

- promyslovye mekhanizmy, sistemy i ih ekspluatatsiya / B.E. SHERPANOV. – M.: Agropromizdat. – 1986. – 283 s.
15. Roh, M.I., Lee K.Y. Examples of Ship Design Model. In: Computational Ship Design. Springer, Singapore. 2018. Pp. 347–353. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4885-2_17
 16. Sharatov, A.S. Ocenka vliyaniya manevra krupnotonnazhnogo tankera na vintovuyu harakteristiku malo-oborotnogo dvigatelya // Morskije tekhnologii: problemy i resheniya-2021. – 2014. – Pp. 89-92.
 17. Sharatov, A.S. Verification of the hypothesis of jet the impact of additional water supplied to the blades of the propeller // Ekspluatatsiya morskogo transporta. – 2019. – №1. – Pp. 67-76.
 18. Korol Y. M., Influence of blade and profile characteristics on hydrodynamic efficiency of marine propellers / Y. M. Korol, O. M. Kornelyuk // Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo nacionalnogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta. – 2017. – №4(70). – Pp. 80-88.
 19. Sertifikatsiya Flowvision
Url:<http://www.thesis.com.ru/software/flowvision/> (data obrashcheniya 01.12.2021).
 20. Sharatov, A. S. Improvement of mooring tests of main engine running to fixed pitch propeller / A. S. Sharatov, A. N. Gorbenko // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies. 2021. №. 2. Pp. 32-42. DOI: <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2021-2-32-42>
 21. Bazhankin, Y. Analysis of propeller – steering element interaction / Nauchnye problemy vodnogo transporta. – 2011. – №29. – Pp.11-15.
 22. Katsman, F. M. Ekspluatatsiya popul'sivnogo kompleksa morskogo sudna / F. M. Kacman. – M.: Transport, 1987. – 222p.

УДК 621.891:621.892

DOI: 10.34046/aumsuomt 103/23

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ПО СПЕКТРАМ ВИБРАЦИИ

К.Б. Пальчик, кандидат технических наук, доцент

И.М. Кругова, старший преподаватель

Д.В. Огурцов, кандидат технических наук, доцент

Н.А. Халилов, старший преподаватель

Подшипник качения используется во множестве судовых машин и механизмов. Они являются многократно заменяемыми, высоко нагруженными элементами. Износ подшипников и не своевременная их замена могут привести к неработоспособному состоянию механизма и к аварийной ситуации. В статье показаны основные причины выхода из строя подшипников качения. В этой связи, чрезвычайно важно отслеживать их состояние с целью предотвращения аварийных ситуаций. Своевременные методы безразборной диагностики позволяют определить состояние подшипника по спектру вибраций. Для этого используются анализаторы спектра, каждый из которых ориентирован на работу в определенном диапазоне частот. В статье приводится расчет ожидаемого диапазона частот для конкретного подшипника. Это позволяет с помощью выбранного анализатора спектра своевременно отслеживать неисправность подшипника и произвести его замену.

Ключевые слова. Подшипник качения. Износ. Усталость. Дефект. Спектр вибраций. Сепаратная частота. Диагностика. Анализатор спектра.

ASSESSMENT OF THE STATE OF ROLLING BEARINGS BY VIBRATION SPECT

K.B. Palchik, I.M. Krugova, D.V. Ogurtcov, N.A. Khalilov

The rolling bearing is used in a variety of marine machinery and equipment. They are reusable, highly loaded elements. Wear of bearings and their failure to replace them in a timely manner can lead to an inoperative state of the mechanism and to an emergency. The article shows the main reasons for the failure of rolling bearings. In this regard, it is extremely important to monitor their condition in order to prevent emergencies. Timely CIP methods allow you to determine the condition of the bearing based on the vibration spectrum. For this, spectrum analyzers are used, each of which is focused on working in a specific frequency range. The article provides a calculation of the expected frequency range for a particular bearing. This allows the selected spectrum analyzer to timely track and replace bearing failures

Keywords: Friction bearing. Wear. Fatigue. Defect. Vibration spectrum. Separate frequency. Diagnostics. Spectrum analyzer.

Подшипники качения используются во множестве судовых машин и механизмов. Они установлены в электродвигателях, центробежных насосах, сепараторах, газотурбоагрегатах, редукторах, лебедках, и в другом оборудовании.

