

**М. Ю. Ткачѐв, канд. техн. наук**

**Автомобильно-дорожный институт**

**ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка**

## **ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ САМОЗАТЯГИВАЮЩИХСЯ ГАЕК В ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛАХ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ**

*Детально рассмотрена и доказана целесообразность применения в тяжело нагруженных резьбовых узлах машин и механизмов, подвергающихся в процессе эксплуатации самоотвинчиванию, самозатягивающихся гаек. Преимуществом предложенного в работе решения является отсутствие необходимости изменения конструкции и размеров деталей, сопрягаемых тем или иным способом с гайками.*

**Ключевые слова:** резьбовое соединение, самоотвинчивание, самозатягивающаяся гайка, вероятность безотказной работы

### **Введение**

Затяжка резьбовых соединений, созданная при сборке, в процессе работы машины в условиях эксплуатации под действием переменных нагрузок постепенно уменьшается. На интенсивность этого процесса оказывают влияние многие факторы, как-то: состояние и способ получения резьбы, жесткость стыков, микрогеометрия их поверхностей, наличие смазки, величина силы предварительной затяжки. В мобильных машинах и транспортных средствах нарушение стабильности затяжки также зависит от цикличности внешних нагрузок, частоты вынужденных колебаний, релаксации напряжений.

Самопроизвольное ослабление затяжки резьбового соединения может привести к нарушению работы сборочной единицы или машины в целом, быть причиной ухудшения ее эксплуатационных свойств, преждевременного отказа или аварии, в том числе вызванных поломками деталей из-за возросших значений динамических нагрузок. Поэтому при проектировании и сборке таких соединений большое внимание уделяют обеспечению стабильности их затяжки, а также стопорению [1, 2].

Существует несколько способов стопорения резьбовых соединений: созданием дополнительных сил трения путем осевого или радиального давления (стопорение контргайкой, винтом, самостопорящимися гайками); взаимной фиксации гайки относительно болта, одной из скрепляемых деталей или фиксацией нескольких гаек (винтов) (стопорение шплинтом, пружинными и деформируемыми шайбами, проволокой); посредством местных пластических деформаций (накерниванием). Полную картину по данному вопросу раскрывает ОСТ 107.460091.014-2004 [2]. Использование различных способов стопорения в машиностроении характеризуется следующими данными: упругой шайбой – 75...80 %, шплинтами – 10...12 %, специальными шайбами – 5...7 % и проволокой – 1...2 %.

Следует отметить, что самоотвинчивание резьбовых соединений при вибрациях, непременно сопровождающих работу машин и механизмов, является достаточно большой проблемой в технике [3]. Сами по себе резьбы обладают свойством «самоторможения», т. е. растягивающая нагрузка не вызывает поворота гайки относительно шпильки (болта). Поэтому достаточно высокая затяжка болтов является надежным средством предохранения соединений от ослабления. В случае действия только осевой статической нагрузки этого средства вполне достаточно. Однако при вибрациях, носящих случайный или систематический характер, во многих случаях, связанных с перекосом опорных поверхностей (при монтаже или в эксплуатации вследствие изгиба), могут быть кратковременные периоды, когда гайка оказывается почти свободной от осевых сил. В результате даже незначительные боковые силы могут вызвать ее поворот. Так, при динамических нагрузках, обусловленных действием вибра-

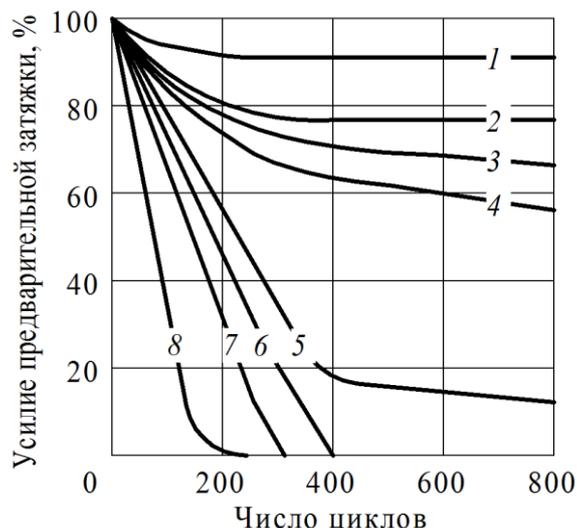
ции, обычная гайка с упругой шайбой теряет контрящие свойства через 7–8 часов работы (доля плоских пружинных стопорных шайб может достигать 39 % в комплекте крепежа автомобилей).

