УДК 621.892 *Оригинальная статья*

Нанодисперсное магнитное масло: взаимосвязь состава жидкой фазы и триботехнических характеристик

А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова
ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»
170026, Россия, Тверская обл., Тверь, наб. А. Никитина, 22
alnikbltov@rambler.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.577

Аннотация. Применение нанодисперсного магнитного масла для смазки подшипников скольжения современного высокотехнологичного оборудования позволяет повысить его долговечность и работоспособность. В работе проведена оценка влияния дисперсионной среды, нанодисперсной магнитной фазы, противоизносных присадок и наполнителей на триботехнические свойства магнитного масла. Изучались трёхкомпонентные магнитные смазочные масла, отличающиеся составом дисперсионной среды, в качестве которой использованы синтетические кремнийорганические жидкости, относящиеся к различным группам. Испытаны магнитные масла, стабилизированные путем применения кремнийорганических кислот, ионогенных поверхностно активных веществ, жирных кислот и др. По результатам триботехнических испытаний установлено, что в широком диапазоне условий трения смазочные свойства нанодисперсного магнитного масла тем выше, чем выше эти свойства у дисперсной среды. Исследовано влияние поверхностно-активных веществ, стабилизирующих коллоидную структуру наномасел, на коррозионно-механическую составляющую износа. Сделан вывод о некотором преимуществе масел с полимерными оболочками на частицах. Предложен способ удаления агломератов феррочастиц, образовавшихся при синтезе смазочного материала и в результате флокуляции частиц под действием магнитных сил, воздействием силового неоднородного магнитного поля. Показана необходимость продолжить исследования в данном направлении.

Ключевые слова: нанодисперсное магнитное масло, трибосвойства магнитных масел, дисперсионная среда, противоизносные присадки, трение, износ.

Болотов Александр Николаевич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»
Новиков Владислав Викторович – к.т.н., доцент, доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»
Новикова Ольга Олеговна – к.т.н., доцент, доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Original paper

Nanodispersed magnetic oil: relationship between liquid phase composition and tribological characteristics

A.N. Bolotov, V.V. Novikov, O.O. Novikova
Tver State Technical University, Tver, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.577

Abstract: The use of nanodispersed magnetic oil for lubricating plain bearings of modern high-tech equipment allows to increase its durability and performance. The paper assesses the effect of the dispersion medium, nanodispersed magnetic phase, antiwear additives and fillers on the tribological properties of magnetic oil. Three-component magnetic lubricating oils with different dispersion medium compositions were studied. Synthetic organosilicon fluids belonging to different groups were used as dispersion medium. Magnetic oils stabilized by using organosilicon acids, ionogenic surfactants, fatty acids, etc. were tested. According to the results of tribological tests, it was found that in a wide range of friction conditions, the lubricating properties of nanodispersed magnetic oil are higher, the higher these properties are in the dispersed medium. The effect of surfactants stabilizing the colloidal structure of nanooils on the corrosion-mechanical component of wear was studied. A

conclusion has been made about some advantage of oils with polymer shells on particles. A method has been proposed for removing agglomerates of ferroparticles formed during the synthesis of lubricant and as a result of particle flocculation under the action of magnetic forces, by the action of a force non-uniform magnetic field. The need to continue research in this direction has been shown.
Keywords: nanodispersed magnetic oil, triboproperties of magnetic oils, dispersion medium, antiwear additives, friction, wear.

Alexander N. Bolotov – Dr. Sc., Professor, Head of the Applied Physics Department, Tver State Technical University, ORCID: 0000-0003-4054-5550
Vladislav V. Novikov – Ph. D., Full Docent, Applied Physics Department, Tver State Technical University, ORCID: 0000-0001-5670-1250
Olga O. Novikova – Ph. D., Full Docent, Applied Physics Department, Tver State Technical University, ORCID: 0000-0003-4133-3541

Поступила в редакцию/received: 05.04.2025; после рецензирования/revised: 08.05.2025; принята/accepted 14.05.2025.