Статистические исследования надежности подшипников показывают, что отказы подшипников качения являются следствием: усталостного выкрашивания дорожек качения; выкрашивания, обусловленного большим перекосом колец (при сборке); разрушения в результате неправильного выбора типа подшипников; деформации и локального разрушения колец при сборке и монтаже

подшипников на посадочные поверхности с различными искажениями геометрической формы (конусность, овальность и др.); абразивного износа; коррозионного износа; износа вследствие недостатка и низкого качества смазочных материалов; образования микротрещин, вызванных ударами в процессе монтажа [1].

Подшипники качения являются многократнозаменяемыми высоконагруженными элементами. На схеме рисунка 1 перечислены возможные неисправности роликовых подшипников.

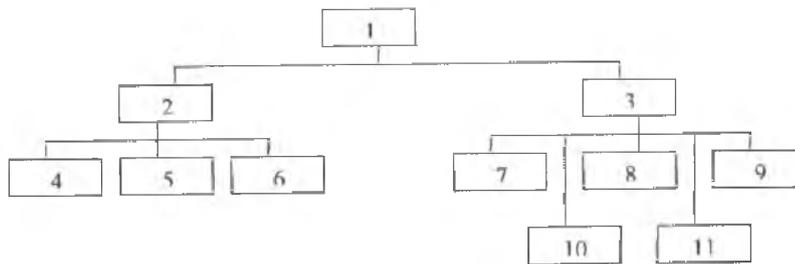


Рисунок 1 – Схема неисправности роликовых подшипников:

1 – неисправности подшипников; 2 – неисправности, не связанные с работой подшипников; 3 – неисправности, возникающий во время работы подшипников; 4 – повреждения при монтаже; 5 – вибрационные явления; 6 – ошибки монтажа; 7 – износ подшипников; 8 – усталость материалов; 9 – перегрев подшипников; 10 – появление электрического тока; 11 – коррозия материала

В подшипниках возможно одновременное появление нескольких неисправностей, главными из которых является износ и усталость. Износ возникает из-за проскальзывания роликов по кольцу и сильно возрастает при загрязнении, ухудшении качества смазки, ржавлении. Водяные включения в смазочном масле особо вредны. Вследствие динамических нагрузок возникают, кроме того, явления усталости материала как на рабочих поверхностях внутреннего и наружного колец, так и в сепараторе подшипника. Периодические деформации приводят к образованию микротрещин, язв и отслаиванию материала, т.е. к питтингу.

Многолетний опыт Шведской компании SKF [2] показывает, что только чуть менее 10% подшипников дорабатывает до окончания проектного срока службы. Около 40% отказов связано с недостаточной смазкой, и около 30% вызвано неверной установкой, т.е. несоосностью или перекосом. Около 20% приходится на другие причины, например, перегрузки или дефекты изготовления и т.д.

Дефекты подшипников качения являются наиболее распространенным типом неисправности, подлежащим вибродиагностике. Дефектный подшипник генерирует вибрационные составляющие, которые не кратны в точности оборотной частоте $1N$, где N число оборотов вала механизма.

Присутствие в спектре вибрации таких составляющих является сигналом неисправности подшипника, требующим немедленной проверки и исключения других возможных причин [3].

На начальных стадиях развития дефекта подшипника в спектре вибрации появляются характерные некратные частотные компоненты, называемые тонами подшипников, а также их гармоники. Тона с уровнем виброскорости 0.15 мм/с выше считаются значительными.

Иногда новый подшипник также создает подшипниковые тоны, что может быть связано с повреждениями при установке, транспортировке или дефектами изготовления. Если дефект подшипника очень небольшой, например, трещина на одном из колец, то в спектре появятся гармоники подшипникового тона, причем амплитуда на его основной частоте будет очень маленькой. Если дефект возникает в виде скола кольца большей площади, то обычно основной тон подшипника выше, чем гармоники. По мере развития дефекта возрастает общий уровень подшипниковых тонов, а также общий уровень широкополосного шума.

Еще один пример боковых полос в спектре подшипника связан с сепараторной частотой (СЧ). Она равна частоте вращения сепаратора внутри подшипника. Если одно из тел качения

имеет скол, трещину или, что еще хуже, развалилось на кусочки, то, находясь в зоне нагружения, оно будет производить вибрационный шум, а вне ее оставаться тихим.

