

УДК 621.891

DOI: 10.30987/1999-8775-2020-2020-2-11-18

В.П. Тихомиров, М.А. Измеров, М.Г. Шалыгин

## КАЧЕСТВО ИЗДЕЛИЯ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Представлена особая методология проектирования трибосистем, где процесс проектирования взаимодействует с анализом возможного поведения узла трения при действии заданных технических условий с учётом влияния окружающей среды, ко-

торая обеспечивает качество изделия на стадии проектирования.

**Ключевые слова:** трибосистема, проектирование, качество изделия, трибология, узел трения, износ.

V.P. Tikhomirov, M.A. Izmerov, M.G. Shalygin

## PRODUCT QUALITY AT DESIGN STAGE

The purpose of the work consists in the presentation to the scientific community a special methodology for tribo-system designing, where a design process interacts with the analysis of possible behavior of a friction angle while operating specified technical conditions taking into account an environment impact that is taking into account a forecasting of tribo-system behavior under specified conditions. For that the best possibility is the creation of the computer model of a friction unit with the estimate of its time behavior during the impact of outer parameters upon it and the impact of inner factors, for this purpose a design-engineer must have competences in different fields of science and technology. Besides, a designer must develop procedures for replacement, restoration and repair to sup-

port an operating status of the equipment under development for the whole life required.

A basic method of friction process investigations is a computer modeling of friction unit behavior.

The result and investigation novelty is the development of a special methodology for designing technical systems taking into account the simulation of their evolution ensuring product quality at the designing stage.

In such a way there are shown principles for machinery quality assurance during designing engineering systems.

**Key words:** tribo-system, designing, product quality, tribology, friction unit, wear.

### Введение

Под качеством продукции понимается совокупность свойств, обуславливающих ее пригодность к потреблению, способность удовлетворять своему назначению. Показатель качества продукции - это количественная характеристика одного или нескольких свойств продукции, входящих в ее качество, рассматриваемая применительно к определенным условиям ее создания и эксплуатации или потребления. Таким образом, требование обеспечения качества на всех стадиях жизненного цикла технической системы является важнейшим при создании и эксплуатации конкурентоспособного изделия. При этом особое внимание уделяется обеспечению качества на стадии проектирования. Как известно, проектирование представляет собой процесс создания проекта - прототипа - концепции новой системы (или её вариантов), удовлетворяющей предъявля-

емым к ней требованиям. Проектирование сложных систем обычно предполагает две стадии:

1) макропроектирование, или внешнее проектирование, в процессе которого решаются структурно-функциональные задачи в целом;

2) микропроектирование, или внутреннее проектирование (конструирование), связанное с разработкой элементов системы как физических единиц оборудования.

Методы внешнего проектирования сложных систем базируются на системном подходе к исследованию процессов функционирования, протекающих в системах. Внешнее проектирование начинается с формулировки проблемы, которая включает в себя:

– определение целей создания системы и круга решаемых ею задач;

- оценку действующих на систему факторов и определение их характеристик;
- выбор показателей и критерия эффективности системы.

Конструирование в соответствии с ЕСКД содержит в самом общем виде следующие последовательно связанные стадии: техническое задание, техническое предложение, эскизный проект, технический проект и рабочая документация.

Следует отметить [1], что процесс проектирования должен быть направлен не столько на сам проект, сколько на те изменения в обществе и окружающей среде, которые произойдут при внедрении рассматриваемого проекта. Такой подход приводит к необходимости решать задачи, связанные со взаимодействием проектируемого изделия с обществом, природой и окружающей средой, ремонтом и восстановлением элементов проектируемой системы, её утилизацией после окончания срока эксплуатации, а также требует глубокого знания сборочных и технологических операций, реализуемых при изготовлении технической системы.

На рис. 1 представлена схема, указывающая на стоимость принятия неправильного решения (ошибки проектиров-

щика-конструктора). Обращает на себя внимание тот факт, что стоимость ошибки растет, когда она имеет место на ранних стадиях создания изделия (на стадиях проектирования и конструирования). Для исключения грубых ошибок на этих ранних стадиях применяют такие известные методы, как Poka Yoke (защита от ошибок) и Fool proofing (защита от неквалифицированного вмешательства).

