

УДК 621.822.2

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_04_XX

EDN: KCJPBB

Влияние на работу упорного подшипника скольжения турбомашин формы контактов элементов механического выравнивающего устройства

Н.Н. Гордеев, А.А. Смирнов, Е.А. Малявко

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Различие жесткостей статора и ротора турбомашин вызывает неравномерное распределение нагрузки между сегментами упорного подшипника скольжения. Усложнение конструкций турбомашин и режимов их работы увеличивает данную неравномерность и снижает эффективность работы подшипника. Одним из технических решений для повышения эффективности таких подшипников является включение в их состав механических выравнивающих устройств. В технической литературе практически отсутствуют конкретные сведения об условиях взаимных перемещений элементов данных устройств, а также о влиянии их на эффективность подшипника. Кроме того, практически нет рекомендаций по их конструированию. Из-за чего при создании новой техники требуется проводить трудоемкие испытания упорных подшипников с выравнивающими устройствами.

Цель — получение информации о взаимных перемещениях элементов, о воздействии формы контактных поверхностей на перемещения и о видах сил сопротивления, влияющих на эффективность работы устройства, а также выработка рекомендаций по использованию форм контактных поверхностей.

Материалы. Выбрана схематизированная модель взаимодействия рычагов нижнего ряда механического выравнивающего устройства с промежуточными телами в виде сфер и установленными в корпусе опорами. Рассмотрено девять вариантов моделей. Анализ работы всех вариантов выполнен при допущениях, что все детали абсолютно жесткие. При расчетах варьировались форма и размеры контактных поверхностей рычагов нижнего ряда и опорных элементов корпуса. В качестве критериев эффективности приняты соотношения плеч моментов, действующих на рычаг нижнего ряда сил и перемещений в контактах.

Результаты. При повороте рычага нижнего ряда плечи моментов сил справа и слева от опоры становятся не равными друг другу. В контактах рычагов с промежуточными телами присутствует трение скольжения вместо трения качения.

Выводы. Форма опорной поверхности рычага нижнего ряда существенно влияет на выравнивание сил по сегментам. При проектировании необходимо выбирать форму опорных поверхностей рычага нижнего ряда и опоры в корпусе, исключающую перекачивание рычага по опоре.

Ключевые слова: упорный подшипник скольжения; механическое выравнивающее устройство; контакт; рычаг; плечо рычага; промежуточное тело; расчет.

Как цитировать

Гордеев Н.Н., Смирнов А.А., Малявко Е.А. Влияние на работу упорного подшипника скольжения турбомашин формы контактов элементов механического выравнивающего устройства // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 4. С. X. DOI: 10.52899/24141437_2025_04_XX EDN: KCJPBB

Рукопись получена: 27.10.2025

Рукопись одобрена: 29.10.2025

Опубликована online: 01.12.2025

Accepted for publication

Influence of Contact Shape of Mechanical Levelling Device Elements on Thrust Plain Bearing Operation of Rotodynamic Machine

Nikolay N. Gordeev, Alexander A. Smirnov, Ekaterina A. Malyavko

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Different rigidities of a stator and a rotor of a rotodynamic machine causes an irregular load distribution between the segments of the thrust plain bearing. The increasing complexity of rotodynamic machine designs and their operating conditions contribute to this irregularity and reduce the bearing performance. One solution allowing to increase the performance of such bearings is mechanical alignment devices. Technical literature provides little information on the conditions of reciprocal travel of the elements of such devices and their influence on the bearing performance. In addition, there are barely any design recommendations. Thus, when developing new equipment, it is required to run heavy-duty tests of thrust bearings with alignment devices.

AIM: To collect data on the reciprocal travel of elements, the impact of the contact surface shape on travels, and the types of resistance forces affecting the device performance and to develop recommendations on the use of contact surface shapes.

METHODS: We selected a schematic model of the interaction of lower row levers of a mechanical alignment device with intermediate bodies, including spheres and supports installed in the housing. We have discussed nine models. The performance of all models was analyzed assuming that all parts are absolutely rigid. The calculations used various shapes and dimensions of the contact surfaces of lower row levers and housing supports. The ratios of the moment arms acting on the lever of the lower row of forces and travels in the contacts were adopted as efficiency criteria.

RESULTS: When the lever of the lower row is turned, the arms of the moments of forces to the right and left of the support become unequal to each other. Sliding friction is present instead of rolling friction in the contacts of the levers with intermediate bodies.

CONCLUSION: The support surface shape of the lower row lever has a significant effect on the alignment of forces across the segments. During design, it is required to select a support surface shape of the lower row lever and the housing support, which prevents the lever from rolling along the support.

Keywords: thrust plain bearing; mechanical alignment device; contact; lever; lever arm; intermediate body; calculation.

To cite this article:

Gordeev NN, Smirnov AA, Malyavko EA. Influence of Contact Shape of Mechanical Levelling Device Elements on Thrust Plain Bearing Operation of Rotodynamic Machine. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(4):X-XX. DOI: 10.52899/24141437_2025_04_XX EDN: KCJPBB

Submitted: 27.10.2025

Accepted: 29.10.2025

Published online: 01.12.2025

ВВЕДЕНИЕ

Из-за различия статических жесткостей конструкций статора и ротора турбомашин упорный гребень ротора устанавливается с перекосом относительно рабочей поверхности сегментов упорного подшипника скольжения. Перекос является одной из основных причин возникновения неравномерной нагрузки на упорный подшипник. Увеличение мощности и габаритов, а также усложнение конструкций турбомашин и режимов их работы увеличивает воздействие производственных и эксплуатационных факторов на неравномерность нагрузки на упорный подшипник скольжения и снижает эффективность

его работы и надежность в целом.

Для снижения влияния перекоса в конструкцию упорного подшипника включают различного типа выравнивающие устройства. Наиболее распространенным является механическое рычажное выравнивающее устройство с двумя рядами сопрягающихся между собой непосредственно или через промежуточные тела рычагов. Эффективность такого устройства зависит от его конструктивного исполнения, технологии изготовления и реализуемого вида трения в сопряжениях подвижных элементов. Наибольшее влияние на эффективность выравнивания нагрузки по сегментам в данном случае оказывают рычаги нижнего ряда. Данные рычаги выравнивают нагрузку между сегментами путем поворота относительно своей опоры под действием моментов от действующих на него сил. Поворот рычага и, соответственно, выравнивание нагрузки заканчивается при равенстве моментов справа и слева. Для обеспечения полного выравнивания усилий по сегментам необходимо равенство справа и слева плеч моментов сил и сил сопротивления перемещениям в контактах рычагов с промежуточными телами. Рычаги верхнего ряда располагаются зеркально рычагам нижнего ряда относительно центров сфер исследованных вариантов выравнивающих устройств. Опорой для них служат сегменты подшипника. Поэтому результаты выполненных исследований взаимодействия рычагов нижнего ряда с промежуточными телами в части перемещений путем поворота рычага можно распространить и на рычаги верхнего ряда.

