастание вибрации на швартовых и близких к ним режимах характерно не для всех судов ледового плавания. Например, в [2, 3], где исследовались параметры вибрации научно-экспедиционного судна и дизель-электрического ледокола, отмечалось, что уровни вибрации корпуса при работе во льдах на швартовых и близких к ним режимах возрастают незначительно по сравнению с другими режимами движения во льдах. Таким образом, этот вопрос требует дальнейшего изучения и накопления натурных данных.

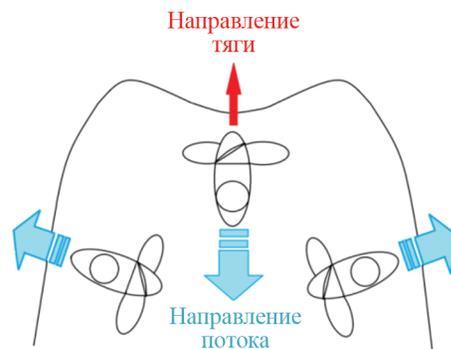
### Анализ вибрации корпуса судна при размывании ледового поля

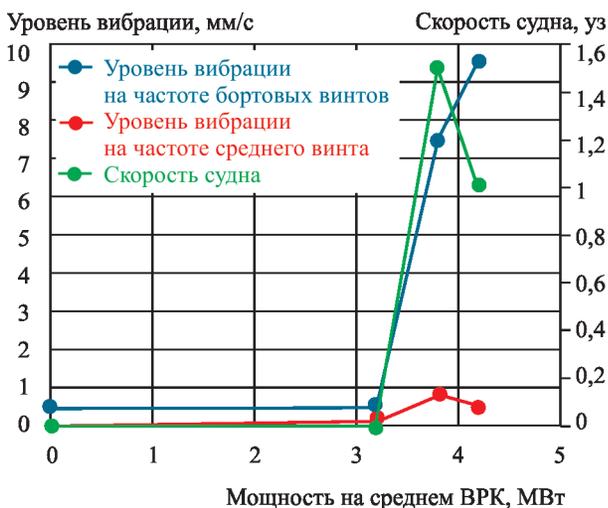
Режим размывания ледового поля является самым тяжелым для рассматриваемого судна. Он применяется в том случае, когда движение прямым ходом кормой вперед с постоянной скоростью затруднительно и в силу тяжести ледовых условий скорость судна снижается практически до нуля. Тогда судно останавливается, а бортовые ВРК разворачиваются, как показано на рис. 10. Мощность среднего ВРК составляет порядка 20 %, а мощность бортовых ВРК 80–100 % от максимальной мощности. Вследствие образования трещин, вызванных потоками воды от бортовых ВРК, разрушение льда суще-