Анализ показал, что в 80 % случаев требуется доводка новых изделий, которая существенно меняет структуру самого изделия. Эксперты склонны считать, что современные методы проектирования в ряде случаев несовершенны, несмотря на широкое применение компьютерных технологий. Известно, что потеря работоспособного состояния технической системы происходит в основном из-за трения и износа разных кинематических пар и условно неподвижных разъемных соединений. При изготовлении новых сложных и ответственных изделий требуется проведение ускоренных ресурсных испытаний для оценки ресурса узла трения, работающего в условиях, предусмотренных нормативной документацией.

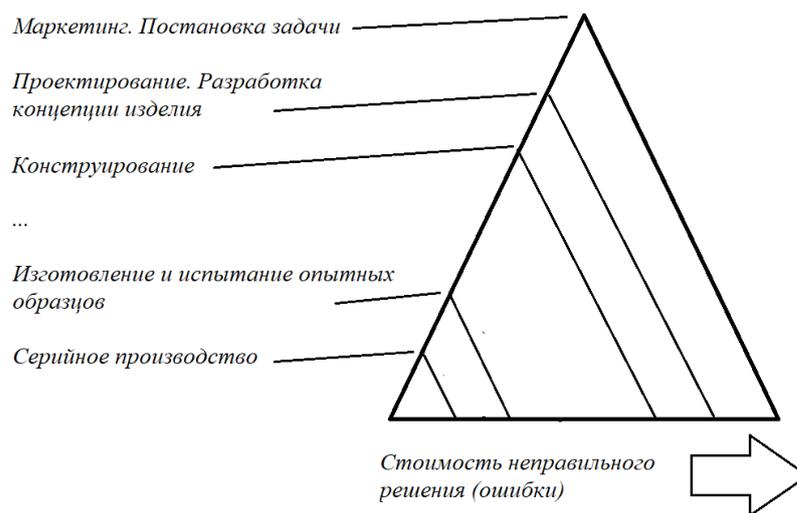


Рис. 1. Схема, указывающая стоимость ошибки на разных стадиях подготовки производства изделия

### Проектирование узлов трения

Изменения, происходящие на взаимодействующих поверхностях при относи-

тельном движении, характеризуют поведение системы. Результаты поведения вклю-

чают восстанавливаемые и невозстанавливаемые свойства элементов. Изменение состояния системы затрагивает материалы трибоэлементов и смазочный материал, энергию и обмен информацией в формах ввода и вывода. Внутреннее свойство включает в себя геометрические и физические аспекты, относящиеся к поверхностям трения и промежуточной среде. Поверхности трения сами по себе не могут в полной мере реализовать какое-либо трибологическое поведение.

На рис. 2 представлена простейшая трибологическая система «передача зубчатыми колесами», которая состоит из подсистем разного масштаба. Выделение подсистем, необходимое для изучения пове-

дения трибосистемы, называется декомпозицией. Подсистема «взаимодействие шероховатых поверхностей» может быть исследована, если в ней выделить свою подсистему «контакт», выделить и определить номинальную и фактическую (реальную) площади контакта, оценивающие несущую способность данного сопряжения поверхностей (рис. 3).

Все подсистемы взаимосвязаны, они определяют поведение всей трибосистемы. Заметим, что процессы, протекающие в системе, могут реализовываться либо одновременно, либо в определенной последовательности, имея скрытый (латентный) период.

