**Тарасов Вячеслав Анатольевич. Обеспечение заданных характеристик надежности затворов запорной трубопроводной арматуры : диссертация ... кандидата технических наук : 05.02.02 / Тарасов Вячеслав Анатольевич; [Место защиты: Брат. гос. ун-т].- Братск, 2009.- 145 с.: ил. РГБ ОД, 61 10-5/1378**

Братский государственный университет

***На правах рукописи***

**04201002909**

**Тарасов В.А.**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ ЗАТВОРОВ ЗАПОРНОЙ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ**

Специальность: 05.02.02.

"Машиноведение, системы приводов и детали машин"

**Диссертация**

**На соискание ученой степени кандидата технических наук Научный руководитель: д.т.н., профессор П.М. Огар**

**Братск 2009**

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

ВВЕДЕНИЕ 4

ГЛАВА 1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗАТВОРОВ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ

1. Общие сведения о затворах трубопроводной арматуры 10
2. Требования при проектировании трубопроводной арматуры 19
3. Многокритериальная постановка при оптимальном проектировании затворов трубопроводной арматуры 23

ГЛАВА 2. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАННЫХ НОРМ ГЕРМЕТИЧНОСТИ И РЕСУРСА ЗАТВОРОВ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ

1. Обзор методов определения герметичности

уплотнений 34

1. Определение характеристик контакта шероховатых поверхностей уплотнительных стыков 51
2. Определение герметизирующей способности уплотнительных соединений 67
3. Обеспечение долговечности по критериям усталостного разрушения и износа затворов 80

ГЛАВА 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ОБЛАСТИ КОНТАКТА ЗОЛОТНИКА И СЕДЛА

1. Общее решение контактной задачи 89
2. Начальный контакт вдоль полосы 97
3. Начальный контакт вдоль линии 102
4. Контакт с изменяющимися начальными параметрами 105

з

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПТИМАЛЬНОГО

ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗАТВОРОВ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ

* 1. Формулирование пространства исходных параметров 107
  2. Введение функциональных ограничений и критериев качества 109
  3. Проведение вычислительных экспериментов 117
  4. Анализ и обсуждение полученных результатов 126

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 129

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 132

ПРИЛОЖЕНИЯ 144

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Сфера применения запорной трубопроводной ар­матуры (ТА) очень широка: это авиационная и космическая техника, глубоко­водные аппараты и морской транспорт, атомная энергетика, химическая и неф­теперерабатывающая промышленность, вакуумная техника, трубопроводный транспорт, гидропневмотопливные системы различных машин, аппаратов и оборудования, коммунальное хозяйство и т.п. Надежность запорной ТА явля­ется важнейшей характеристикой машин, аппаратов и оборудования, которая определяет нормальную эксплуатацию, риски аварийных ситуаций, безопас­ность людей, экологическую обстановку. Многие из перечисленных объектов входят в число важнейших, для которых должны быть решены в начале XXI века проблемы снижения рисков.

Наиболее важными узлами запорной ТА, обеспечивающими герметич­ность при перекрытии потока рабочей среды, являются затворы - герметичные соединения (ГС), состоящие из золотника и седла, на которые приходится до 50% всех отказов. Для сравнения: на корпусные элементы приходится 10-15%, на пары трения -10-15%)

Об определенной неудовлетворенности состоянием вопросов, связанных с проектированием затворов трубопроводной арматуры и содержанием норма­тивных документов можно судить по публикациям [44, 45, 82, 85 и др.] в науч­но-техническом журнале «Арматуростроение», учрежденном Научно- Промышленной Ассоциацией Арматуростроителей.

Обеспечение функциональной надежности ГС закладывается на стадии проектирования. Из общего числа отказов, связанных с нарушением герметич­ности, 2/3 обусловлено конструкторско-технологическими дефектами. При со­вершенствовании конструкций затворов необходимо обеспечение следующих их свойств: герметичности, прочности, долговечности, ремонтопригодности и сохраняемости.