Явление ослабления затяжки резьбовых соединений особо остро проявляется в узлах, детали которых подвержены влиянию комплекса физических и химических факторов, например, в двигателях внутреннего сгорания.

Особой категорией резьбовых соединений являются соединения, которые наряду с прочими негативными факторами воспринимают и высокие тепловые нагрузки, что также приводит к напряжениям в теле шпильки (болта) и гайки, а также вызывает их деформации, ухудшая условия нормальной работы, предусмотренные проектной документацией.

Вышеперечисленные обстоятельства определяют необходимость проверки затяжки резьбовых соединений при проведении технических обслуживаний (ТО). Причем трудоемкость крепежных работ при проведении ТО автомобилей по данным [4] может достигать от 17 % до 30–35 % его общей трудоемкости. При этом следует отметить, что периодическое подтягивание резьбовых соединений без установленной заранее необходимости нарушает их стабильность, влечет появление остаточных деформаций в виде смятия резьбы или сопрягаемых поверхностей. Это в свою очередь может привести к последующему быстрому ослаблению резьбового соединения. После первой подтяжки ранее затянутого болта может быть потеряно до 20–25 % первоначального натяга. При повторных затяжках требуется приложить моменты, превосходящие первоначальные в 2 раза и более. Резьбовые соединения, подвергшиеся 10–15 затяжкам, держат натяг в 2–4 раза хуже, чем новые [5].

Следует также отметить, что использование прогрессивного крепежа (болты, винты и гайки, имеющие фланец, резьбовыдавливающие болты и винты, гайки самоконтрящиеся и т. д.), максимально обеспечивающего стабильность предварительной затяжки в сравнении с другими видами (рисунок 1), в настоящее время достигает лишь 1–13 % [6].



- 1 – резьбовой фиксатор-адгезив; 2 – болт, гайка с фланцем и зубом на торце;  
 3 – самоконтрящаяся гайка; 4 – болт – гайка с фланцем; 5 – гайка с полиамидной вставкой;  
 6 – болт – винт со стопорной (зубчатой) шайбой; 7 – болт – гайка – пружинная шайба;  
 8 – болт – гайка

Рисунок 1 – Кривые самоотвинчивания различных резьбовых соединений и способов их фиксации, построенные по результатам сравнительных испытаний циклическими нагрузками при колебаниях плоскости стыка соединяемых деталей по методу Юнкера

Ввиду вышесказанного представляется очевидной актуальность задачи обеспечения отсутствия повышенных и опасных значений вибрации деталей машин и механизмов, вы-

званных развитием самоотвинчивания резьбовых соединений, проявляющегося в виде увеличения зазоров в местах сопряжения деталей, за счет стабильности усилия их затяжки, т. е. – задачи повышения вероятности безотказной работы агрегата в целом.

### *Анализ публикаций*

Анализ литературных источников [7–9] позволил выделить преимущества и недостатки двух наиболее распространенных методов сборки резьбовых соединений – сборки с приложением внешнего крутящего момента и приложением осевых сил (данные таблицы 1).

Таблица 1 – Анализ методов сборки резьбовых соединений

Методы сборки резьбовых соединений	Преимущества	Недостатки
Приложением внешнего крутящего момента	– универсальность метода; – требуется наличие только поверхности под установку шайбы или гайки	– создание в теле болтов и шпилек касательных напряжений; – низкая точность контроля за силой затяжки применяемыми методами
Приложением осевых сил	– создание в теле болтов и шпилек только нормальных напряжений; – высокая точность контроля силы затяжки; – нет необходимости в применении шайб и стопорящих элементов	– требуется наличие дополнительного пространства для установки гидравлического устройства

Второй метод является более совершенным с точки зрения надежности и технико-экономической эффективности при эксплуатации. Однако он ограниченно применим в стесненных условиях, поскольку требует при реализации установки дополнительного оборудования соосно с резьбовым соединением. Его использование, как правило, должно быть предусмотрено на стадии опытно-конструкторских работ при создании машин и механизмов, в том числе путем увеличения длины шпилек или болтов. Но для затяжки крупногабаритных резьбовых соединений этот метод является незаменимым в части создания высоконадежного и стабильного в работе усилия затяжки.