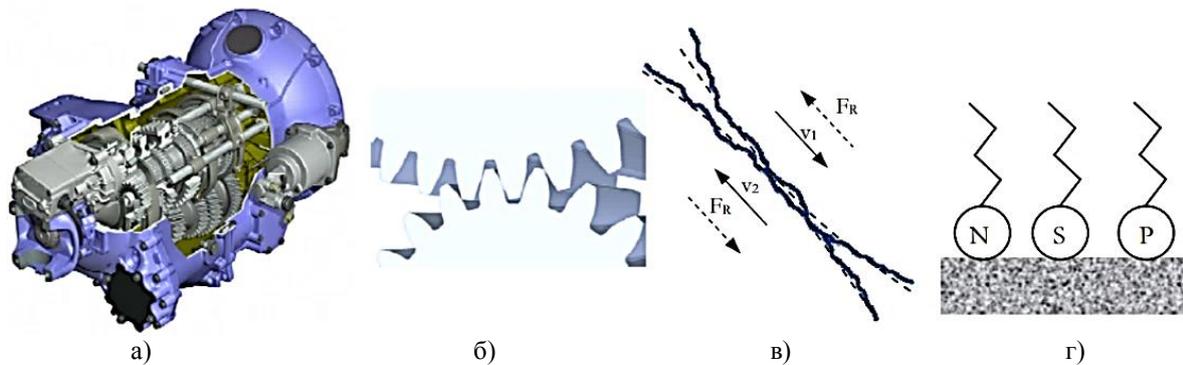


Рис. 2. Коробка переключения передач и ее подсистемы (декомпозиция системы): а - коробка передач; б - зацепление; в - взаимодействие шероховатых поверхностей; г - строение мономолекулярного слоя на поверхности трения

В ряде случаев, как показано на рис. 4, можно ограничить систему, включив в её состав три элемента. Система ограничена системным блоком, который

осуществляет обмен веществом, энергией и информацией (посредством ввода и вывода) с окружающей средой.

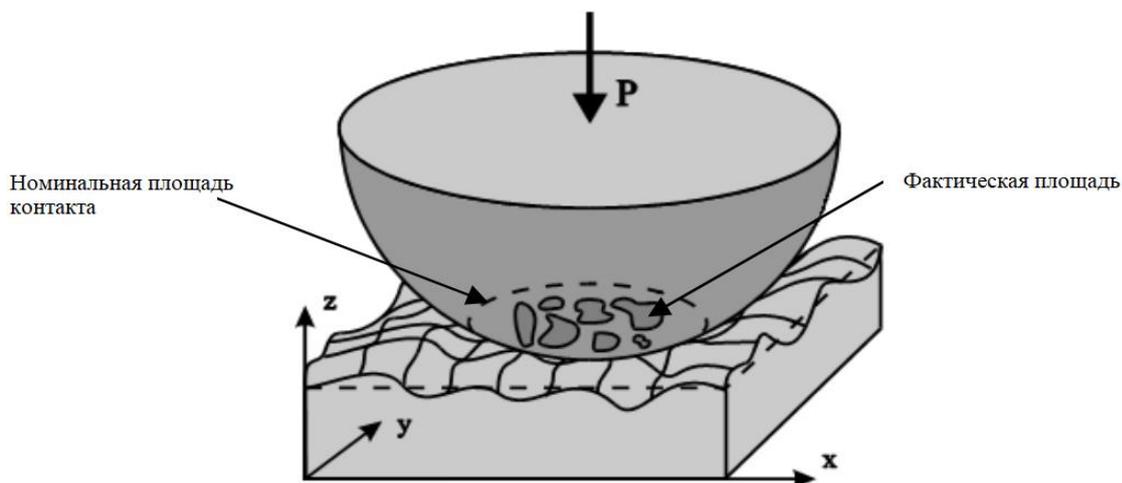


Рис. 3. Площади контакта

При решении задач синтеза трибосистем требуется более детальное рассмот-

рение структуры системы и процессов, протекающих в самой системе.

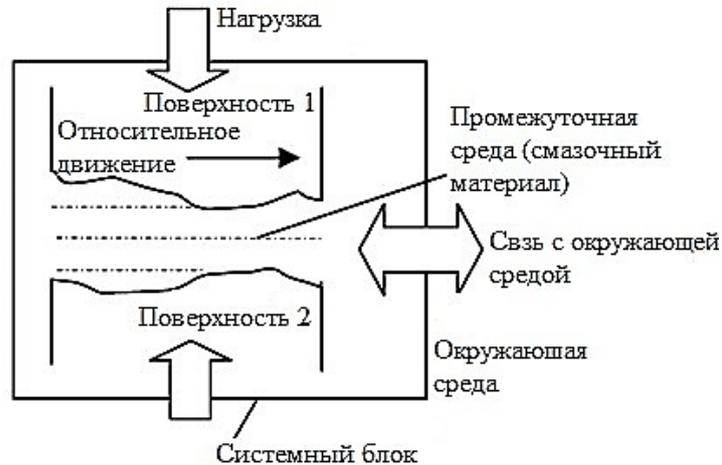


Рис. 4. Простая трибосистема

В данном случае представление трибосистемы в виде «черного ящика» не позволяет на этапе проектирования синтезировать достаточно эффективную систему, соответствующую эксплуатационным требованиям и учитывающую ограничения, предъявляемые к системе. Кроме того, важными являются вопросы прогнозирования нормального функционирования трибосистемы и оценки ресурса. Слож-