Основным свойством в аспекте надежности является герметичность, ко­торая определяется функциональными параметрами уплотнительных поверх­ностей и сжимающими напряжениями (контактными давлениями герметиза­ции), обеспечивающими требуемые контактные характеристики - относитель­ную площадь контакта и плотность зазоров. К функциональным параметрам относятся геометрические характеристики шероховатости (по ISO 4287/1 -

1997) и параметры физико-механических свойств материалов. Контактные дав­ления являются основной характеристикой, определяющей габаритно- массовые показатели затворов ТА, их долговечность, энергоемкость привода. В арматуростроении нормы герметичности регламентированы ГОСТ 9544 — 2005, в котором установлены требования к проведению приемо-сдаточных испыта­ний на герметичность в зависимости от условного прохода DN, номинального давления среды PN и класса герметичности. Существует также нормативный документ, связывающий ресурс с величиной контактных давлений (ОСТ 26-07- 2044-82), однако наряду с этим отсутствуют нормативные документы по опре­делению нагрузок (усилий, контактных давлений, моментов), обеспечивающих указанные нормы герметичности, что может иметь негативные последствия в плане безопасности. Недостаточная нагрузка не обеспечит заданной герметич­ности, перегрузка приведет к уменьшению ресурса или к разрушению элемен­тов арматуры.

В специальном техническом регламенте «О безопасности трубопровод­ной арматуры», разработанном в Центральном конструкторском бюро армату- ростроения (ЗАО «НЇТФ «ЦКБА», г. С.-Петербург) указано, что при проекти­ровании арматуры должны быть обеспечены параметры назначения, вклю­чающие утечку рабочей среды через затвор. Это означает, что проектировщи­ком для конкретной конструкции затвора должны быть указаны усилия герме­тизации (контактные давления, интенсивность нагрузки), обеспечивающие за­данные нормы герметичности.

На наш взгляд в этом случае должны быть разработаны нормативные до­кументы в виде программных средств, определяющих оптимальное сочетание исходных конструктивных параметров и усилия герметизации, обеспечиваю­щих заданные нормы герметичности и ресурс. Современная теория проектиро­вания предполагает генерирование значительного числа вариантов проекти­руемого узла для поиска лучших технических решений. Применительно к про­ектированию затворов ТА эго возможно при математическом описании про­цесса герметизации, включающем: напряженно-деформированное состояние в зоне контакта; контактирование шероховатых поверхностей под действием сжимающих напряжений; истечение рабочей среды через уплотнительный стык; влияние особенностей эксплуатации. Решение перечисленных вопросов составит научную основу для оптимального проектирования затворов ТА.

б

В настоящее время для решения задач трибологии широко используется дискретная модель шероховатости и теория контактирования шероховатых по­верхностей разработанная И.В. Крагельским и Н.Б. Демкиньтм с учениками (модель КД) в которой для описания шероховатости используется начальная часть кривой опорной поверхности в виде параболы. Однако использование та­кой модели для решения задач герметичности приводит к значительным по­грешностям, так как для металлических уплотнительных поверхностей значе­ния контактных давлений на два-три порядка выше, чем для узлов трения. Для уплотнительного стыка характерна большая плотность пятен контакта, что приводит к взаимному влиянию неровностей. Поэтому для описания уплотни­тельного стыка требуется модель шероховатой поверхности, адекватно описы­вающая реальную поверхность, и соответствующая всей опорной кривой, а не только ее начальной части.

Для расчета величины утечки через затвор в настоящее время широко используется закон Дарси для фильтрации через пористое тело. Однако при этом не учитывается важная особенность уплотнительного стыка, в отличие от объемного пористого тела - он образован в результате контакта двух поверхно­стей. С ростом нагрузки отдельные пятна контакта могут сливаться. Из-за это­го доля микроканалов, по которым происходит утечка, с ростом нагрузки уменьшается. Кроме того при расчетах величины утечки используется модель идеального газа, что приводит к большим погрешностям, особенно при давле­ниях, больше 30 МПа.