Ввиду сложности для исследования конструкции механического выравнивающего устройства публикации по данной теме практически отсутствуют. Также в настоящее время из-за недостаточного количества данных о работе выравнивающего устройства практически отсутствует методика его полного расчета. Из теоретических работ по анализу таких устройств в России можно отметить работы [1–2]. Результатом проведенной в работе [1] оценки выравнивающих свойств подобных механизмов явилось фиксирование остаточной неравномерности распределения усилий по сегментам. Остаточная неравномерность объяснялась «наличием неучтенных сил трения» [1] без указания вида трения. В работе [3] неудовлетворительная работа механических выравнивающих устройств также объясняется силой трения без указания вида трения. Там же рекомендуется:

«...для увеличения чувствительности выравнивающего устройства сила трения должна быть минимальной и для этого нужно стараться делать плечи рычагов верхнего и нижнего ряда одинаковыми...»,

«...контакт опорных поверхностей нужно стараться выполнять по линии (цилиндр по плоскости) и даже точечным (цилиндры с взаимно перпендикулярными осями), удачно выбирать размеры рычажной системы».

В работе [4] предложено идентифицировать вид трения путем расчета и сопоставления перемещений точек контактов по поверхностям рычагов и промежуточных тел в виде сфер. При равенстве расстояний в контактах имеется минимальное трение — трение качения. Иначе имеет место трение скольжения и, соответственно, повышенное сопротивление перемещению элементов выравнивающего устройства. В результате расчетов было установлено отсутствие равенства перемещений точек контакта по поверхностям рычага нижнего ряда и сфер. Контакт ребра с опорой представлял собой линию. Поворот рычага осуществлялся путем качания.

Методика оценки вида трения в выравнивающем устройстве представлена в работе [5] для кинематической схемы выравнивания нагрузки с помощью двухрядного рычажного механизма с протелами. В работе [6] выполнена оценка влияния перекачивающего по опоре рычага нижнего ряда на вид трения в его сопряжениях с промежуточными телами. В выводах работы отмечено наличие в контактах сил трения скольжения, а также отсутствие равенства путей трения в контактах справа и слева относительно опоры рычага. Отсутствие равенства путей трения справа и слева в контактах сигнализирует о разных скоростях перемещения контактов в сопряжениях и, соответственно, о разном влиянии трения скольжения. Это также способствует росту остаточной неуравновешенности усилий по сегментам. Механизм такого влияния необходимо оценивать при силовом анализе выравнивающих свойств рычажного механизма. В работе [7] приведены результаты исследования принятой в работе [6] схемы выравнивающего устройства в части влияния линейных размеров его элементов на эффективность выравнивания нагрузки по сегментам.

Результаты работ [4–7] относятся к разным способам поворота рычага нижнего ряда, а именно за счет качания и за счет перекачивания относительно опоры. Выполненные исследования были направлены на оценку перемещений в сопряжениях подвижных элементов только при качании и качении рычагов относительно своей опоры. Однако не было сравнения их между собой. Для завершения исследований необходимо получить и сравнить данные о перемещениях в выравнивающем устройстве при разных способах поворота рычагов относительно своей опоры. В настоящей работе выполнена оценка влияния практических способов организации поворота рычагов на эффективность выравнивания нагрузки по сегментам.

Объекты исследования выбирались по результатам анализа доступной патентной и технической литературы по упорным подшипникам скольжения с рычажными механическими выравнивающими устройствами. В контактных сопряжениях между элементами внутри выравнивающего устройства и с элементами корпуса подшипника использовались плоские, цилиндрические (сферические), а также в виде ребра опорные элементы с образованием линейных и точечных контактов.

На рис. 1 приведены обобщенные схематизированные изображения исследованных вариантов. Для всех вариантов исходные контакты рычагов нижнего ряда с сопрягаемыми элементами располагались в единой плоскости. Ряд вариантов по организации контактов рычага с опорой имеют зеркальное исполнение относительно данной единой плоскости. Контакт в сопряжении промежуточных тел с рычагом во всех вариантах был точечным, образованным плоской поверхностью рычага со сферой промежуточного тела. Сопряжения рычага нижнего ряда с его опорой в исследованных вариантах образованы опорными контактными поверхностями типа «цилиндр–цилиндр» («сфера–сфера»), «цилиндр–сфера», «сфера–цилиндр».

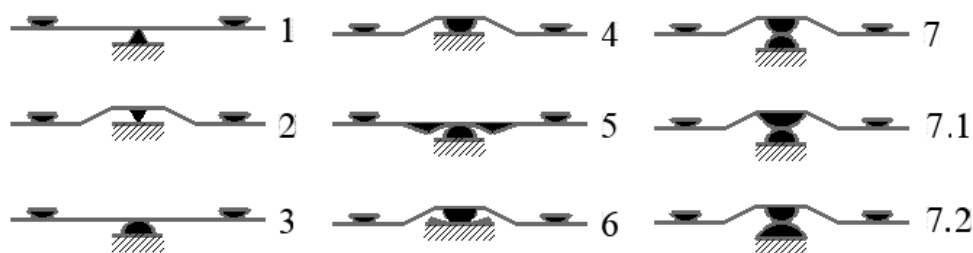


Рис. 1. Схемы вариантов объектов исследования.

Fig. 1. Studied option diagrams.

При общем анализе представленных на рис. 1 схем выявлено следующее:

- а) варианты 1 и 2, 3 и 4, 5 и 6, а также 7.1 и 7.2 зеркальны по исполнению сопряжения между рычагом и его опорой;
- б) вариант 5 при увеличении радиуса опорной части рычага в пределе становится эквивалентным варианту 3;
- в) вариант 6 при увеличении радиуса опоры рычага в пределе становится эквивалентным варианту 4;
- г) вариант 7.1 при увеличении радиуса опорной части рычага в пределе становится эквивалентным варианту 3;
- д) вариант 7.2 при увеличении радиуса опорной части рычага в пределе становится эквивалентным варианту 4;
- е) вариант 3 при уменьшении радиуса опоры в пределе становится эквивалентным варианту 1;
- ж) вариант 4 при уменьшении радиуса опорной части рычага в пределе становится эквивалентным варианту 2.