ность задачи оценки ресурса связана с тем, что изнашивание является стохастическим процессом, описание которого затруднено в условиях частой смены нагрузочно-скоростного режима.

Применим к проектируемой триботехнической системе идею морфологического анализа (таблица).

Таблица

Трибосистема и ее элементы

Элемент (процесс)	Альтернативы			
	Металл-металл (без покрытия)	Металл-полимер	Композит-металл	Элемент пары трения с покрытием
1. Материалы пары трения (выбор подходящего материала)	Металл-металл (без покрытия)	Металл-полимер	Композит-металл	Элемент пары трения с покрытием
2. Макро-геометрия контактирующих тел	Сфера-сфера (сфера-плоскость)	Цилиндр-цилиндр (цилиндр-плоскость)	Плоскость-плоскость	-
3. Топография (моделирование поверхности)	Волнистость	Шероховатость	Макроотклонения от правильной геометрической формы	Направление следов обработки
4. Конфигурация контакта	Точечный	Линейчатый	Плоскость	-
5. Вид относительного движения	Скольжение	Качение	Качение со скольжением	Верчение
6. Нагрузка	Постоянная	Переменная (циклическая)	Ударная	
7. Смазка (моделирование трения)	Без смазочного материала	Гидродинамическая (гидростатическая)	Смешанная (эластогидродинамическая)	Граничная
8. Состав окружающей среды	Воздух	Вакуум	Пыль, вода, отработавшие газы	-

Предварительный выбор элементов трибосистемы с учетом условий эксплуатации требует поиска удачных аналогов

### Описание системы

На рис. 5 представлена трибосистема в виде «черного ящика», содержащая входные и выходные величины [2]. Связь между факторами (входные величины) выражается зависимостью

$$H(t) = f_S(S, F, Y, X).$$

Здесь  $f_S$  - функция преобразования (передаточная функция) входных величин

(альтернатив) и применения современных компьютерных технологий.

(факторов) в выходные (параметры);  $H(t)$  - вектор параметров, зависящих от времени.

Связь между параметрами (выходные величины) можно условно представить как

$$H(t) = \{V, T, C, Z\}^T.$$

Здесь  $V, T, C, Z$  - векторы отдельных параметров.

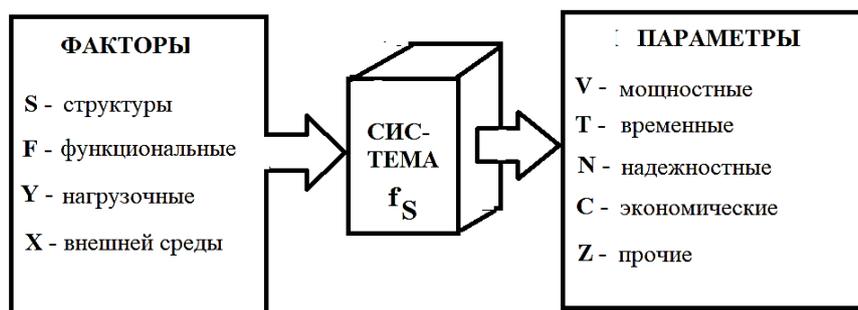


Рис. 5. Модель системы («черный ящик»)

Модель системы как средство синтеза технической системы представляет собой физический или математический объект, адекватно отражающий исследуемую

### Поведение трибосистемы

Эволюция трибосистемы определяется тремя принципами:

1. Процессы, протекающие в трибосистеме, взаимосвязаны.
2. Свойства трибоэлементов, определяющие в большей или меньшей степени поведение системы, зависят от времени.
3. Результаты функционирования системы, такие как сила трения, износ и т.п., являются следствием взаимовлияния процессов, протекающих на поверхностях трения при взаимодействии трибоэлементов с промежуточной и окружающей средами.