**Цель работы** - повышение надежности затворов запорной трубопровод­ной арматуры на этапе проектирования путем создания программных средств, определяющих оптимальное сочетание исходных конструктивных параметров и усилия герметизации, обеспечивающих заданные нормы герметичности, прочность и ресурс.

Реализация цели связана с решением следующих **задач исследований:**

* совершенствование методов определения контактных характеристик, влияющих на герметизирующую способность уплотнительных соединений;
* математического моделирования утечки рабочей среды через уплотни­тельный стык;
* определение долговечности (ресурса) затворов по критериям усталост­ного разрушения и износа;
* определения напряженно-деформированного состояния в области кон­такта золотника и седла;
* создание методики оптимального проектирования затворов ТА.

**Объект исследований** - металлические затворы запорной трубопровод­ной арматуры.

**Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций.**

Научные положения аргументированы, теоретические результаты рабо­ты и выводы подтверждены использованием теории упругости, механики кон­тактного взаимодействия, трибомеханики, газовой динамики, теории вероятно­сти, специальных разделов математического анализа, имитационным модели­рованием.

**Научная новизна** заключается в:

* разработке математической модели контактирования жесткой шерохо­ватой поверхности со слоистым упругим полупространством, учитывающей влияние на контактные характеристики упругих свойств основания и слоя и его толщины;
* построении математической модели утечки рабочей (или испытатель­ной) среды через затвор, описывающей его герметизирующую способность в зависимости от комплексных характеристик контакта шероховатых поверхно­стей и учитывающей распределение контактного давления и реальные свойст­ва газов;
* разработке методики определения напряженно-деформированного со­стояния в области контакта золотника и седла с учетом трения, позволяющей определить ширину зоны контакта, распределение контактного давления на площадке контакта и эквивалентные напряжения;
* уточнение влияния на напряженно-деформированное состояние осо­бенностей контакта, связанных с изменяющимися начальными параметрами: шириной зоны контакта при начальном контакте вдоль полосы и угла нормали при начальном контакте вдоль линии;
* разработке методики оптимального проектирования затворов ТА с ис­пользованием метода исследования пространства параметров с помощью ЛПт-последователыюстей при назначенных функциональных ограничениях и критериях качества.

**Практическая ценность** работы заключается в том, что на базе прове­денных исследований создан современный метод проектирования затворов за­порной арматуры в виде программных средств учитывающий напряженно- деформированное состояние в зоне контакта золотника и седла и контактные характеристики в уплотнительном стыке шероховатых поверхностей, обеспе­чивающих его герметизирующую способность и ресурс.

По результатам исследований реализованы:

«Методика определения напряженно-деформированного состояния в зо­не контакта золотник-седло», внедрена в ОАО «ИркутскНИИхиммаш»;

«Методика расчета герметизирующей способности высоконапряженных уплотнительных соединений», внедрена в ОАО «ИркутскНИИхиммаш»;

Программное обеспечение «ЗАТВОР 01» по оптимальному проектирова­нию затворов трубопроводной арматуры.

Указанные разработки внедрены также в учебный процесс по магистер­скому направлению 150400 - Технологические машины и оборудование

**Апробация работы.** Результаты и основные положения доложены и об­суждены на научных конференциях: III и IV международной конференции «Проблемы механики современных машин», г. Улан-Удэ, 2006 и 2009 гг.; меж­дународная научно-технической конференции «Современные проблемы меха­ники», г. Ташкент, 2009г.; на I и II Всероссийской научно-практической конфе­ренции «Безопасность регионов -основа устойчивого развития», Иркутск 2007, 2009 гг. International conference on «Mechanics development issues»: Ulaanbaatar, Mongolia 2009; на Всероссийских научно-технических конференциях «Естест­венные и инженерные науки - развитию регионов», г. Братск, 2004 - 2009 г.г.; на Всероссийских научно-технических конференциях «Механика - XXI веку», г. Братск.

**Публикации.** По результатам работы опубликовано 18 печатных работ, из которых 10 статей и 8 докладов. В изданиях перечня ВАК опубликовано 3 статьи.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений.