Выявленные предельные соответствия между схемами необходимо учитывать при сравнении их эффективности и выборе более эффективных конструктивных решений. Выполненный анализ позволяет сделать следующий вывод. При проектировании рычагов выравнивающего устройства необходимо стремиться их конструировать по варианту 1 или 2. Далее в работе выполнена проверка данного вывода.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование выравнивающего устройства выполнялось расчетным путем по алгоритму, близкому к изложенному в работах [4, 5]. Математическая модель устройства, используемая в расчетах, включала уравнения прямых и окружностей, соответствующих контактным поверхностям сопряжений в исходном положении и при работе. При необходимости в нее входили уравнения траекторий движения характерных точек деталей сопряжений, а также уравнения вспомогательных прямых для определения геометрических связей между ними.

Расчеты проводились при повороте рычага против часовой стрелки. При изменении направления поворота рычага перемещения элементов справа и слева менялись только местами. Исследованные варианты в исходном и рабочем положении систематизированы и представлены в виде схем. По результатам расчетов оценивалась эффективность выравнивающего устройства в зависимости от формы опорных поверхностей рычага и опоры. Оценивалось влияние формы опорных поверхностей рычага и опоры на:

- размеры плеч моментов от сил со стороны левого и правого промежуточных тел;
- перемещения контактов рычага с промежуточными телами по поверхностям рычага и промежуточных тел.

ДОПУЩЕНИЯ И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ

Расчеты и анализ работы всех вариантов выполнены при допущениях:

- все детали абсолютно жесткие;
- центры сфер промежуточных тел движутся параллельно оси ротора;
- в сопряжении рычага с опорой в корпусе отсутствует трение скольжения.

Выбор критериев оценки эффективности выравнивающего устройства проводился из условий обеспечения равенства:

- плеч моментов сил слева и справа от опоры рычага;
- перемещений контактов в сопряжениях рычага с промежуточными телами;
- перемещений в контактах справа и слева относительно опоры рычага.

При равенстве данных перемещений в контактах плоских поверхностей со сферическими и цилиндрическими поверхностями в сопряжениях обеспечивается режим трения качения. В противном случае возникает менее эффективное трение скольжения. Учитывая последнее обстоятельство, происходит увеличение неравномерности в распределении осевого усилия. Разность перемещений в контактах справа и слева относительно опоры рычага обуславливает в них разные условия реализации трения скольжения, а именно разную скорость скольжения.

Влияние разной скорости на эффективность выравнивания неоднозначно и требует дополнительных исследований. Одинаковая скорость выявляется путем сопоставления перемещений в сопряжениях промежуточных тел (в нашем случае сфер) с рычагом справа и слева. При равенстве перемещений скорость и, соответственно, условия трения одинаковы, в противном случае — различны.

Чем меньше при перемещениях разница между размерами плеч моментов сил слева и справа, а также между пройденными расстояниями в контактах, тем выше эффективность работы механического выравнивающего устройства.

РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ ИССЛЕДОВАННЫХ ВАРИАНТОВ

Расчетные схемы расположения рычагов и промежуточных тел в исходном состоянии и в процессе выравнивания усилий по сегментам для вариантов 5, 6, 7, 7.1 и 7.2 приведены на рис. 2–4 соответственно. За исходное положение принято положение рычага при его угле поворота $\alpha=0$.

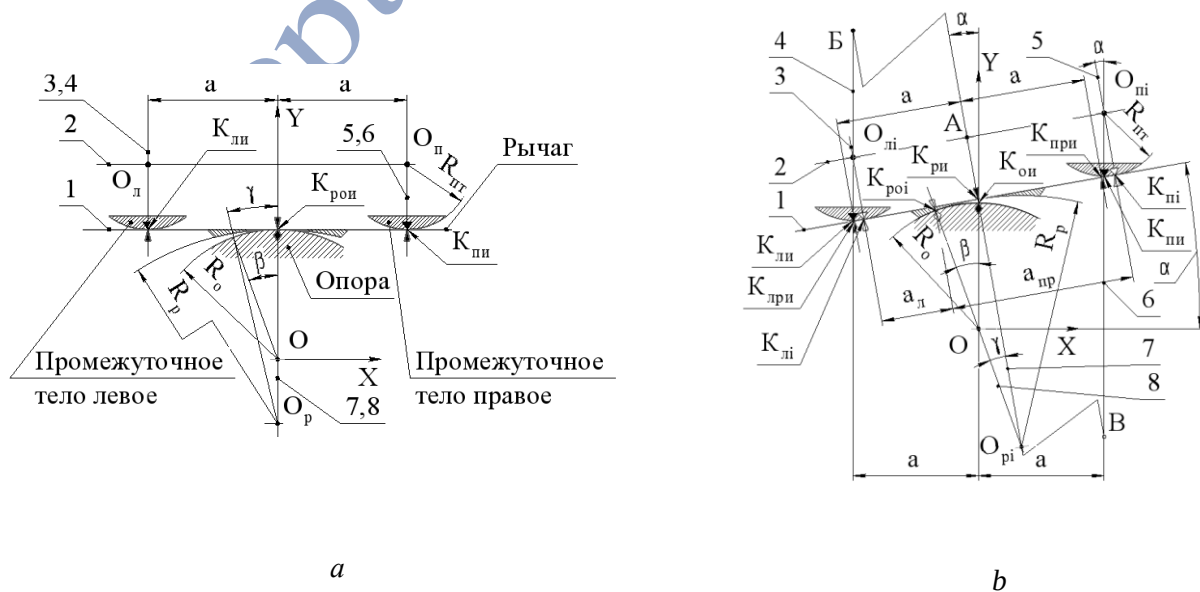


Рис. 2. Расчетные схемы для варианта 5: а — исходное положение; б — положение при работе.

Fig. 2. Design diagrams for option 5: a, initial position; b, position during operation.