Свойства трибоэлементов и систем, содержащих трибоэлементы, зависят от времени. Материал любого элемента в реальной паре трения несет более интенсивную нагрузку, чем нагруженная деталь машины, и работает в более тяжелых условиях. Реальная площадь контакта всегда намного меньше, чем номинальная пло-

щадь контакта. Модель способствует проектированию новой системы с заданными свойствами [3].

щадь контакта. Через эту меньшую площадь контакта пары трения передается нагрузка, равная той, которая определена (рассчитана) для номинальной площади. Фактическая нагрузка очень высока в реальной (фактической) области контакта. Также в таких условиях дополнительно может возникать физическая или химическая реакция между различными материалами. Кроме того, существует относительное движение сопряженных поверхностей, которое интенсифицирует повреждения материала в области контакта и приводит к повышению температуры при трении [4]. Это ускоряет изменение их физических свойств, химического состава и геометрической конфигурации, особенно из-за относительного движения. Эти изменения непрерывно повторяются, и часто с очень высокой частотой. Относительное движение вызывает тепло, а затем высокую температуру и другие виды активной энергии.

Они, несомненно, будут способствовать изменению физических аспектов и химических реакций. Все они делают изменение свойства на поверхности каждого элемента в узле трения намного быстрее, чем в объеме материала. В большинстве случаев эти изменения необратимы.

Часто трибологи при анализе трибосистемы считают, что имеют дело с неизменяемой во времени системой. На самом деле они должны рассматривать ее как систему переменных во времени показателей при анализе и трибологическом дизайне (проектировании трибосистем). Как известно, скорость изменения параметров (в частности износа) является переменной величиной за время эксплуатации. На более раннем этапе работы новой системы скорость её изменения высока (этап приработки). Впоследствии скорость изменения замедляется и стабилизируется на основном этапе работы. И наконец, скорость изменения возрастает в момент переходного режима и особенно на этапе катастрофического износа, когда система и ее элементы исчерпали свои возможности сопротивляться внешним воздействиям (область деградации свойств элементов).

Результаты трибологического поведения системы являются результатом взаимного воздействия элементов. Понимание процессов в трибосистеме требует владения знаниями и навыками дисциплин, от-

### Моделирование трибосистем

Понимание трибологических процессов позволяет при проектировании выбрать необходимые материалы пары трения, а также найти адекватные меры в управлении поведением системы [5]. Основная цель современного моделирования - обеспечить инженеров, работающих в области трибологии, методологией, позволяющей разработать модель, имитирующую поведение системы, и дать оценку влияния факторов. Ориентируясь на перспективные решения, моделирование дает возможность выявить критические условия и условия работоспособного состояния, что позволяет создать требуемую трибосистему без дорогостоящих процедур изго-

носящихся к физике, химии, компьютерным технологиям и др.

Элементами простейшей трибосистемы (рис. 4) являются силовое взаимодействие, относительное движение поверхностей и промежуточная среда между поверхностями. Трансформация механической энергии движения в тепловую энергию, перенос тепла в элементы и окружающую среду создают устойчивое или неустойчивое температурное поле, определяя термодинамическое поведение трибосистемы. Молекулярное взаимодействие (включая перенос) между поверхностями и средой является физическим или физико-химическим поведением. Реакции на ионном и атомном уровне определяют химическое поведение. Если есть воздействие электрического или магнитного поля, то поведение системы характеризуется электрическими или магнитными свойствами трибосистем. Поведение трибосистемы зависит от изменений структуры поверхностей системы.

Трибология - это наука и техника, которая предоставляет теории и технологии для описания и контроля поведения трибологической системы. Трудности для трибологов заключаются в том, что они должны знать вместе с трибологией и другие, смежные дисциплины. Такой междисциплинарный характер требует новой методологии трибологии, отличной от трения, износа или смазки.

товления опытного образца и доводки конструкции. Основной целью синтеза является прогнозирование трибологических процессов в конкретных условиях.