Вращаясь в подшипнике вместе с сепаратором, оно проходит через зону нагружения с частотой СЧ. Тем самым осуществляется амплитудная модуляция сепараторной частоты подшипниковым тоном, и, в результате, вокруг последнего появляются боковые полосы с шагом СЧ.

Финальная стадия износа подшипника иногда называется термальной, когда подшипник становится горячим, а смазка в нем разрушается. Результат - катастрофическое повреждение, сопровождающееся плавлением тел качения и/или колец. На этой стадии, в вибрационном спектре повышается шумовой фон.

Если дефект расположен на внутреннем кольце, то будет происходить амплитудная модуляция тона подшипника частотой вращения. В результате вокруг тона появятся боковые полосы с шагом 1N. Амплитудная модуляция возникает из-за того, что дефект на внутреннем кольце входит и выходит из зонынагружения подшипника один раз за оборот. При нахождении в зоне нагружения дефект вызывает сильную вибрацию на частоте прохождения шариков, а когда он вне зонынагружения – очень слабую. То есть амплитуда вибрации на частоте подшипникового тона изменяется (модулируется) с частотой вращения вала, вызывая боковые полосы.

Боковые полосы, расположенные на расстоянии 1N вокруг тонов подшипника, являются верным признаком его развивающегося износа и почти всегда указывают на дефект внутреннего кольца.

Ключевым моментом эффективности диагностики подшипников является отслеживание развития их тонов во времени (трендов), начиная

с момента возникновения. Иногда небольшой дефект в подшипнике развивается столь стремительно, что в течение короткого времени подшипник полностью разрушается. Поэтому для раннего обнаружения дефекта необходимо чувствовать очень слабые компоненты вибрации. Следует знать, что некоторые типы машин содержат в усредненных спектрах тона подшипников. В этом случае диагностика осуществляется на основе существенного превышения средних уровней. Любые значительные тоны подшипников необходимо внимательно отслеживать на предмет ухудшения. В этой связи, становится актуальной задача определения ожидаемых частот вибраций при проведении мониторинга на судовом оборудовании для правильного выбора частотного диапазона виброанализатора.

Несмотря на многообразие конструктивного исполнения подшипников качения (ПК), при оценке состояния подшипников достаточно знать следующие геометрические характеристики ПК (Рис. 2), [4, 8, 9].

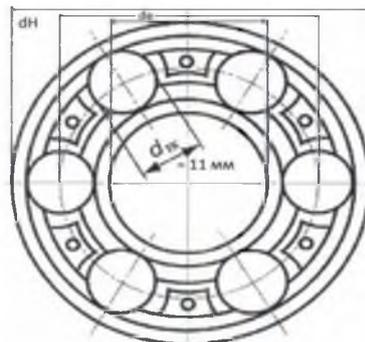


Рисунок 2 – Шарикоподшипник:

dH – диаметр наружного кольца; de – диаметр внутреннего кольца; dmK – диаметр тел качения; dH – диаметр сепаратора $dH = (an + de)/2$; α – угол контакта тела качения с поверхностью качения α (рис. 3, 4).

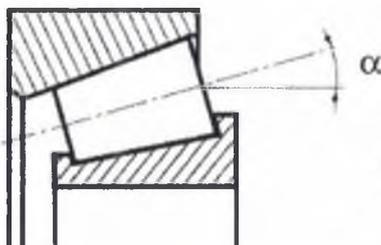


Рисунок 3 – Конический роликоподшипник

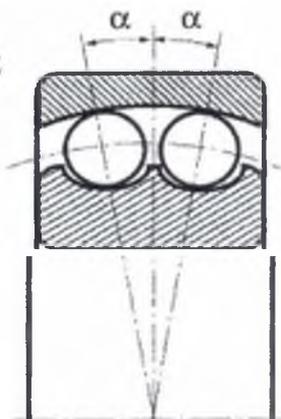


Рисунок 4 – подшипник сферический

Эти характеристики должны быть известны к моменту диагностического эксперимента. В большинстве случаев их значения определяют по справочной литературе, не прибегая к натурным измерениям. Угол контакта α для многих типов ПК составляет 0°

Реальное влияние на параметры вибрации оказывают следующие виды дефектов подшипников качения:

- перекос наружного кольца;
- износ наружного и внутреннего кольца;
- выкрашивание, трещины на поверхностях колец и тел качения;
- износы тел качения и сепаратора.