На рис. 2, *a* приведено схематизированное изображение с обозначением исходных параметров пятого исследованного варианта, а на рис. 2, *b* — его расчетная схема. Качение рычага по опоре происходит при выполнении равенства: $\beta R_0 = \gamma R_p$. Зачерненными значками на схемах здесь и далее указаны точки контакта в исходном положении, а светлыми — после поворота рычага на угол α . Точка текущего контакта рычага с опорой обозначена как K_{poi} , а исходного — как K_{poi} . После поворота рычага точка исходного контакта на рычаге обозначена как K_{pi} , а на опоре — как K_{oi} . Точки исходного контакта левого и правого промежуточных тел с рычагом обозначены соответственно как $K_{ли}$ и $K_{пи}$, а текущего соответственно как $K_{ли}$ и $K_{пи}$. Размеры a_l и a_{pr} на схеме соответствуют размерам плеч моментов, действующих на рычаг со стороны промежуточных тел сил. Размеры плеч моментов равняются расстоянию по перпендикуляру от линии действия (слева — $O_{ли}K_{ли}$, справа — $O_{пи}K_{пи}$) соответствующей силы до точки K_{poi} текущего контакта рычага с опорой. В исходном положении размеры плеч равны «а».

Перемещения контактов по поверхности рычага L_p определяются по координатам точек контактов до и после перемещения в системе координат XOY. Наиболее просто определяются перемещения контактов по поверхности промежуточных тел $L_{пт}$. $L_{пт} = \alpha R_{пт}$, где α — угол поворота рычага, а $R_{пт}$ — радиус контактной поверхности промежуточного тела (сферы).

Размер «а» на схемах в исходном положении соответствует расстоянию от точки контакта промежуточных тел с рычагом до точки контакта рычага с опорой. И он был одинаковым и постоянным для всех вариантов форм рычагов. Размер радиуса промежуточных тел также принят постоянным и составляет 20% от «а». Размеры радиусов цилиндрических/сферических поверхностей сопряжений опорных частей рычага и опор, на которые опирались рычаги, варьировались относительно исходного размера «а». Радиусы, постоянные при варьировании, составляли 20% от «а». Начало системы координат XOY размещено в центре поперечного сечения опоры рычага.

Перемещения в сопряжениях рычага с левым и правым промежуточными телами соответствуют по поверхностям:

- левого и правого плеч рычага отрезкам $K_{лри}K_{ли}$ и $K_{при}K_{пи}$ соответственно;
- левого и правого промежуточных тел дугам $K_{ли}K_{ли}$ и $K_{пи}K_{пи}$ соответственно.

На рис. 3, *a* представлено схематизированное изображение с обозначением исходных параметров шестого исследованного варианта, а на рис. 3, *b* — его расчетная схема. Условие качения рычага по опоре выполнялось согласно равенству: $\beta R_0 = \gamma R_p$. Приведенные на рис. 3 обозначения аналогичны обозначениям рис. 2.

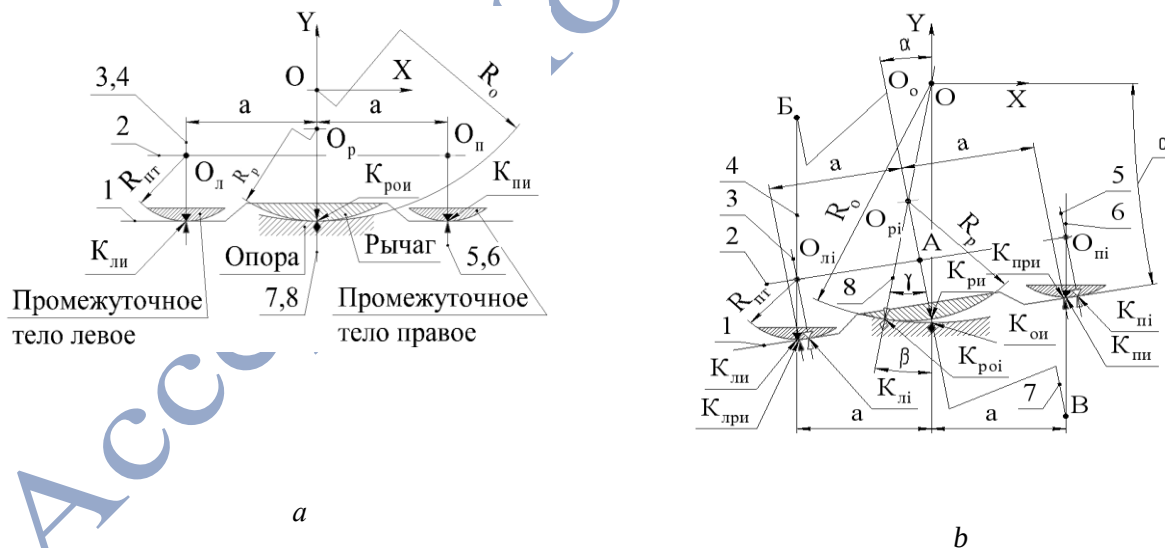


Рис. 3. Расчетные схемы для варианта 6: *a* — исходное положение; *b* — положение при работе.

Fig. 3. Design diagrams for option 6: *a*, initial position; *b*, position during operation.

На рис. 4, *a* представлено схематизированное изображение с обозначением исходных параметров исследованных вариантов 7, 7,1 и 7.2, а на рис. 4, *b* — их расчетная схема. Условие качения рычага по опоре выполнялось согласно равенству: $\beta R_0 = \gamma R_p$. Приведенные на рис. 4 обозначения аналогичны обозначениям рис. 2.

Особенностью исследованных вариантов является выход точки контакта рычага с опорой при работе за пределы единой плоскости с контактами рычага с промежуточными телами. Это приводит к увеличению сопротивления повороту рычага за счет появления дополнительного момента от сил трения в контактах.