1. Введение

Развитие современных технологий в машиностроении позволяет достигнуть требуемую долговечность и работоспособность оборудования, уменьшить затраты на его последующее техническое сопровождение и ремонт, снизить энергопотребление при изготовлении и эксплуатации. Во многом срок службы машин и механизмов зависит от надежности работы узлов трения, входящих их в конструкцию. Кроме этого, к ним достаточно часто предъявляются требования обеспечения плавного вращения опор, точности, высокой несущей способности. Это достигается введением в конструкцию машин подшипников скольжения. Повысить их надежность можно с помощью применения современных смазочных и антифрикционных материалов, в качестве которых используется магнитное смазочное масло (МСМ) [1, 2].

Магнитное смазочное масло при использовании в трибосопряжениях имеет ряд очевидных достоинств, но и недостатков. К достоинствам можно отнести то, что они под действием магнитного поля самопроизвольно поступают в зону трения подшипника скольжения, что позволяет упростить его конструкцию [3, 4]. Также имеется возможность добавления в их состав различных присадок, а также дисперсных частиц, обеспечивающих антифрикционные свойства. К недостаткам применения МСМ можно отнести то, что не всегда можно принять во внимание магнитогидродинамические эффекты при трении, агломераты магнитных частиц, входящие в состав, могут оказывать абразивное воздействие на поверхность трения, у МСМ часто ограниченна температурная стабильность [5, 6]. Таким образом возникает необходимость изучения процессов, происходящих в узлах трения при их смазке магнитным смазочном маслом. В этом направлении проведены исследования [6-9], однако многие важные детали смазочного механизма магнитных масел требуют дальнейшего изучения. В частности, до конца не выяснена дифференциальная роль жидких компонентов МСМ при трении.

Целью исследования была оценка влияния дисперсионной среды и поверхностно-активных веществ на триботехнические свойства магнитного смазочного масла.

2. Методы исследований и материалы

Исследование триботехнических характеристик магнитных смазочных материалов проводились на машине трения МТШ-М [10], принципиально отличающихся диапазоном контактных давлений между трущимися образцами. В приборе МТШ испытания проводились по схеме трения шар – плоскость и давлениях 1-2 ГПа. Шариковый образец перемещался с линейной скоростью – 0,32 м/с, двигаясь по круговой траектории. Температура при этом изменялась в пределах 20-25°С. МСМ фиксировалось на поверхности трения магнитным полем с аксиальной симметрией. Материалы образцов: сталь ШХ15. В процессе испытаний непрерывно регистрировались коэффициент и сила трения. При проведении исследования был реализован граничный режим трения.

Магнитные нанодисперсные частицы изготавливались из магнетита и имели средний диаметр около 10 нм. Они были получены методом химической конденсации [11]. Уменьшение составных компонентов магнитного смазочного масла до двух позволило получить более достоверные результаты при триботехнических испытаниях, так как содержание поверхностно активных веществ в среде в значительной степени завит от концентрации частиц магнетита.

Анализ достоинств МСМ показывает, что они наиболее перспективны для применения в узлах трения, функционирующих продолжительное время после разовой заправки лимитированным объемом смазочного материала. Также представляет интерес смазка машинными маслами узлов трения, эксплуатируемых в вакууме в широком диапазоне температур. Исходя из этого исследовались МСМ, которые содержали дисперсионные среды с низким давлением насыщенных паров и низкой температурой затвердевания. Изучались трёхкомпонентные МСМ, отличающиеся только составом дисперсионной среды. Роль дисперсионных сред выполняли синтетические кремнийорганические жидкости, относящиеся к различным группам: олигометилфенилсилоксанам (масло МСМ1), олигометилфенилсилоксанам (масло МСМ2) и олигометилхлорфенилсилоксанам (масло МСМ3). Масла несколько различались вязкостью, но при граничном трении это не столь существенно.