Отдельно можно выделить нарушения режимов работы, подшипника качения, влияющие на параметры вибрации [10, 11, 12]. К ним относятся:

- обкатывание наружного (неподвижного) кольца;
- неоднородный радиальный натяг;
- сухой контакт поверхностей трения (удары о поверхности трения).

Наконец, на вибрацию подшипника сказываются дефекты других узлов машины. В первую очередь это:

- неуравновешенность ротора;
- дефекты соединительных муфт;
- ослабление креплений подшипниковых узлов к машине или машины к фундаментным конструкциям;
- дефекты соединенных с валом узлов, в том числе шестерен и т. п., создающие ударные нагрузки на подшипник.

Как отмечалось выше, основная идея идентификации неисправностей при спектральных методах вибродиагностики заключается в поиске тех периодических колебаний, которые связаны с возможной неисправностью объекта. Очевидно, что при этом следует знать, на каких частотах будут проявляться те или иные неисправности. В первую очередь, на это влияют конструктивные

особенности и режим работы объекта. Для подшипников качения основными диагностическими частотами являются:

- частота вращения $f_{вр}$;
- частота вращения сепаратора (сепараторная частота) f_c ;
- частота контакта точки тела качения с кольцом подшипника (собственная частота тел качения) f_{mk} ;
- частота перекатывания тел качения по наружному кольцу подшипника f_n ;
- частота перекатывания тел качения по внутреннему кольцу f_v .

Для подшипника с вращающимся внутренним кольцом и неподвижным наружным (наиболее распространенное исполнение) частота вращения $f_{вр}$ измеряется в процессе эксперимента как частота вращения ротора машины, а остальные диагностические частоты рассчитываются по формулам (1-4) [5,6,7]

$$f_c = \frac{1}{2} f_{bp} \left(1 - \frac{d_{mk}}{d_c} \cdot \cos \alpha \right) \quad (1)$$

$$f_{mk} = f_c \left(\frac{d_c}{d_{mk}} + \cos \alpha \right) \quad (2)$$

$$f_n = \frac{1}{2} f_{bp} \cdot z \left(1 - \frac{d_{mk}}{d_c} \cdot \cos \alpha \right) \quad (3)$$

$$f_v = \frac{1}{2} f_{ep} \cdot z \left(1 + \frac{d_{mk}}{d_c} \cdot \cos \alpha \right) \quad (4)$$

где : z – число тел качения

Значительные различия в особенностях формирования сигнала вибрации позволяют выделить среди перечисленных выше дефектов подшипников, режимов работы, дефектов других узлов неисправностей:

- обкатывание наружного (неподвижного) кольца;
- неоднородный радиальный натяг;
- перекос наружного (неподвижного) кольца;
- износ наружного кольца;
- раковины, трещины на наружном кольце;
- износ внутреннего кольца;

Рассмотрим ожидаемые частоты вибраций для подшипника марки 306V:

Подшипник 306 V: $d=72$ мм; $d_c=51$ мм; $d_v=30$ мм; $d_{mk}=11$ мм; $z=15$ шт.

1. Частота вращения $f_{вр} = 600$ об/мин. = 10 об/сек. (10Гц)

2. Частота вращения сепаратора (сепараторная частота)

$$f_c = \frac{1}{2} f_{bp} \left(1 - \frac{d_{mk}}{d_c} \cdot \cos 0^\circ \right) = \frac{1}{2} 10 \left(1 - \frac{11}{51} \right) = 3,92 \text{ об/сек.} \quad (3.92 \text{ Гц})$$

3. Частота контакта точки тела качения с кольцом подшипника (собственная частота тел качения)

$$f_{mk} = f_c \left(\frac{d_c}{d_{mk}} + \cos \alpha \right) = 3,92 \left(\frac{51}{11} + 1 \right) = 22,106 / \text{сек.} \quad (22.1 \text{ Гц})$$

4. Частота перекачивания тел качения по наружному кольцу

$$f_n = \frac{1}{2} f_{bp} \cdot z \left(1 - \frac{d_{mk}}{d_c} \cdot \cos \alpha \right) = \frac{1}{2} 10 \cdot 15 \left(1 - \frac{11}{51} \cdot 1 \right) = 58,806 / \text{сек.} \quad (58.8 \text{ Гц})$$

5. Частота перекачивания тел качения по внутреннему кольцу

$$f_e = \frac{1}{2} f_{bp} \cdot z \left(1 + \frac{d_{mk}}{d_c} \cdot \cos 0^\circ \right) = \frac{1}{2} 10 \cdot 15 \left(1 + \frac{11}{51} \cdot 1 \right) = 91,1806 / \text{сек.} \quad (91.18 \text{ Гц})$$

Приведенные результаты показывают, что диапазон частот используемого анализатора спектра вибраций для данного подшипника должен быть от 3Гц до 100 Гц. Это позволяет отслеживать развивающиеся дефекты подшипника и своевременно производить их замену, предотвращая тем самым аварии оборудования.