Рис. 9. Уровни вибрации кормовой оконечности на швартовых режимах



Рис. 10. Схема поворота ВРК на режиме размывания льда

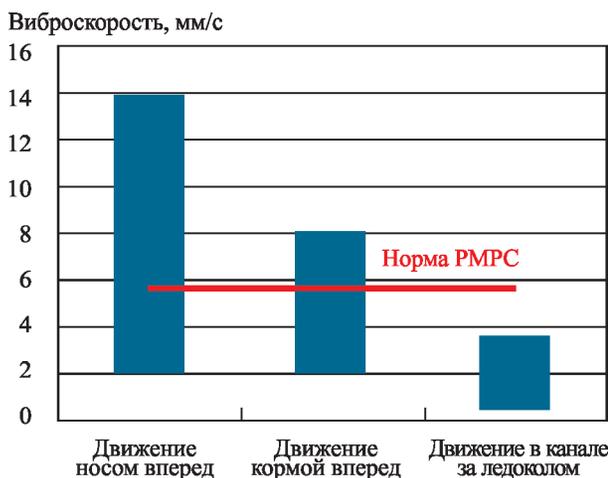
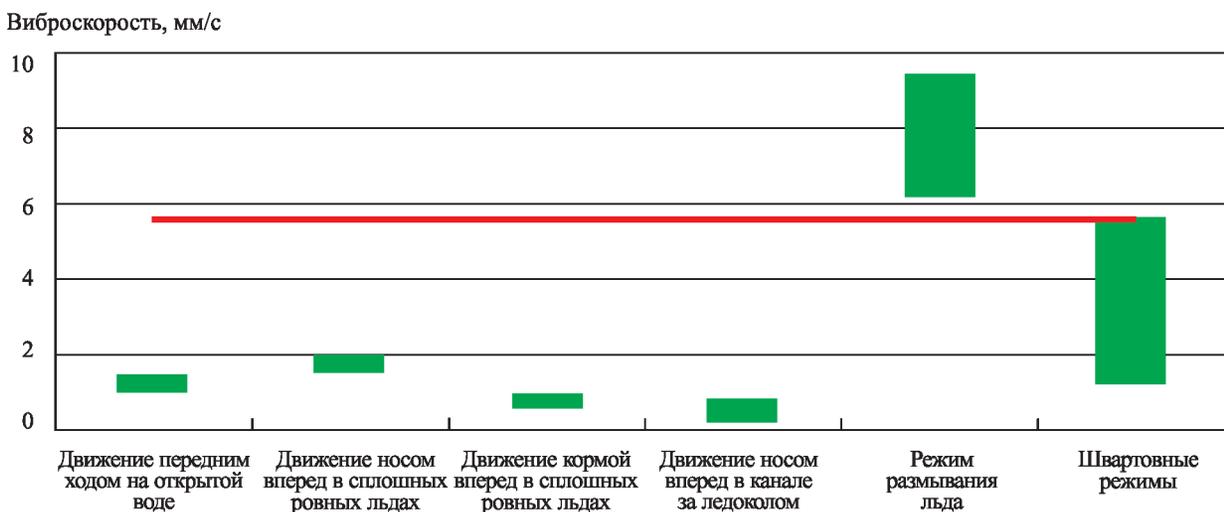




**Рис. 11.** Зависимость уровней вибрации на локальных частотах вращения бортовых винтов и среднего винта, а также скорости судна от мощности на среднем ВРК

ственно облегчается, судно увеличивает мощность на среднем ВРК и медленно начинает движение. При этом происходит рост вибрации на частоте вращения бортовых винтов с 0,5 до 10 мм/с, в то время как уровни вибрации на частоте вращения среднего винта практически не изменяются (рис. 11). Значительное увеличение вибрации происходит из-за того, что при движении судна бортовые винты работают в скошенном потоке.

**Рис. 13.** Диапазоны изменения уровней вибрации корпуса на частоте 1-го тона на различных группах режимов движения



**Рис. 12.** Диапазоны изменения уровней вибрации корпуса на частоте 1-го тона на различных режимах движения

### Сопоставление уровней общей вибрации корпуса с нормами Российского морского регистра судоходства

В результате анализа данных установлено, что уровни общей вибрации корпуса на частоте 1-го тона вертикальных колебаний могут превышать нормы Российского морского регистра судоходства (РМРС)

при движении в сплошном льду как носом вперед, так и кормой вперед. При движении в канале за ледоколом превышений не зафиксировано (рис. 12).

На рис. 13 представлены диапазоны возможных значений уровней вибрации на различных группах режимов. Для сопоставления приведены расчетные значения вибрации на частоте лопастного порядка при движении по открытой воде. Наибольшие уровни вибрации возникают на режиме размывания льда и варьируются в диапазоне 6,5–9,5 мм/с, что гарантированно превышает требования РМРС. На остальных группах режимов уровни вибрации удовлетворяют требованиям РМРС.

Следует отметить, что режим размывания во время эксплуатации встречается достаточно редко, около 9 % от общей продолжительности рейса, а максимальные уровни вибрации превышают нормы менее чем в 2 раза. Таким образом, указанные превышения можно считать безопасными с точки зрения обеспечения длительной прочности.