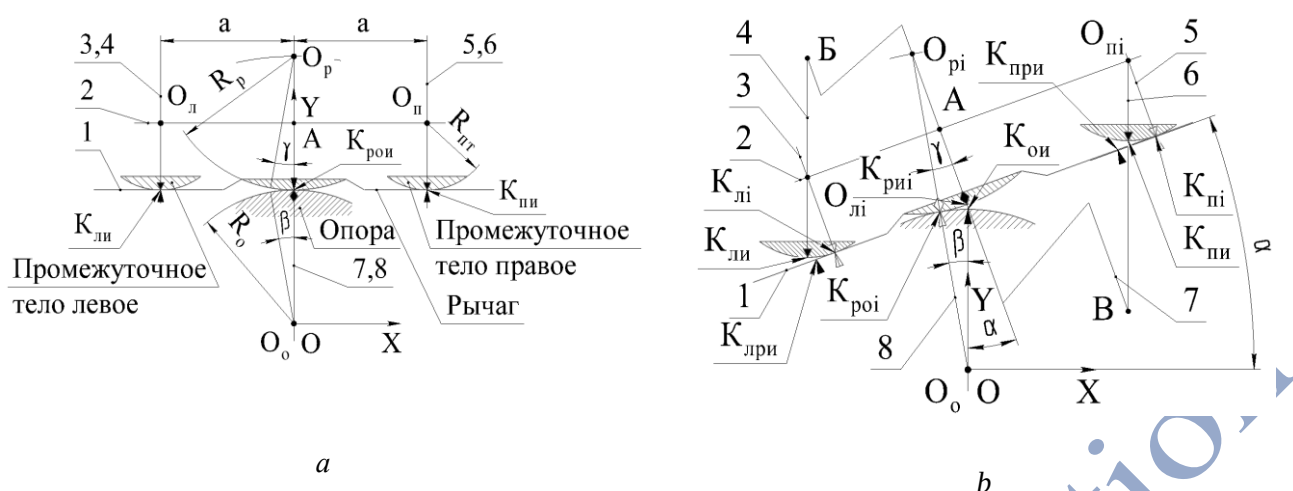


Рис. 4. Расчетные схемы для вариантов 7, 7.1 и 7.2: а — исходное положение; б — положение при работе.

Fig. 4. Design diagrams for options 7, 7.1, and 7.2: a, initial position; b, position during operation.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Предварительные результаты расчетного исследования первых четырех вариантов, использующих контакты типа «ребро–плоскость» и «цилиндр (сфера)–плоскость», были представлены на проходившем в СПбГМТУ в ноябре 2024 г. Всероссийском фестивале науки «Наука 0+». Основными результатами исследования первых четырех вариантов были:

- эффективность вариантов с зеркальным относительно плоскости контактов исполнением одинакова, а именно вариантов 1 и 2, а также вариантов 3 и 4;
- наиболее эффективными являются варианты 1 и 2.

На рис. 5 приведено сравнение вариантов 1 и 3 по соотношению плеч моментов сил. С началом поворота рычага плечо момента справа становится больше плеча момента слева в обоих вариантах и увеличивается с ростом угла поворота. Однако в варианте 1 это увеличение минимальное. И поэтому эффективность выравнивания нагрузки в выравнивающем устройстве по варианту 1 должна быть выше, чем по варианту 3. А организация поворота рычага путем качания эффективнее поворота рычага в результате качения. Увеличение радиуса R_0 в варианте 3 приводит к снижению эффективности выравнивающего устройства, а уменьшение приближает эффективность варианта 3 к варианту 1. При приближении R_0/a к нулю их эффективности практически сравниваются, в силу того что в пределе при уменьшении радиуса R_0 до нуля схема варианта 3 эквивалентна схеме варианта 1.

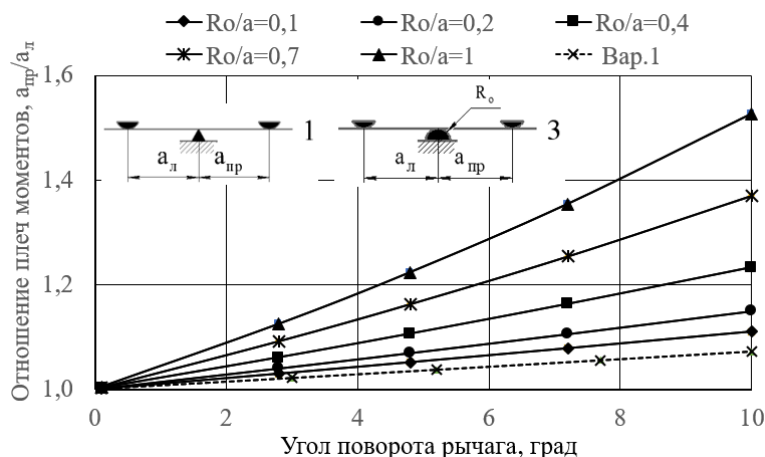


Рис. 5. Сравнение вариантов 1 и 3.

Fig. 5. Comparison of options 1 and 3.

Далее приведены результаты завершающего исследования по последним пяти вариантам и сравнение с результатами исследований первых четырех вариантов. Завершающее исследование касалось влияния на эффективность выравнивающего устройства цилиндрических (сферических) форм контактных поверхностей сопряжений (варианты 5, 6, 7, 7.1 и 7.2). При исследовании также варьировались соотношения радиусов контактных поверхностей рычага и его опоры.

На рис. 6 представлено отношение плеч моментов сил при повороте против часовой стрелки рычага нижнего ряда в вариантах 5 и 6. Пунктирные линии относятся к варианту 5, а сплошные — к варианту 6. Варианты 5 и 6 зеркальны по исполнению сопряжения рычагов с опорами. Однако равенство их эффективностей в пределах исследованного диапазона углов поворота рычага имеет место только при R_p/R_o (R_o/R_p) $\leq 0,5$. Это отличие при угле поворота рычага больше 3° можно объяснить влиянием кривизны опорных поверхностей большего радиуса. При уменьшении отношений радиусов опорных поверхностей R_p/R_o (R_o/R_p) для обоих вариантов эффективность выравнивающих устройств увеличивается. В обоих случаях в пределе уменьшения отношений радиусов опорных поверхностей R_p/R_o (R_o/R_p) из варианта 5 получается вариант 3, а из варианта 6 — вариант 4. А вариант 4 из-за зеркального исполнения по эффективности эквивалентен варианту 3. Но в области практических значений радиусов контактирующих поверхностей варианты 5 и 6 по эффективности уступают варианту 3. И только в предельных случаях сравниваются с ним. При этом постоянные по величине радиусы вариантов 5 и 6 должны быть равными радиусу опоры варианта 3 (или 4).