Литература

1. Черменский О.Н., Федотов Н.Н. Подшипники качения. Справочник – каталог.– М.: Машиностроение, 2003.– 576 с.
2. Повреждения подшипников качения и их причины. SKF, 1994 <https://www.skf.com>
3. Вибрационный анализ и диагностика машин. Виброэксперт.– М.: «Октавия», PREDICT/DLI (USA), 2000.
4. Бейзельман Р.Д., Цыпкин Б.В., Перель Л.Я. Подшипники качения. Справочник.– М.: Машиностроение, 1975.– 608 с.
5. Русов В.А., Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным характеристикам. Виброцентр, 2012 <https://vibrocenter.ru/book6.htm>
6. Епихин А.И., Кондратьев С.И., Хекерт Е.В. Применение нейронных сетей на базе многослойного перцептрона с использованием нечеткой логики для технической диагностики судовых технических средств// Эксплуатация морского транспорта.– 2020.– № 3 (96).– С. 111-119.
7. Епихин А.И., Кондратьев С.И., Хекерт Е.В. Прогнозирование многомерных нестационарных временных рядов с использованием нейромоделирования// Морские интеллектуальные технологии.– 2020.– № 4-4 (50).– С. 23-27.
8. Кондратьев С.И. Обеспечение безопасности плавания транспортных судов в порту при маневрировании в операционной акватории причала [Текст] / С.И. Кондратьев, В.В. Устинов // Транспортное дело России.– 2012.– № 6-2.– С. 196-197.
9. Епихин А.И., Хекерт Е.В., Модина М.А. Принципы нейрорегуляции и варианты архитектуры нейронных сетей, применительно к слож-

ной динамической системе СЭУ-судно //Морские интеллектуальные технологии.– 2020.– № 4-4 (50).– С. 18-22.

10. Кондратьев С.И. Методы вычисления характеристических полиномов в задачах управления подвижных объектов: учебное пособие / С. И. Кондратьев, Г. А. Зеленков.– Новороссийск: Федеральное гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Морская гос. акад. им. адмирала Ф. Ф. Ушакова", 2007.
11. Энгватова В.В., Дмитренко Е.В., Шкода В.В., Солонникова Н.В., Модина М.А. Безопасность жизнедеятельности и охрана труда работников промышленных предприятий. Часть 2: учебное пособие.– Краснодар, 2020.
12. Студеникин Д.Е., Бован С.Д., Хекерт Е.В., Модина М.А. Использование нейронных сетей для организации визуального наблюдения//Морские интеллектуальные технологии.– 2019.– № 4-3 (46).– С. 91-95.

References:

1. SChermenskij O.N., Fedotov N.N. Podshipniki kacheniya. Spravochnik – katalog M. Mashinostroenie, 2003, 576 str.
2. Povrezhdeniya podshipnikov kacheniya i ih prichiny. SKF, 1994 <https://www.skf.com>
3. Vibracionnyj analiz i diagnostika mashin. Vibroekspert. M.: «Okta-viya», PREDICT/DLI (USA), 2000
4. Bejzel'man R.D., Cypkin B.V., Pereľ L.YA. Podshipniki kacheniya. Spravochnik, M. Mashinostroenie, 1975, 608 str.
5. Rusov V.A., Diagnostika defektov vrashchayushchegosya oborudovaniya po vibracionnym ha-rakteristikam. Vibrocentr, 2012 <https://vibrocenter.ru/book6.htm>
6. Epihin A.I., Kondrat'ev S.I., Hekert E.V. Prime-nenie nejronnyh setej na baze mnogoslajnogo per-ceptrona s ispol'zovaniem nechetkoj logiki dlya tekhnicheskoy diagnostiki sudovyh tekhnicheskikh sredstv//Eksploataciya morskogo transporta. 2020. № 3 (96). S. 111-119.
7. Epihin A.I., Kondrat'ev S.I., Hekert E.V. Prognozirovanie mnogomernyh ne-stacionarnyh vremennyh ryadov s ispol'zovaniem nejromodelirovaniya//