Универсальность первого метода предопределила его повсеместное распространение. Однако для контроля значения силы затяжки при сборке высокоответственных резьбовых соединений возникает необходимость в применении специальных измерительных устройств и приспособлений. В целом этот метод менее предпочтителен, поскольку его использование влечет заведомое создание напряжений кручений в элементах резьбового соединения.

Выбор того или иного метода контроля затяжки резьбовых соединений во многом обусловлен, по мнению ведущих ученых в этой области (проф. Г. Б. Иосилевича, М. А. Леенсона, Е. Л. Симкина, М. Л. Гельфанда), технической возможностью применения, назначением машины, последствиями, в том числе экономическими потерями, от возможных ее простоев, аварий и т. д. В рамках настоящей работы был также выполнен сопоставительный анализ методов контроля усилия затяжки резьбовых соединений: по экспертным оценкам, по моменту затяжки, по углу поворота гайки, по деформации стягиваемых деталей, по удлинению болта, по значению осевой силы растяжения, с помощью тензодатчиков на болте, по деформации специальных шайб (данные таблицы 2) [10].

Таблица 2 – Погрешность методов контроля затяжки резьбовых соединений

Метод контроля	Погрешность, % ( $\pm$ )	
	по М. А. Леенсону, Е. Л. Симкину	по проф. Г. Б. Иосилевичу
1. По экспертным оценкам	–	35
2. По моменту затяжки	15 ÷ 45	25
3. По углу поворота гайки	20	15
4. По деформации специальных шайб	–	10
5. По деформации стягиваемых деталей	14	–
6. По удлинению болта	16	5
7. По значению осевой силы растяжения	3	–
8. С помощью тензодатчиков на болте	–	1

На практике получили наибольшее распространение контроль по моменту затяжки, по углу поворота гайки, по значению осевой силы растяжения (метод сборки приложением осевых сил). Нижние границы погрешностей первых двух упомянутых методов лежат в области погрешностей общеинженерных расчетов, что делает их применение приемлемым для общего и транспортного машиностроения.

Интересным представляется сравнение взглядов Г. Б. Иосилевича и М. Л. Гельфанда на условия, обеспечивающие безотказную работу резьбовых соединений, в том числе высоконагруженных (данные таблицы 3).

Таблица 3 – Условия, обеспечивающие безотказную работу резьбовых соединений

Критерии ученого	
по проф. Г. Б. Иосилевичу	по М. Л. Гельфанду
1. Значение и степень обоснованности $Q_0$	1. Конструкцией соединения
2. Точность создания $Q_0$ на одиночном резьбовом соединении	2. Правильностью расчета $Q_0$ , учитывающего функциональные особенности соединения
3. Равномерность затяжки групповых резьбовых соединений	3. Точностью затяжки в процессе сборки
4. Стабильность затяжки резьбового соединения	

Анализ данных свидетельствует о том, что оба специалиста этой области едины в мнении о том, что надежность высоконагруженных резьбовых соединений безусловно зависит от значения и степени обоснованности усилия предварительной затяжки  $Q_0$ , а также от точности его создания в процессе сборки или монтажа. Этого мнения придерживаются и современные исследователи [11].

Таким образом, предохранение резьбовых соединений от самоотвинчивания является актуальной научно-технической задачей, остающейся в полной мере неразрешенной до настоящего времени.

Многие методы, представленные выше, требуют при применении резервирования дополнительной длины шпильки или болта, что делает их ограниченно применимыми в стесненных условиях ограниченных габаритов транспортных средств. Применение шплинтов и штифтов также имеет существенный недостаток, а именно – ослабление и без того опасного сечения участка стяжной детали, поверхность которой насыщена концентраторами напряжений (выступами и впадинами витков резьбы).