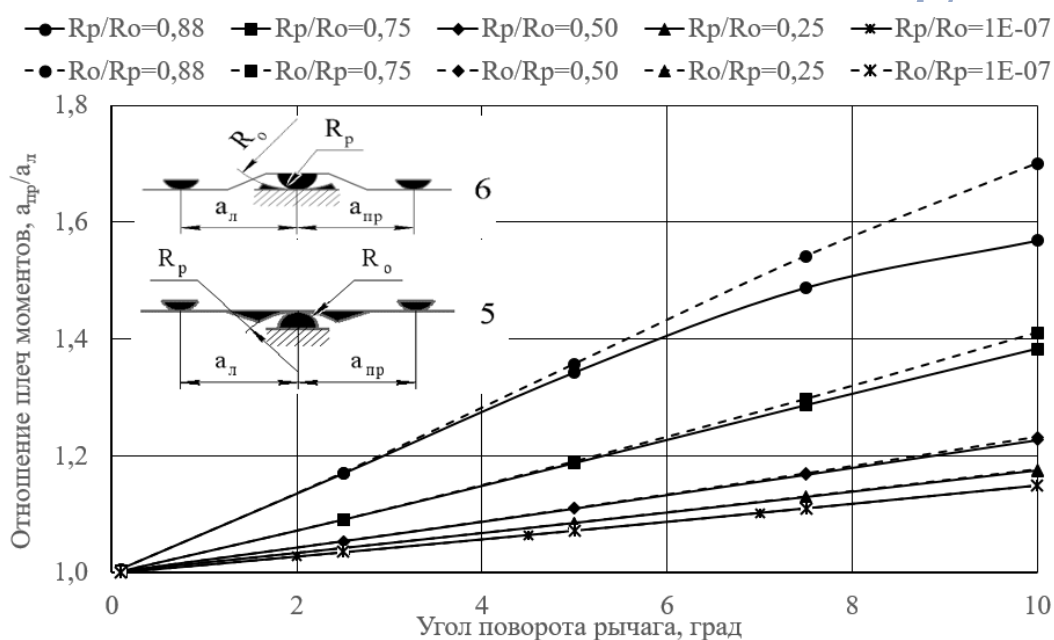
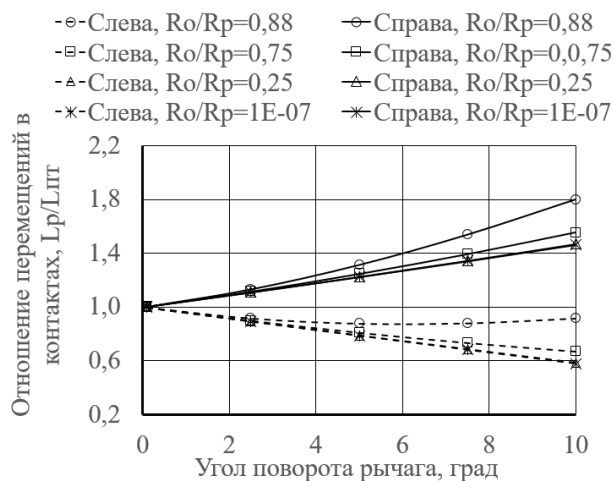


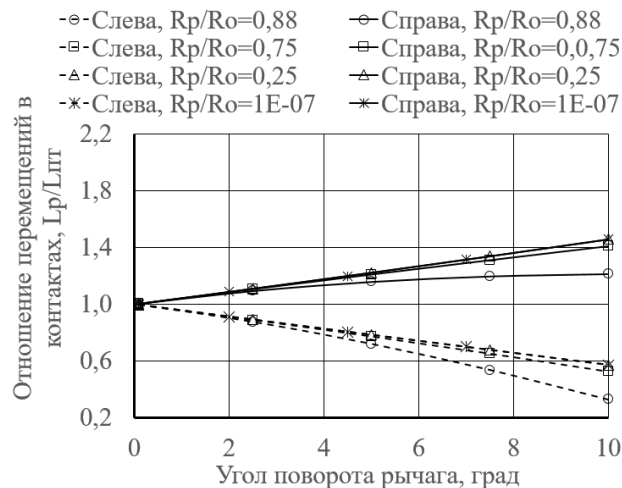
Рис. 6. Сравнение вариантов 5 и 6.

Fig. 6. Comparison of options 5 and 6.

На рис. 7 приведено сравнение перемещений в контактах рычага с промежуточными телами по поверхности рычага L_p и по поверхности промежуточного тела $L_{пт}$. Пунктирные линии относятся к перемещениям слева от опоры рычага, а сплошные — к перемещениям справа от опоры рычага. Из сравнения видно, что при углах поворота рычагов больше 2° перемещения в обоих вариантах как в самих контактах, так и по обе стороны от опоры рычага становятся не равными друг другу. А, следовательно, в контактах по обе стороны от опоры при таких углах имеются разные условия возникновения трения скольжения. При углах поворота меньше 2° характер перемещений в обоих вариантах становятся практически одинаковым. Также в варианте 5 перемещения справа от опоры больше перемещений слева. А в варианте 6, наоборот, перемещения слева от опоры больше перемещений справа. Это указывает на влияние форм и размеров подвижной и неподвижной поверхностей контактов на перемещения в них.



a



б

Рис. 7. Перемещения в контактах: а — вариант 5; б — вариант 6.

Fig. 7. Travel in contacts: a, option 5; b, option 6.

На рис. 8 представлены отношения плеч моментов сил для оценки эффективности вариантов 7, 7.1 и 7.2. Из графиков, представленных на рис. 8, видно, что вариант 7 с одинаковыми радиусами опорного элемента рычага и опоры рычага эффективнее остальных. Варианты 7.1 и 7.2 зеркальны и имеют одинаковую эффективность. Варьирование радиусами R_o и R_p приводит к снижению эффективности выравнивающего устройства в вариантах 7.1 и 7.2. Варианты 7.1 и 7.2 с одинаковыми радиусами сопрягающихся опорных элементов эквивалентны варианту 7. При увеличении радиуса R_p в варианте 7.1 в пределе получаем вариант 3. А при увеличении радиуса R_o в варианте 7.2 в пределе — вариант 4. Вариант 7 при увеличении любого из радиусов опорных поверхностей в контакте рычага с опорой в пределе становится эквивалентным варианту 3 или 4.