Также были исследованы свойства масел, для стабилизации которых применены кремнийорганические кислоты (МСМ4), ионогенные ПАВ (МСМ5), вещества, образующие полимерную оболочку вокруг частиц

(МСМ6), жирные кислоты (МСМ7), содержащие в качестве дисперсионной среды жидкость ПЭС-5 и дисперсную фазу из железа. Все масла были коллоидно стабильны.

3. Результаты исследований и их обсуждение

Дисперсионная среда. Результаты триботехнических испытаний магнитных масел и соответствующих им чистых дисперсионных сред (указаны в скобках), приведены в Таблице 1. Там же представлены установленные магнитные и вязкостные свойства МСМ. Из анализа полученных данных можно сделать вывод о том, что в широком диапазоне условий трения смазочные свойства МСМ тем выше, чем выше эти свойства у дисперсной среды.

Таблица 1. Триботехнические свойства магнитных масел и соответствующих им дисперсионных сред (в скобках) (f – коэффициент трения, d – диаметр пятна износа на шариковом образце, M_S – намагниченность насыщения МСМ, η – вязкость МСМ).

Марка МСМ	M_S, кА/м	η, Па·с	d, мм	f
МСМ1	38	1,3	1,41(0,89)	0,28(0,25)
МСМ2	37	2,6	1,50 (1,20)	0,34(0,30)
МСМ3	38	0,6	0,63(0,68)	0,17(0,16)

Для проверки однозначности этого заключения дополнительно изучались МСМ, дисперсионная среда которых приготавливалась из смеси различных жидкостей, например ХС и ПЭС, а также масла с различным содержанием магнитной фазы. Зависимость следующих свойств МСМ от состава дисперсионных сред остается прежней.

Приведённые выше результаты получены для инактивных к поверхности дисперсных сред. Как показали опыты, если для дисперсионных сред применены поверхностно-активные вещества, то предопределить свойства магнитного масла по свойствам дисперсионной среды становится затруднительно.

Поверхностно-активные вещества (ПАВ), стабилизирующие коллоидную структуру масел. Такие вещества покрывают сольватной оболочкой частицы дисперсной фазы и предотвращают их агломерацию под действием ван-дер-ваальсовских и магнитных сил. Сольватные оболочки образованы из поли- или мономолекулярных слоев адсорбированных молекул. При определённых условиях может быть проведена полимеризация сольватной оболочки.

На процессах трения в первую очередь сказывается стабильность структуры сольватных оболочек. Если оболочки подвержены разрушению при термомеханических фрикционных воздействиях, то происходит

постепенная коагуляция частиц и образуются прочные агломераты, размеры которых могут на порядок и более превосходить размеры отдельных частиц. Как показали длительные фрикционные испытания МСМ, основным фактором, лимитирующим их срок службы, является именно агрегативная неустойчивость, сопровождающаяся усилением абразивного износа [12, 13].

Такое негативное влияние на трение оказывают агломераты частиц, сохранившихся в МСМ после некачественного проведения пептизации или сепарации. Так, например, только за счет удаления из МСМ наиболее крупных частиц и агломератов, коэффициент трения можно снизить на четверть, а износ уменьшить в половину от исходных значений.

Возможно воздействием силового поля удалить агломераты феррочастиц, которые образованы при синтезе смазочного материала. Однако в ней появляются новые агломераты в результате флокуляции частиц под действием магнитных сил. Эти конгломераты увлекаются в зону трения неоднородным магнитным полем и увеличивают абразивную составляющую износа. В связи с этим предлагается новое магнитное масло перед употреблением подвергать магнитной обработке в полях, превосходящих по величине поля в узле трения, после чего образовавшиеся агломераты удаляются. Обе операции могут быть совмещены, если выдерживать масло в неоднородном магнитном поле. Так, например, магнитообработка масла на основе диоктилсибацината позволяет снизить износ пары трения сталь У9А-Al_2O_3 в 1,4 раза (намагниченность масла после обработки снизилась с 23 кА/м до 18 кА/м).