Итак, проектирование трибосистемы включает:

- материалы (их выбор);
- кинематику;
- механизмы повреждений;
- третье тело (его наличие);
- шероховатость;
- деформации;
- химические реакции;
- контактную механику и площади контакта;

- моделирование (качественное) и гипотезы о процессах;
- имитацию взаимодействия элементов;
- трибостатистику;
- проверку адекватности и корректировку модели.

Необходимость рассмотрения всех аспектов проектирования позволяет улучшить наше понимание работы трибосистемы и использовать помощь теоретических исследований. Кроме того, существует еще необходимость проведения дополнительных экспериментальных исследований с использованием метрологического сопровождения, методов изучения изменения топографии поверхностей и анализа частиц износа. Знания, полученные на этом этапе (в сочетании с практическим опытом в области трибологии), будут применены для улучшения работы трибосистем и обеспечения высокого уровня надежности в технических устройствах [6-8]. Получение современных знаний о трении, износе и смазочном действии для конкретных приложений, предназначенных для оптимизации конструкции трибосистем, способствует повышению износостойкости поверхностных слоев и несущей способности смазочных материалов.

### Заключение

Таким образом, приведены основные принципы обеспечения качества при проектировании технических систем. Компетенция конструктора, которая закладывается при изучении соответствующих дисциплин (конструкторского и технологического направлений) в высшей школе, явля-

Прогноз срока службы трибосистем основывается на знании основных параметров трибосистемы. Детальные исследования и анализ осуществляются на базе развития и оптимизации имитационных моделей для исследования влияния характеристик поверхности и системы смазки. Информационные технологии - как и во многих других дисциплинах - также могут помочь в триботехнических исследованиях, в практике повышения эффективности научно-исследовательской работы и при решении инженерных задач. Научно-исследовательская деятельность должна сосредоточиться на любом инструменте моделирования, начиная от более или менее простых расчетов в механике контактного взаимодействия до динамических моделей распространения трещины, термических напряжений, схватывания и, наконец, трибохимических реакций [9; 10].

Общий прогресс научно-исследовательской работы приведет к разработке новых инструментов для проектирования трибосистем. Базы данных и экспертные системы позволят проводить эффективный поиск соответствующих материалов или аналогов конструктивных решений для триботехнических задач, если подходящие конструкции трибосистем не разработаны.

ется важным фактором обеспечения качества изделия при проектировании. При этом конструктор должен разработать процедуры замены, восстановления и ремонта для поддержания работоспособного состояния разрабатываемой техники в течение требуемого срока службы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джонс Д.К. Методы проектирования. М.: Мир, 1986. 326 с.
2. Чихос Х. Системный анализ в трибонике / пер. с англ. С.А. Харламова. М.: Мир, 1982. 351 с.
3. Тихомиров В.П., Горленко О.А., Порошин В.В. Трибология: методы моделирования процессов. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2017. 239 с.
4. Тихомиров В.П., Измеров М.А. Износ деталей машин. Брянск: БГТУ, 2018. 139 с.
5. Тихомиров В.П., Порошин В.В., Горленко О.А., Измеров М.А. Синтез триботехнических систем: монография / под общ. ред. В.П. Тихомирова. М.: Купер Бук, 2019. 245 с.
6. Tikhomirov V.P., Izmerov M.A. Fractal model of elastoplastic contact of nominally flat rough surfaces // *Advances in Engineering Research: Proceedings of the international conference on aviamechanical engineering and transport (AVIAENT 2019)*. 2019. Vol. 188. P. 344-350.
7. Tikhomirov V.P., Gorlenko O.A., Izmerov M.A. Simulation of leakage through mechanical sealing