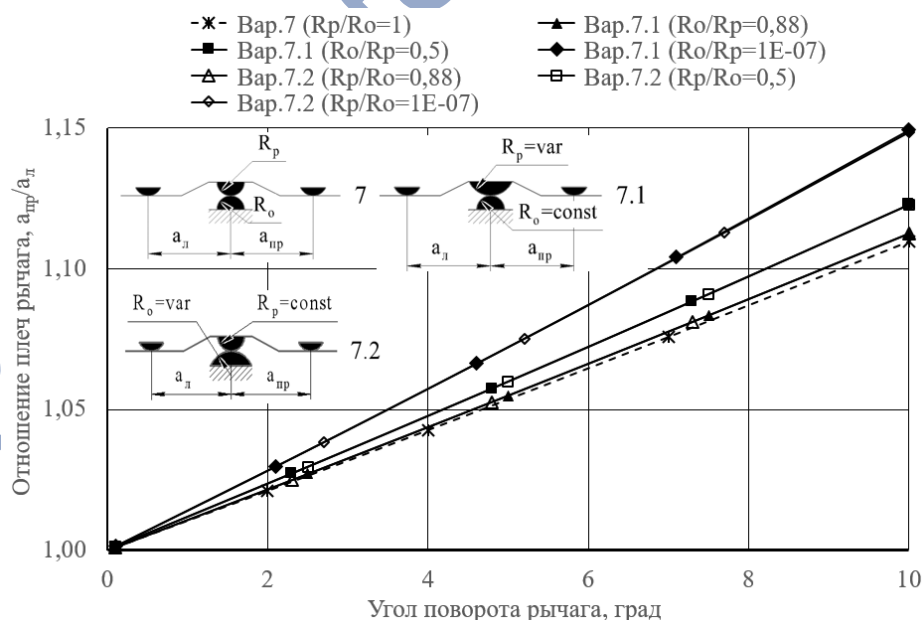


Рис. 8. Сравнение вариантов 7, 7.1 и 7.2.

Fig. 8. Comparison of options 7, 7.1, and 7.2.

Сравнение отношений размеров плеч моментов исследованных вариантов, включая варианты 5 и 6, по результатам их расчетов дано на рис. 9. Размеры элементов сравниваемых вариантов указаны в легенде. Варианты 2 и 4 исключены из сравнения из-за зеркальности соответственно вариантам 1 и 3. Также исключены варианты 7.1 и 7.2 из-за меньшей по сравнению с вариантом 7 эффективности.

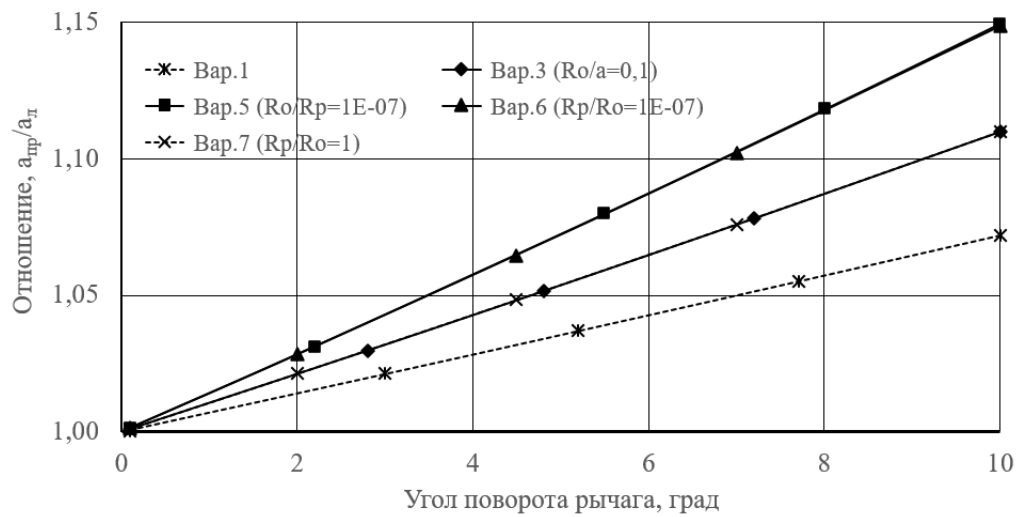


Рис. 9. Сравнение эффективности вариантов 1, 3, 5–7.

Fig. 9. Performance comparison of options 1, 3, 5–7.

Проведенное сравнение подтверждает, что зеркально исполняемые варианты 5 и 6 с цилиндрическими поверхностями опор имеют одинаковую эффективность. А их эффективность хуже эффективности остальных вариантов. Варианты 3 и 7 с исследованными размерами элементов по эффективности оказались равными друг другу. Лучше всех являются вариант 1 и зеркальный ему вариант 2. Форма их контактов рычага с опорой является пределом при вариации размеров форм данных контактов у других вариантов.

На рис. 10 представлены для всех исследованных вариантов зависимости отношений расстояний, проходимых контактами по сопрягающимся поверхностям в сопряжениях рычага с левым и правым промежуточными телами, от угла поворота рычага. Данные зависимости для всех вариантов в исследованном диапазоне углов практически одинаковы. Следовательно, исследованными формами поверхностей опорных элементов практически невозможно изменить условия перемещения контактов в сопряжениях рычагов с промежуточными телами сферической формы. Также следует отметить, что при повороте рычага отношение расстояний в контактах не равно единице. Для поворота рычага против часовой стрелки справа оно больше единицы, а слева меньше ее. При изменении направления поворота отношения справа и слева меняются местами. При увеличении угла поворота рычага отношение справа увеличивается, а слева — уменьшается. Справа и слева в контактах имеет место трение скольжения, причем с разной скоростью. И соответственно, с разной степенью сопротивления действующим на левый и правый плечи рычага силам. Что также способствует увеличению неравномерности распределения усилий по сегментам подшипника. Степень влияния возможно оценить при силовом анализе вариантов.

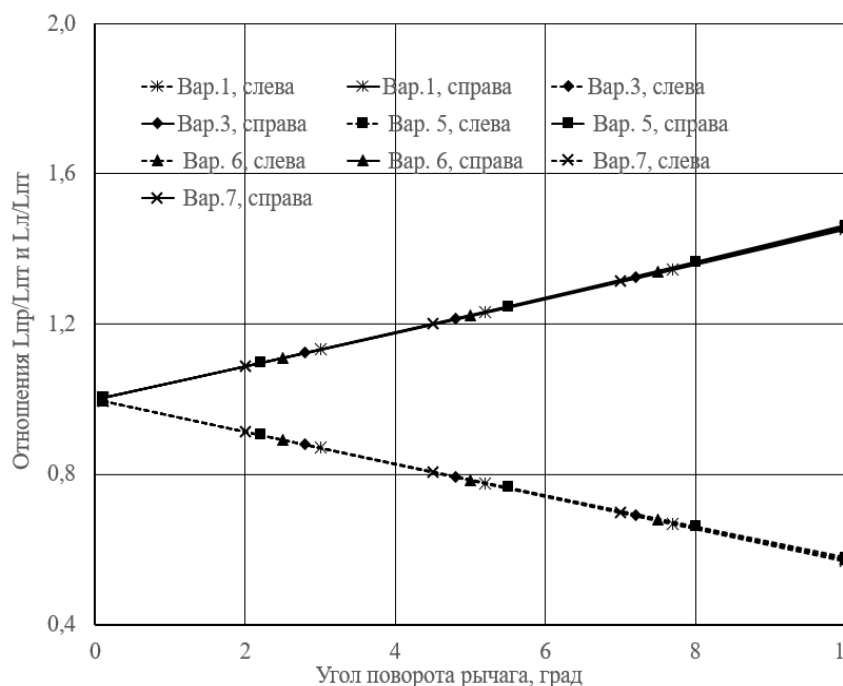


Рис. 10. Сравнение эффективности вариантов 1, 3, 5–7 по перемещениям в контактах.