По технологическим причинам, а также из-за десорбции с магнитных частиц в МСМ всегда содержится определённое количество несвязанного ПАВ-стабилизатора. Это может привести к нежелательным последствиям, так как для стабилизации зачастую используются сильнодействующие ПАВ, которые вызывают коррозию поверхностей трения и усиливают усталостное разрушение. Кроме того, при увеличении содержания стабилизатора наблюдается тенденция к снижению агрегативной устойчивости масла.

Если избыточное содержание ПАВ-стабилизатора усиливает коррозионно-механическую составляющую износа, то следует проводить очистку магнитного масла от ПАВ, содержащегося в свободном состоянии. Например, интенсивность износа пары трения сталь У9А-хромовое покрытие при смазке неочищенным маслом на основе дибутилсебацината составила $9 \cdot 10^{-10}$, коэффициент трения равнялся 0,11. После того, как в масле устранили модифицированную олеиновую кислоту, находившуюся в свободном состоянии и предназначенную для стабилизации частиц, интенсивность износа снизилась на 75%, коэффициент трения изменялся

незначительно. В рассматриваемом примере избыток ПАВ устраняли путем осаждения магнетита и последующей замены дисперсионной среды; намагниченность насыщения магнитного масла после этой операции снизилась с 23 кА/м до 21,5 кА/м. Таким образом, содержание стабилизатора в свободном состоянии должно контролироваться и поддерживаться на минимально возможном уровне.

Важной, но трудноразрешимой задачей является установление влияния механических свойств и физико-химической структуры сольватных оболочек на смазочные свойства МСМ. Трудности связаны как с изучением свойств и структуры самих сольватных оболочек, так и с выделением в чистом виде их влияния на трение.

На первом этапе в этом направлении проведены сравнительные испытания масел: МСМ4, МСМ5, МСМ6, МСМ7. Результаты исследований приведены в Таблице 2. В этой же таблице для сравнения указаны смазочные свойства композиций, содержащих жидкие компоненты МСМ. На основании приведенных данных можно сделать предварительный вывод о некотором преимуществе масел с полимерными оболочками на частицах.

Таблица 2. Триботехнические свойства стабилизированных магнитных масел (в скобках приведены свойства дисперсионных сред).

Марка МСМ	M_S, кА/м	η, Па·с	d, мм	f
МСМ4	30	2,4	1,02(0,68)	0,28(0,23)
МСМ5	28	2,2	0,67(0,68)	0,16(0,15)
МСМ6	35	1,1	1,61(0,42)	0,19(0,15)
МСМ7	22	2,5	1,2 (0,89)	0,32(0,28)

4. Заключение

В результате испытаний показано, что в широком диапазоне условий трения смазочные свойства МСМ коррелируют со смазочными свойствами дисперсной среды. Вывод подтверждается для нанодисперсных смазочных масел, приготовленных из смеси жидкостей, с различным содержанием магнитной фазы. Однако учитывая синергетическое влияние на смазочные свойства МСМ всех его компонентов предсказать фрикционные характеристики только по свойствам дисперсионной среды затруднительно.

Установлено, что значительный вклад вносят поверхностно-активные вещества, предотвращающие агломерацию частиц дисперсной фазы. В связи с этим важно обеспечить стабильность структуры сольватных оболочек при термомеханических фрикционных воздействиях. Избыток несвязанного сильнодействующего поверхностно-активного вещества может вызвать коррозию поверхностей трения и спровоцировать

усталостное разрушение.

Предложен способ удаления образовавшихся агломератов в новых магнитных маслах предварительной выдержкой в неоднородном магнитном поле, превосходящем по величине поле в узле трения.

Приведенные данные по влиянию на трение не являются полными, и во многом могут быть уточнены. Например, недостаточно ясно в какой мере влияет на трение химический состав частиц дисперсионной фазы, следует ли вводить в состав масла присадки и т.д. В то же время установленные факты могут быть полезными при разработке магнитных масел с улучшенными свойствами.