### Вибрация в обитаемых помещениях при плавании во льдах

Проведен анализ долговременных распределений уровней вибрации в обитаемых помещениях путем пересчета данных со стационарных датчиков, размещенных в надстройке, на конкретные помещения с учетом передаточных коэффициентов. В результате анализа данных установлено, что уровни вибрации в помещениях при традиционном подходе к их оценке могут превышать требования [5] на всех режимах

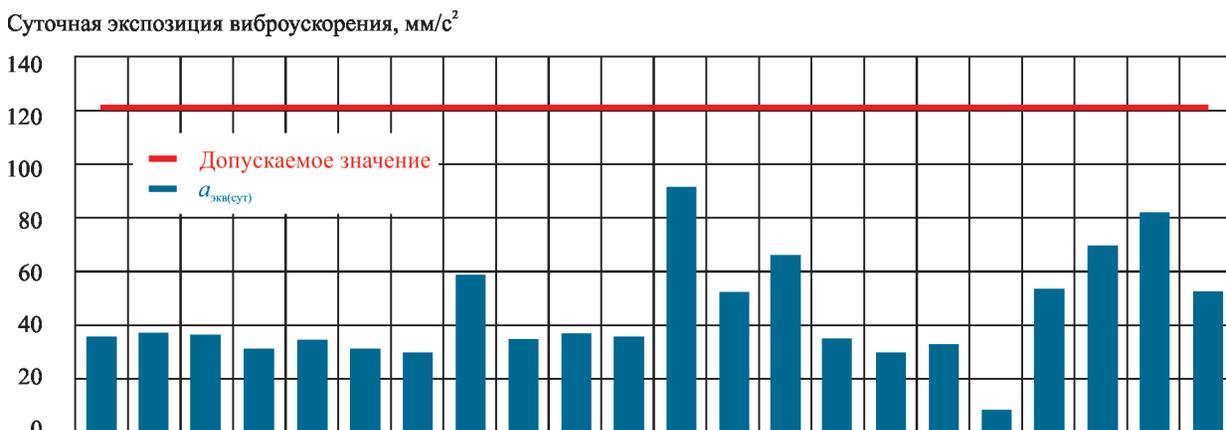


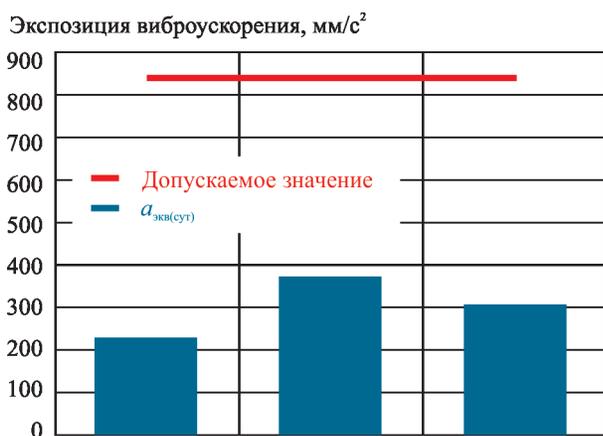
Рис. 14. Вероятность превышения санитарных норм вибрации в спальнях помещений 4-го яруса надстройки при движении во льдах в вертикальном (В), траверзном (Т) и продольном (П) направлениях

движения, за исключением движения в канале за ледоколом. На рис. 14 представлены вероятности превышения норм для каждой группы режимов.

Для адекватного учета различных условий эксплуатации была выполнена дозная оценка воздействия за все время наблюдений. Результаты суточной оценки применительно к старшему помощнику капитана представлены на рис. 15. Видно, что наименьшая суточная экспозиция наблюдается 7 марта: судно целый день стояло неподвижно. Наибольшие значения экспозиции наблюдаются 1 и 10 марта.

Рис. 15. Суточные экспозиции вибрации, определенные для старшего помощника капитана за весь период наблюдения





**Рис. 16.** Недельные экспозиции вибрации, определенные для старшего помощника капитана за весь период наблюдения

В эти дни судно продолжительно двигалось в тяжелых ледовых условиях.