- device // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. P. 1-4.
8. Лемешева Е.В., Тихомиров П.В., Атрощенко А.М., Булхов Н.А., Измеров М.А. Нейрокомпьютерное моделирование контактной жесткости // Вестник Брянского государственного технического университета. 2016. № 2 (50). С. 156-166.
  9. Varatharaj N., Ajeet J., Subba R., Jaywant H. Importance of fatigue life in design optimization of off-highway power shift transmission system // Journal of Materials Science & Surface Engineering. 2015. Vol. 3 (1). P. 195-201.
  10. Shunmuga M., Priyanka P., Azad A. Investigations on coefficient of friction and surface roughness of AA6061+B4C composites produced by stir casting process // Journal of Materials Science & Surface Engineering. 2017. Vol. 6 (2). P. 779-782.
1. Johns D.K. *Design Methods*. M.: Mir, 1986. pp. 326.
  2. Chikhos H. *System Analysis in Tribonics* / transl. from Engl. S.A. Kharlamov. M.: Mir, 1982. pp. 351.
  3. Tikhomirov V.P., Gorlenko O.A., Poroshin V.V. *Tribology: Methods of Process Modeling*. 2-d edition revised and supplemented. M. Yuright, 2017. pp. 239.
  4. Tikhomirov V.P., Izmerov M.A. *Machinery Wear*. Bryansk: BSTU, 2018. pp. 139.
  5. Tikhomirov V.P., Poroshin V.V., Gorlenko O.A., Izmerov M.A. *Synthesis of Tribotechnical Systems*: monograph / under the general editorship of V.P. Tikhomirov. M.: Cooper Book, 2019. pp. 245.
  6. Tikhomirov V.P., Izmerov M.A. Fractal model of elastoplastic contact of nominally flat rough surfaces // *Advances in Engineering Research: Proceedings of the international conference on aviamechanical engineering and transport (AVIAENT 2019)*. 2019. Vol. 188. P. 344-350.
  7. Tikhomirov V.P., Gorlenko O.A., Izmerov M.A. Simulation of leakage through mechanical sealing device // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. P. 1-4.
  8. Lemesheva E.V., Tikhomirov V.P., Atroshchenko A.M., Bulkhov N.A., Izmerov M.A. Neuro-computer modeling of contact rigidity // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2016. No.2 (50). pp. 156-166.
  9. Varatharaj N., Ajeet J., Subba R., Jaywant H. Importance of fatigue life in design optimization of off-highway power shift transmission system // Journal of Materials Science & Surface Engineering. 2015. Vol. 3 (1). P. 195-201.
  10. Shunmuga M., Priyanka P., Azad A. Investigations on coefficient of friction and surface roughness of AA6061+B4C composites produced by stir casting process // Journal of Materials Science & Surface Engineering. 2017. Vol. 6 (2). P. 779-782.

Ссылка для цитирования:

Тихомиров В.П., Измеров М.А., Шалыгин М.Г. Качество изделия на стадии проектирования // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020. № 2. С. 11–18. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-2020-2-11-18.

Статья поступила в редакцию 15.12.19.

Рецензент: д.т.н., профессор БГАУ

Коришунов В.Я

Статья принята к публикации 29. 01. 20.

#### Сведения об авторах:

**Тихомиров Виктор Петрович**, д.т.н., профессор кафедры «Трубопроводные транспортные системы» Брянского государственного технического университета, e-mail: [dm-bgtu@yandex.ru](mailto:dm-bgtu@yandex.ru).

**Измеров Михаил Александрович**, к.т.н., доцент кафедры «Трубопроводные транспортные системы»

**Tikhomirov Victor Petrovich**, Dr. Sc. Tech., Prof. of the Dep. “Pipeline Transport System”, Bryansk State Technical University, e-mail: [dm-bgtu@yandex.ru](mailto:dm-bgtu@yandex.ru).

**Izmerov Mikhail Alexandrovich**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Pipeline Transport Sys-

tem» Брянского государственного технического университета, e-mail: [m.izmerov@yandex.ru](mailto:m.izmerov@yandex.ru).

**Шалыгин Михаил Геннадьевич**, д.т.н., зав. кафедрой «Трубопроводные транспортные системы» Брянского государственного технического университета, e-mail: [migshalygin@yandex.ru](mailto:migshalygin@yandex.ru).

tem”, Bryansk State Technical University, e-mail: [m.izmerov@yandex.ru](mailto:m.izmerov@yandex.ru).

**Shalygin Mikhail Gennadievich**, Dr. Sc. Tech., Head of the Dep. “Pipeline Transport System”, Bryansk State Technical University, e-mail: [migshalygin@yandex.ru](mailto:migshalygin@yandex.ru).