Библиографический список:

1. **Odenbach, S.** Colloidal magnetic fluids: basics, development and application of ferrofluids / S. Odenbach // In series: Lecture Notes in Physics. – Springer: Berlin, Heidelberg, 2009. – V. 763. – X, 430 p. DOI: 10.1007/978-3-540-85387-9.
2. **Trivedi, K.** Nanolubricant: Magnetic nanoparticle based / K. Trivedi, K. Parekh, R.V. Upadhyay // Materials Research Express. – 2017. – V. 4. – № 11. – Art. № 114003. – 10 p. DOI: 10.1088/2053-1591/aa95e1.
3. **Zhang, Y.** The roller chain lubricated with ferrofluids / Y. Zhang, Z. Yang, D. Li // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part. J.: Journal of Engineering Tribology. – 2019. – V. 233. – I. 6. – P. 927-935. https://doi.org/10.1177/1350650118806799.
4. **Берковский, Б.М.** Магнитные жидкости / Б.М. Берковский, В.Ф. Медведев, М.С. Краков. – М.: Химия, 1989. – 240 с.
5. **Odenbach, S.** Magnetoviscous effects in ferrofluids / S. Odenbach, S. Thurm // In series: Ferrofluids. Lecture Notes in Physics. – Springer: Berlin, Heidelberg, 2002. – V. 594. – P. 185-201. DOI: 10.1007/3-540-45646-5_10.
6. **Hu, Z.** Effect of components on friction property of carbonyl iron-based magnetorheological fluid / Z. Hu, H. Yan, J. Yang, X. Wang, R. Yu // Arabian Journal for Science and Engineering. –2014. – V. 39. – I. 10. – P. 7355-7361. DOI: 10.1007/s13369-014-1358-2.
7. **Болотов, А.Н.** Магнитные силоксановые наножидкости адаптированные для условий граничного трения / А.Н. Болотов, О.О. Новикова, В.В. Новиков // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2020. – Вып. 12. – С. 546-556. DOI 10.26456/pcascnn/2020.12.546.
8. **Chauhan, V.** Magnetorheological fluids: A comprehensive review / V. Chauhan, A. Kumar, R. Sham // Manufacturing Review – 2024. – V 11. – Art. № 6. – 15 p. DOI: 10.1051/mfreview/2024005.
9. **Shah, K. R.** Effect of ferrofluid lubrication on tribological performance of metal tribopairs / K.R. Shah, A. Shukla, N.S. Patel, J.K. Katiyar // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J: Journal of Engineering Tribology. – 2024. – V. 238. – I. 5. – P. 569-580. DOI: 10.1177/13506501241227093.
10. **Болотов, А.Н.** Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств нанодисперсных магнитных смазочных сред. Часть 3 / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. – 2015. – № 8. – С. 66-70.
11. **Болотов, А.Н.** Смазочные свойства магнитных наножидкостей на основе эфиров карбоновых кислот / А.Н. Болотов, О.О. Новикова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2019. – Вып. 11. – С. 555-563. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.555.
12. **Дамдинов Б.Б.** Влияние добавок мелкодисперсных частиц металлов на характеристики смазочных материалов / Б.Б. Дамдинов, Ч.М. Митыпов // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. – 2021. – №. 1. – С. 28-42. DOI: 10.18101/2306-2363-2021-1-28-42
13. **Бреки, А.Д.** Влияние магнитных наночастиц Fe_3O_4 на трение и износ стали 10Х17Н13М2Т в режиме верчения в среде смазочного масла / А.Д. Бреки, И.А. Тюрикова, А.А. Шатульский, А.Е. Гвоздев, С.Н. Кутепов // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2018. – №. 4. – С. 103-111.