### **Цель работы**

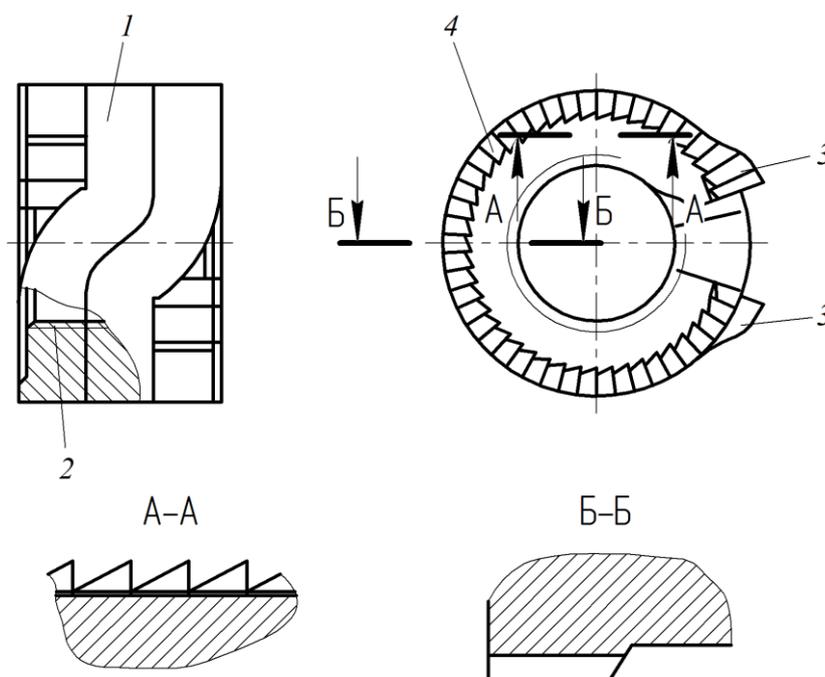
В совокупности с необходимостью наличия устройств для оценки эффективности работы стопорящих элементов вышеперечисленные недостатки требуют принятия нестандартных решений в части разработки конструктивно простых и надежных в эксплуатации самотормозящихся резьбовых соединений.

Поэтому в настоящей работе приобрело первоочередное значение решение поставленной задачи за счет замены гаек стандартной конструкции на самозатягивающиеся гайки, поскольку используемые в технике меры, предотвращающие самоотвинчивание, являются ограниченно применимыми в тяжело нагруженных узлах.

### **Изложение основного материала исследования**

На основании вышеизложенного материала и его анализа было принято решение об использовании в тяжело нагруженных узлах машин и механизмов самозатягивающейся гайки, которая благодаря своим конструктивным особенностям одновременно выполняет крепежную и фиксирующую (стопорящую) роль [12].

Описанная в [13] конструкция самозатягивающихся гаек (рисунок 2) успешно себя зарекомендовала в узлах крепления рельсовых стыков, условия работы которых во многом совпадают с эксплуатацией тяжело нагруженных резьбовых соединений.



1 – корпус гайки, выполненный в виде цилиндрической пружины из проволоки, направление наводки которой противоположно направлению резьбы; 2 – резьба со стандартным профилем; 3 – передний и задний поводковые выступы для закручивания и откручивания гайки; 4 – зубчатый ободок, необходимый для передачи на пружинную гайку максимального крутящего момента в условиях вибрации, обеспечивающего эффект самозатягивания

Рисунок 2 – Конструкция самозатягивающейся (пружинной) гайки

Самозатягивание гайки происходит автоматически при образовании зазора между соединяемыми деталями (в том числе возникшего из-за износа соединяемых элементов при температурных колебаниях) под действием вибрации до момента исчезновения относительных колебаний соединяемых элементов.

Назначение усилия предварительной затяжки модернизированного резьбового соединения, а также определение его геометрических параметров и прочностной расчет необхо-

димо проводить, исходя из рекомендаций [14], в которых оговорены необходимые и достаточные силовые, геометрические и эксплуатационные условия самоподтягивания (самоподкручивания) гайки. Прочностные расчеты направлены на установление значения верхней границы давления, возникающего в резьбовых деталях, и его последующего сравнения с допустимым значением предела прочности (820 МПа) материала, из которого изготовлена самозатягивающаяся гайка (сталь 65Г, подвергнутая термической обработке – закалке в масле при температуре 800–820 °С, и отпуске при температуре 340–380 °С).

Модернизация резьбовых узлов, как правило, не приводит к увеличению значения крутящего момента, необходимого для создания предварительной затяжки, в сравнении с ныне существующим.

При проектировании резьбового соединения с самозатягивающимися гайками, как правило, назначается, в соответствии с ГОСТ 4608-81, посадка с гарантированным натягом в пределах закона Гука (средний диаметр резьбы гайки выполняется меньше среднего диаметра резьбы болта) [15]. При этом должны быть учтены рекомендации [14], касающиеся определения максимально допустимого значения натяга, необходимого для обеспечения стабильной работы соединения и его самоподтягивания.