Fig. 10. Performance comparison of options 1, 3, 5–7 by travel in contacts.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненной работы можно отметить следующее:

1. Форма опорной поверхности рычага нижнего ряда в исследованных вариантах выравнивающих устройств существенно влияет на выравнивание сил по сегментам.
2. Зеркальная перемена местами форм поверхностей в сопряжении между рычагом и опорой не влияет на эффективность выравнивающего устройства в исследованном диапазоне параметров.
3. Линейный контакт рычага нижнего ряда с опорой, образованный ребром и плоскостью, в любом исполнении (прямом или зеркальном) обеспечивает наименьшее отрицательное влияние на выравнивание сил по сегментам.
4. При проектировании механических выравнивающих устройств необходимо исключать перекатывание рычага относительно своей опоры.
5. При проектировании рычагов выравнивающего устройства необходимо стремиться их конструировать по варианту 1 или 2.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Н.Н. Гордеев — сбор, анализ и обработка материала, написание статьи, редактирование статьи; А.А. Смирнов — анализ и обработка материала, редактирование статьи; Е.А. Малявко — сбор, анализ и обработка материала. Авторы одобрили версию для публикации, а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой ее части.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре.

ADDITIONAL INFO

Author contributions. N.N. Gordeev: investigation, writing—original draft, writing—review & editing; A.A. Smirnov: formal analysis, writing—review & editing; E.A. Malyavko: investigation, formal analysis. All the authors made substantial contributions to the conceptualization, investigation, and manuscript preparation, and reviewed and approved the final version prior to publication.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article. **Data availability statement:** The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work, as no new data was collected or created.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer-review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сержкина Л.П., Зарецкий Е.И. Осевые подшипники мощных паровых турбин. М.: Машиностроение, 1988.
2. Подольский М.Е. Упорные подшипники скольжения: Теория и расчет. Л.: Машиностроение, 1981.
3. Воскресенский В.А., Дьяков В.И. Расчет и проектирование опор скольжения (жидкостная смазка). М.: Машиностроение, 1980.
4. Гордеев Н.Н., Стельникович Н.А. Расчетное исследование выравнивающего механизма упорного подшипника скольжения турбомашин // Неделя науки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2020. Т. 2, № 4. С. 80. EDN: GLKZUK
5. Гордеев Н.Н., Смирнов А.А. Методика оценки эффективности выравнивающего механизма подшипника Кингсбери. Труды Крыловского государственного научного центра. 2021; Спец. вып. 1. С. 111–112. doi: 10.24937/2542-2324-2021-1-S-I-111-112 EDN: IZKKFZ
6. Гордеев Н.Н., Смирнов А.А., Карпычев А.В. Расчетное исследование условий движения элементов упорного подшипника скольжения Кингсбери // Неделя науки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2021. № 1–1. С. 99. EDN: IWATVN
7. Гордеев Н.Н., Смирнов А.А., Карпычев А.В. Расчетное исследование влияния на эффективность подшипника Кингсбери геометрии элементов выравнивающего устройства. В кн.: Актуальные проблемы морской энергетики: Материалы одиннадцатой международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 17–18 февраля 2022 года. Санкт-Петербург: СпбГМТУ, 2022. С. 161–164. doi: 10.52899/9785883036322_161_164 EDN: TWFPWR

REFERENCES

1. Serezhkina LP, Zaretskii EI. *Axial bearings of powerful steam turbines*. Moscow: Mashinostroenie; 1988. (In Russ.)
2. Podolsky ME. *Thrust Sliding Bearings: Theory and Calculation*. Leningrad: Mashinostroenie; 1981. (In Russ.)
3. Voskresensky VA, Dyakov VI. *Calculation and Design of Sliding Supports (Fluid Lubrication)*. Moscow: Mashinostroenie; 1980. (In Russ.)
4. Gordeev NN, Stelnikovich NA. Computational study of the alignment mechanism of the thrust bearing of a turbomachine. *Science Week of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2020;2-4:80. (In Russ.) EDN: GLKZUK

5. Gordeev NN, Smirnov AA. Methodology for assessing the effectiveness of the Kingsbury bearing registering mechanism. *Transactions of the Krylov state research center*. 2021;S1:111–112. doi: 10.24937/2542-2324-2021-1-S-I-111-112 (In Russ.) EDN: IZKKFZ
6. Gordeev NN, Smirnov AA, Karpychev AV. Computational study of the Kingsbury thrust bearing elements motion conditions. *Science Week of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2021;1–1:99. (In Russ.) EDN: IWATVH
7. Gordeev NN, Smirnov AA, Karpychev AV. Computational study of the alignment elements geometry influence on the Kingsbury thrust bearing efficiency. In: *Current Problems of Marine Energy: Proceedings of the Eleventh International Scientific and Technical Conference, Saint Petersburg, February 17–18, 2022*. Saint Petersburg: Saint Petersburg State Marine Technical University. 2022:161–164. doi: 10.52899/9785883036322_161_164 (In Russ.) EDN: TWFPRW

ОБ АВТОРАХ

Гордеев Николай Николаевич*, канд. техн. наук, доцент; адрес: Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3; eLibrary SPIN: 5846-9847; e-mail: nn-gordeev@list.ru

Смирнов Александр Анатольевич, канд. техн. наук, доцент; eLibrary SPIN: 7842-2380; e-mail: smir70@mail.ru

Малявко Екатерина Александровна; e-mail: Katya.malyavko.04@mail.ru

AUTHORS' INFO

Nikolay N. Gordeev*, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor; address: 3 Lotsmanskaya st, Saint Petersburg, Russia, 190121; eLibrary SPIN: 5846-9847, e-mail: nn-gordeev@list.ru

Alexander A. Smirnov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor; eLibrary SPIN: 7842-2380, e-mail: smir70@mail.ru

Ekaterina A. Malyavko; e-mail: katya.malyavko.04@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author