На основании значений суточных экспозиций по формуле (1) были определены недельные экспозиции вибрации, приведенные на рис. 16. Видно, что недельные экспозиции виброускорений значительно ниже допускаемых значений. Таким образом, можно сделать вывод о том, что дозный подход к оценке вибрационного воздействия на экипаж при плавании во льдах дает более адекватную оценку, чем традиционный подход к нормированию, применяющийся на сегодняшний день.

## Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. На режимах движения носом и кормой вперед в сплошных льдах, а также при движении в канале за ледоколом основными силами, вызывающими вибрацию, являются силы от работающих гребных винтов и силы от взаимодействия корпуса со льдом. При движении по открытой воде, на швартовных режимах и на режимах размывания льда уровни вибрации корпуса на низших собственных частотах незначительны, а основными источниками вибрации являются работающие гребные винты.
2. Уровни вибрации корпуса на частоте 1-го тона могут превышать требования РМРС при движении в сплошных льдах как носом, так и кормой вперед. При движении в канале за ледоколом

уровни вибрации на частоте 1-го тона значительно ниже нормы. Уровни вибрации на частоте лопастного порядка удовлетворяют требованиям РМРС на всех режимах, за исключением режима размывания льда. Однако следует отметить, что данный режим встречается достаточно редко во время эксплуатации судна и данные превышения носят непродолжительный характер.

3. Результаты анализа подтверждают целесообразность использования вероятностного подхода к оценке вибрации корпуса и дозной оценки при плавании во льдах, позволяющих адекватно учесть изменчивость вибрационного процесса при ледовой эксплуатации.
4. Необходимо дальнейшее накопление натурных данных по общей вибрации и вибрации в помещениях судов активного ледового плавания и ледоколов.

## Библиографический список

1. Буданов Д.А., Никольский Ю.А. Особенности ходовой вибрации корпуса судна при плавании во льдах // Polartech'96. International Conference on Development and Commercial Utilization of Technologies in Polar Regions. September 24–26, 1996, Krylov Shipbuilding Research Institute, St. Petersburg, Russia.
2. Spiridonov N.N., Repin R.V. Operational monitoring of vessel's vibration parameters when operating in ice // Proc. of 24th International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference. Korea, 2014.
3. Иванов М.А., Спиридонов Н.Н., Гурьев О.Н. Исследование параметров ходовой вибрации дизель-электрического ледокола по данным эксплуатационного мониторинга // Морской вестник. 2017. Вып. № 1(13).
4. Спиридонов Н.Н., Белов И.М., Дульнев А.И. Вероятностные аспекты моделирования возмущающих сил при взаимодействии корпуса судна со льдом // Труды Крыловского государственного научного центра. 2016. Вып. 94(378).
5. Уровни вибрации на морских судах. Санитарные нормы СН 2.5.2.048-96.
6. МУК 4.3.3213-14. Измерение и оценка вибрации на судах и морских сооружениях. М.: Роспотребнадзор, 2014.
7. ГОСТ Р ИСО 6954-2009. Вибрация. Руководство по измерению вибрации и оценке ее воздействия на человека на пассажирских и торговых судах.

### Сведения об авторах

*Спиридонов Николай Николаевич*, инженер 1-й категории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Телефон: +7 (812) 415-46-16. E-mail: nns Spiridonov@yandex.ru.

*Белов Исай Маркович*, начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Телефон: +7 (812) 415-46-16. E-mail: belismar@yandex.ru.

*Дульнев Андрей Иванович*, д.т.н, начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Телефон: +7 (812) 415-48-23. E-mail: A\_Dulnev@ksrc.ru.

*Родосский Павел Андреевич*, инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Телефон: +7 (812) 415-46-16. E-mail: rodosskij@yandex.ru.

Поступила / Received: 05.03.18  
Принята в печать / Accepted: 03.05.18  
© Коллектив авторов, 2018