Оценка вероятности безотказной работы самозатягивающейся гайки в резьбовых соединениях производится по общеизвестным инженерным методикам в соответствии со следующими критериями:

- вероятность безотказной работы по критерию нераскрытия стыка;
- вероятность безотказной работы по критерию статической прочности;
- вероятность безотказной работы по критерию сопротивления усталости.

### ***Заключение***

В ходе исследования предложено использование в высокоответственных тяжело нагруженных резьбовых соединениях, подвергающихся в ходе работы комплексу сложных эксплуатационных факторов (вибрационное воздействие, циклические знакопеременные нагрузки, тепловые деформации, износ соединяемых деталей и т. д.), самозатягивающихся (упругих) гаек, позволяющих практически полностью исключить их возможное самоотвинчивание.

Внедрение предлагаемых мероприятий в целом не меняет алгоритма и значений энергосиловых параметров сборки данных узлов в сравнении с технологией, в которой применяются гайки стандартных конструкций, что благоприятно сказывается на дополнительных, в том числе капитальных, затратах при реализации проекта.

Направлением дальнейших исследований следует считать изучение показателей надежности рассмотренного резьбового соединения на основании данных, полученных в процессе его эксплуатации.

### ***Список литературы***

1. Лысенко, В. Г. Детали приборов / В. Г. Лысенко. – Минск : БНТУ, 2015. – 218 с.
2. ОСТ 107.460091.014-2004. Соединения резьбовые. Способы и виды предохранения от самоотвинчивания. Технические требования : стандарт отрасли : издание официальное : взамен ОСТ 4Г 0.019.200 : дата введения 2005-07-01 / разработан ФГУП «ЦКБ РМ». – Москва : ЦНИИРЭС, 2004. – 48 с.
3. Иосилевич, Г. Б. Затяжка и стопорение резьбовых соединений : справочник / Г. Б. Иосилевич, Г. Б. Строганов, Ю. В. Шарловский. – Москва : Машиностроение, 1985. – 224 с.
4. Коваленко, Н. А. Техническая эксплуатация автомобилей / Н. А. Коваленко, В. П. Лобах, Н. В. Вепринцев. – Минск : Новое знание, 2008. – 352 с. – ISBN 978-985-475-265-5.
5. Техническая эксплуатация автомобилей / Ю. П. Баранов, А. П. Болдин, В. М. Власов [и др.]. – Москва : Транспорт, 1983. – 488 с.
6. Сеницын, А. К. Основы технической эксплуатации автомобилей / А. К. Сеницын. – Москва : Российский университет дружбы народов, 2011. – 282 с. – ISBN 978-5-209-03531-2.

7. Гологорский, Е. Г. Разборка и сборка резьбовых соединений в ремонтном производстве / Е. Г. Гологорский, Д. А. Максимов // *Mechanization of construction*. – 2014. – № 2(836). – С. 3–7.
8. Водолазская, Н. В. Состояние и некоторые направления развития технологии сборки резьбовых соединений / Н. В. Водолазская // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. – 2016. – № 3. – С. 20–23.
9. Потемкин, А. Н. К вопросу обеспечения точности и уменьшения разброса усилий затяжки групповых резьбовых соединений в условиях механизированной сборки / А. Н. Потемкин // *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*. – 2013. – № 6(10). – С. 161–166.
10. Brevet d'invention № 2186077 (73.18778) FR France, IPC F16B5/02. Dispositif pour la fixation de pièces de construction en forme de panneaux à une construction sous-jacente : № 19730018778 : date de dépôt 23.05.1973 : publié 04.01.1974 / A. R. Buschor ; demandeur SFS STADLER AG (Suisse). – 12 p.
11. Соловьев, В. Л. Повышение точности контроля усилия затяжки при сборке групповых резьбовых соединений / В. Л. Соловьев // *Транспорт. Транспортные и технологические машины*. – 2013. – Вып. 3(31). – С. 67–70.
12. Патент № 2199035 Российская Федерация, МПК F16B37/12, B21F35/00, B21F3/04, B21H3/08, B21D11/06. Пружинная гайка и способ изготовления пружинных гаек : № 2001132104/28 : заявл. 29.11.2001 : опубл. 20.02.2003 / Г. И. Котиков, С. В. Бычин, З. З. Коршунова, А. Е. Тер-Нерсесьянц, О. С. Бойко ; заявитель А. Е. Тер-Нерсесьянц. – 9 с.
13. Испытания самозатягивающихся гаек узлов крепления рельсовых стыков / В. Г. Артюх, А. А. Никитченко, В. О. Мазур [и др.] // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. – 2018. – Т. 24, № 1. – С. 154–165.
14. Анализ работоспособности самозатягивающихся гаек узлов крепления рельсовых стыков / В. Г. Артюх, А. А. Никитченко, Н. В. Подгорная [и др.] // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 223–231.
15. ГОСТ 4608-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Посадки с натягом : межгосударственный стандарт : издание официальное : введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР от 16 июня 1981 г. № 2953 : взамен ГОСТ 4608-65 : дата введения 1982-01-01. – Москва : Издательство стандартов, 1981. – 15 с.