- Mor-skie intellektual'nye tekhnologii. 2020. № 4-4 (50). S. 23-27.
8. Kondrat'ev S.I. Obespechenie bezopasnosti plavaniya transportnyh sudov v portu pri manevrirovaniy v operacionnoj akvatorii prichala [Tekst]/S.I. Kondrat'ev, V.V. Ustinov // Transportnoe delo Ros-sii. 2012. № 6-2. S. 196-197
 9. Epihin A.I., Hekert E.V., Modina M.A. Principy nejrourpravleniya i varianty arhitektury nejronnyh setej, primenitel'no k slozhnoj dinamicheskoy sisteme SEU-sudno Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. № 4-4 (50). S. 18-22.
 10. Kondrat'ev S.I. Metody vychisleniya harakteristicheskikh polinonov v zadachah upravleniya podvizhnyh ob"ektov. Uchebnoe posobie / S. I. Kondrat'ev, G. A. Zelenkov // Federal'noe gos. obrazovatel'noe uchrezhdenie vyssh. prof. obrazovaniya "Morskaya gos. akad. im. admirala F. F. Ushakova". Novorossiysk, 2007.
 11. Engovatova V.V., Dmitrenko E.V., SHkoda V.V., Solonnikova N.V., Modina M.A. Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti i ohrana truda rabotnikov promyshlennyh predpriyatij. CHast' 2. Uchebnoe posobie / Krasnodar, 2020.
 12. Studenikin D.E., Bovan S.D., Hekert E.V., Modina M.A. Ispol'zovanie nejronnyh setej dlya organizacii vizual'nogo nablyudeniya // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. № 4-3 (46). S. 91-95.

УДК629.561.5

DOI: 10.34046/aumsuomt 103/24

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ СУДОХОДСТВА И СУДОСТРОЕНИЯ ДЛЯ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО КОРИДОРА И ЗАМЕРЗАЮЩИХ РЕК

Е.В. Фальмонов, ведущий инженер,

Ю.В. Сторонкин, студент 3 курса,

Е.А. Черепкова, кандидат технических наук, доцент

В статье рассматривается анализ экономической и политической эффективности развития Северного морского коридора. Представлены способы движения судов в арктических морях и типы судов. Представлены новые транспортные и ледокольные суда для Арктики. Сформулированы недостатки традиционной технологии ледовых проводок и ледоколов. Авторами предложены способы прокладки и очистки ледового канала и конструкция судов для его осуществления.

Ключевые слова: ледокольные суда, винто-рулевой комплекс, ледопроницаемость, колесное судно, ледофрез.

INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN THE FIELD OF SHIPPING AND SHIPBUILDING FOR THE NSR AND FREEZING RIVERS

E.V.Falmonov, Y.V.Sidekin, E.A.Cherepkova

The article examines the analysis of the economic and political effectiveness of the development of the Northern Sea Corridor. The methods of vessel movement in the Arctic seas and types of vessels are presented. New transport and icebreaking vessels for the Arctic are presented. The disadvantages of the traditional technology of ice wiring and icebreakers are formulated. The authors have proposed a method for laying and cleaning an ice channel and the design of vessels for its implementation.

Keywords: icebreaking vessels, screw-steering complex, ice penetration, wheeled vessel, ice cutter.

Введение

Северный морской коридор (СМК) является главной арктической морской транспортной системой, которая играет ключевую роль в развитии северной транспортной системы. Это кратчайший морской путь для перевозки грузов из Западной Европы в Восточную Азию, поэтому интерес коммерческих компаний к нему возрастает с каждым годом. Это делает его важной частью Российской экономики. Однако, несмотря на это освоение, происходит медленно. Главной причиной этого является то, что большую часть года северные моря покрыты льдом и недоступны для

обычных транспортных судов. Для проводки транспортных судов используются ледоколы, но их применение связано с высокими затратами, поэтому коммерческие компании предпочитают пользоваться южными маршрутами для доставки грузов. Целью данной работы являются: анализ существующей технологии транспортной работы в арктических морях, определение конструктивных и эксплуатационных недостатков существующих ледокольных судов и предложение их новых типов, использование которых будет более эффективным и экономически выгодным.