References:

1. Odenbach S. Colloidal magnetic fluids: basics, development and application of ferrofluids, *Lecture Notes in*

Physics. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009, vol. 763, X, 430 p. DOI: 10.1007/978-3-540-85387-9.
2. Trivedi K., Parekh K., Upadhyay R.V. Nanolubricant: Magnetic nanoparticle based, *Materials Research Express*, 2017, vol. 4, no. 11, art. no. 114003, 10 p. DOI: 10.1088/2053-1591/aa95e1.
3. Zhang Y., Yang Z., Li D. The roller chain lubricated with ferrofluids, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2019, vol. 233, issue 6, pp. 927-935. https://doi.org/10.1177/1350650118806799.
4. Berkovskij B.M., Medvedev V.F., Krakov M.S. *Magnitnyye zhidkosti* [Magnetic fluids]. Moscow: Khimiya, 1989, 240 p. (In Russian).
5. Odenbach S., Thurm S. Magnetoviscous effects in ferrofluids, *Ferrofluids. Lecture Notes in Physics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2002, vol. 594, pp. 185-201. DOI: 10.1007/3-540-45646-5_10.
6. Hu Z., Yan H., Yang J., Wang X., Yu R. Effect of Components on Friction Property of Carbonyl Iron-Based Magnetorheological Fluid, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2014, vol. 39, issue 10, pp. 7355-7361. DOI: 10.1007/s13369-014-1358-2.
7. Bolotov A.N., Novikova O.O., Novikov V.V. Magnitnye siloksanovye nanozhidkosti adaptirovannye dlya uslovij granichnogo treniya [Silicone magnetic nanofluids adapted for the conditions of boundary friction], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials],* 2020, issue 12, pp. 546-556. DOI 10.26456/pcascnn/2020.12.546. (In Russian).
8. Chauhan V., Kumar A., Sham R. Magnetorheological fluids: A comprehensive review, *Manufacturing Review*, 2024, vol. 11, art. no. 6, 15 p. DOI: 10.1051/mfreview/2024005.
9. Shah K.R., Shukla A., Patel N, Katiyar J.K. Effect of ferrofluid lubrication on tribological performance of metal tribopairs, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2024, vol. 238, issue 5, pp. 569-580. DOI: 10.1177/13506501241227093.
10. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Komplekt oborudovaniya dlya issledovaniya fiziko-khimicheskikh svojstv nanodispersnykh magnitnykh smazochnykh sred. Chast' 3 [A set of equipment for studying the physical and chemical properties of nanodispersed magnetic lubricating media. Part 3], *Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti i v kontakte tverdykh tel, detalej tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya [Mechanics and Physics of Processes on the Surface and in Contact of Solids, Parts of Technological and Power Equipment],* 2015, no. 8, pp. 66-70. (In Russian).
11. Bolotov A.N., Novikova O.O. Smazochnye svojstva magnitnykh nanozhidkostej na osnove efirov karbonovykh kislot [Lubrication properties of magnetic nanoliquids based on carboxylic acids], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials],* 2019, issue 11, pp. 555-563. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.555. (In Russian).
12. Damdinov B.B., Mitypov Ch.M. Vliyanie dobavok melkodispersnykh chastits metallov na kharakteristiki smazochnykh materialov [Influence of finely dispersed metal particles additives on lubricants characteristics], *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Khimiya. Fizika [Bulletin of Buryat State University. Chemistry. Physics],* 2021, no. 1, pp. 28-42. DOI: 10.18101/2306-2363-2021-1-28-42. (In Russian).
13. Breki A.D., Tyurikova I.A., Shatul'skij A.A., Gvozdev A.E., Kutepov S.N. Vliyanie magnitnykh nanochastits Fe_3O_4 na trenie i iznos stali 10H17N13M2T v rezhime vercheniya v srede smazochnogo masla [Effect of Fe_3O_4 magnetic nanoparticles on friction and wear of 10Kh17N13M2T steel in rotation mode in lubricating oil environment], *Vestnik Rybinskoj gosudarstvennoj aviacionnoj tekhnologicheskoj akademii im. P.A. Solov'eva [Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy named after P.A. Solovyov],* 2018, no. 4, pp. 103-111. (In Russian).