В первой главе приведены общие сведения о затворах ТА, представлены схемы конструкций и предложена их классификация по ряду признаков, рас­смотрено множество требований к ТА, которые включают требования, предъ­являемые к затвору.

Для математической постановки задачи оптимального проектирования затворов использован метод исследования пространства параметров, предпола­гающий многокритериальный подход.

Во **второй главе** рассмотрены вопросы, связанные с обеспечением гер­метичности и долговечности затворов ТА.

Приведены обзор и анализ существующих методов определения герме­тичности уплотнительных соединений.

Процесс истечения среды через затвор представлен в виде математиче­ской модели, которая в дальнейшем используется при оптимальном проекти­ровании конструкции затвора.

Для определения характеристик контакта шероховатых поверхностей рассмотрено использование дискретной модели шероховатости при описании опорной кривой профиля параболой и отношением бета-функции.

Рассмотрено контактное взаимодействие жесткой шероховатой поверх­ности со слоистым упругим полупространством.

Для оценки герметизирующей способности уплотнительного стыка вве­ден интегральный показатель, зависящий от параметров микрогеометрии и контактных давлений герметизации.

**Третья глава** посвящена определению напряженно деформированного состояния в области контакта золотника и седла с учетом трения. Рассмотрены вопросы определения: ширины зоны контакта; распределения на ней контакт­ного давления; эквивалентных напряжений.

Рассмотрены особенности контакта, связанные с изменением начальных параметров: ширины зоны контакта при начальном контакте вдоль полосы и угла нормали при начальном контакте вдоль линии.

**В четвертой главе** описана методика синтеза затворов с заданными экс­плуатационными показателями и приведены примеры оптимального проекти­рования затворов трубопроводной арматуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Произведен анализ работ и нормативных документов в области проек­тирования затворов ТА. Указано на отсутствие в нормативных материалах дан­ных о силовом воздействии на затвор для обеспечения его герметичности при эксплуатации или при приемо-сдаточных испытаниях.
2. Процесс проектирования конструкции затвора, как частный случай разработки многомерной системы, формализован и представлен в виде постав­ленных этапов: формулирование данных на проектирование, выбор концепции, оптимизация, детализация. При проектировании затворов ТА используются ма­тематические модели, описывающие напряженно-деформированное состояние в области контакта золотника и седла, контактное взаимодействие шероховатых поверхностей, утечку среды через уплотнительный стык, изнашивание и раз­рушение.
3. Произведен сравнительный анализ математических моделей для опре­деления характеристик контакта шероховатых поверхностей. Указано, что ис­пользование моделей, в которых используется контактная характеристика «сближение поверхностей» приводит к погрешностям более 100% (в частности при определении объема зазоров) из-за несоответствия плотности распределе­ния неровностей в моделях и в реальных стыках. В этом случае необходимо применять модели, использующие для определения объема зазоров, уравнения сечений неровностей и деформированного полупространс тва.
4. Усовершенствована модель контактирования шероховатых поверхно­стей, позволяющая создать инженерную методику определения контактных ха­рактеристик при взаимодействии жесткой шероховатой поверхности со слои­стым упругим полупространством в зависимости от параметров шероховатости упругих свойств материалов и толщины покрытия.
5. Разработана методика определения напряженно-деформированного со­стояния в области контакта золотника и седла с учетом их трения, позволяющая определить ширину зоны контакта, распределение контактного давления на площадке контакта и эквивалентные напряжения в приповерхностном слое. Показано, что роль трения при определении ширины зоны контакта незначи­тельна. Основное влияние трение оказывает на величину эквивалентных на­пряжений.
6. Исследовано влияние на напряженно-деформированное состояние осо­бенностей контакта золотника и седла, связанные с изменяющимися начальны­ми условиями: шириной зоны контакта при начальном контакте вдоль полосы и угла нормали при начальном контакте вдоль линии. Показано, что влияние пер­вого фактора незначительно. Изменение угла нормали при значениях близких к углу трения может привести к увеличению эквивалентных напряжений на

15...25%.