*М. Ю. Ткачёв*

*Автомобильно-дорожный институт*

*ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка*

**Обоснование применения самозатягивающихся гаек в тяжело нагруженных узлах машин и механизмов**

Детально освещены вопросы самоотвинчивания резьбовых соединений в тяжело нагруженных узлах машин и механизмов. Показано, что использование классических и прогрессивных крепежных средств в настоящее время полностью не решает задачи предотвращения ослабления резьбовых соединений в машинах, что влечет возникновение дополнительных временных затрат на проверку их затяжки при проведении технического обслуживания (до 35 % общей трудоемкости ТО). Выполнен анализ методов сборки резьбовых соединений. Показано, что надежность высоконагруженных резьбовых соединений зависит от значения и степени обоснованности усилия предварительной затяжки, а также от точности его создания в процессе сборки или монтажа. Предложено для тяжело нагруженных резьбовых узлов машин и механизмов, подверженных в процессе эксплуатации влиянию вибрации, использовать самозатягивающиеся (пружинные) гайки, способные длительный период сохранять усилие предварительной затяжки и ликвидировать образующиеся в соединении зазоры посредством автоматической самостоятельной подтяжки. Использование модернизированных гаек не меняет алгоритма сборки резьбовых соединений и энергосиловых параметров проводимых при этом операций, что благоприятно отражается на показателях технико-экономической эффективности внедрения предлагаемых мероприятий.

**РЕЗЬБОВОЕ СОЕДИНЕНИЕ, САМООТВИНЧИВАНИЕ, САМОЗАТЯГИВАЮЩАЯСЯ ГАЙКА, ВЕРОЯТНОСТЬ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ**

*M. Yu. Tkachev*

*Automobile and Road Institute of Donetsk National Technical University, Gorlovka*

**Use Justification of the Self-Tightening Nuts in Heavily Loaded Units of Machines and Mechanisms**

Issues of threaded connections self-unscrewing in heavily loaded units of machines and mechanisms are covered in detail. It is shown that currently the use of classical and progressive fasteners does not completely solve the problem of preventing the weakening of threaded connections in machines, which entails the emergence of additional time spent on checking their tightening during maintenance (up to 35 % of the total labor intensity of maintenance). The analysis of methods for assembling threaded connections is carried out. It is shown that the reliability of highly loaded threaded connections depends on the value and degree of validity of the pre-tightening force, as well as on the accuracy of its creation during assembly or installation. For heavily loaded threaded assemblies of machines and mechanisms exposed to vibration during operation it is proposed to use self-tightening (spring) nuts capable of maintaining the pre-tightening force for a long period and eliminating the gaps formed in the joint by means of automatic self-tightening. The use of modernized nuts does not change the algorithm for assembling threaded connections and the energy-power parameters of the operations carried out in this case, which favorably affects the indicators of the technical and economic efficiency of the proposed measures implementation.

THREADED CONNECTION, SELF-UNFASTENING, SELF-TIGHTENING NUT, NONFAILURE OPERATION POSSIBILITY

**Сведения об авторе:**

**М. Ю. Ткачев**

SPIN-код: 9855-0447  
Author ID: 57189358257  
ORCID ID: 0000-0001-5795-9595  
Телефон: +38 (071) 334-92-61  
Эл. почта: mishel-tkachev@ya.ru

*Статья поступила 01.10.2020*

*© М. Ю. Ткачев, 2020*

*Рецензент: Е. П. Мельникова, д-р техн. наук, проф., АДИ ГОУВПО «ДОННТУ»*