1. Разработана методика расчета величины погонных контактных давле­ний, обеспечивающих заданные нормы герметичности (допускаемую утечку через затвор) при эксплуатации или при приемо-сдаточных испытаниях. При этом учтено распределение контактного давления по ширине зоны уплотнения. Показано, что применение модели реального газа при *р>30МПа* приводит к линейной зависимости утечки от величины давления, в отличии применения модели идеального газа, которая приводит к квадратичной зависимости.
2. Разработана методика оптимального проектирования затворов трубо­проводной арматуры позволяющая обеспечить равномерное зондирование про­странства исходных параметров с помощью ЛПт-последовательностей, соста­вить таблицу испытаний, исследовать зависимость критериев, выбрать наибо­лее информативную систему критериев, характеризующую затвор, определить множество конструкций, удовлетворяющих функциональным и критериальным ограничениям, определить паретовское множество и выбрать оптимальные конструктивные параметры затворов.
3. Проведенные вычислительные эксперименты показали высокую чувст­вительность предложенной методики, т.к. для разных сочетаний исходных па­раметров значения *q,* обеспечивающие заданную норму герметечности, изменя­лись в пределах одного порядка.
4. По результатам исследований реализованы: «Методика определения напряженно-деформированного состояния в зоне контакта золотник-седло», «Методика расчета герметизирующей способности высоконапряженных уплот­нительных соединений», программное обеспечение «ЗАТВОР 01» по опти­мальному проектированию затворов трубопроводной арматуры, которые вне­дрены в ОАО «ИркутскНИИхиммаш».

Указанные разработки внедрены также в учебный процесс по магистер­скому направлению 150400 - Технологические машины и оборудование при выполнении курсовой работы по дисциплине «Механика контактирования де­талей машин».

132

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров В.М., Ромалис Б.Л. Контактные задачи в машиностроении. - М.: Машиностроение, 1986.-176 с.
2. Алексеев В.М., Сутягин О.В. Влияние плотности пятен касания на характе­ристики упругого контакта шероховатых тел // Теоретические и прикладные вопросы контактного взаимодействия. - Калинин: КГУД987. - С. 16-28.
3. Ананьевский В.А. Исследование влияния микрорельефа прецезионных по­верхностей на работоспособность и надежность клапанных уплотнений. // Автореф. дис. ...канд.техн.наук. - Киев, 1976. - 27 с.
4. Арматура ядерных энергетических установок // Д.Ф. Гуревич, В.В. Ширяев, И.Х.Пайкин, И.М. Гельдштейн. - М.: Атомиздат, 1978. - 352 с.
5. Аронович В.Б. Арматура регулирующая и запорная. - М.: Машгиз, 1953. - 284 с.
6. Башта Т.М., Мендельсон Д.А., Огар П.М., Шифрин С.Н. Расчет утечек газа через затвор пневмоклапана / Эксплуатационная надежность планера и сис­тем воздушных судов. - Киев: КНИГА, 1981. - С. 85-93.
7. Белокобыльский С.В., Огар П.М., Дайнеко А.А., Тарасов В.А Трибомехани- ка высоконапряженных трибосопряжений деталей машин // Безопасность ре­гионов — основа устойчивого развития: М-лы науч.-практ. конф. В 3 т. Т. 2 Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2009.
8. Белокобыльский С.В., Огар П.М., Тарасов В.А. Контакт конусных затворов с начальным контактом по линии // Труды БрГУ-Т. 2. - Братск: БрГУ.-2007.- С.125- 129.
9. Белокобыльский С.В., Огар П.М., Тарасов В.А. Многокритериальный под­ход к проектированию затворов трубопроводной арматуры // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. - 2007, №3(15). — С. 6-10.

Ю.Белокобыльский С.В., Огар П.М., Тарасов В.А. Особенности контакта ко­нусных затворов с начальным касанием вдоль полосы // Труды БрГУ.Т.2,- Братск: БрГУ.-2007.С.121-125.

1. Белый В.А., Пинчук Л.С. Введение в материаловедение герметизирующих систем. - Минск.: Наука и техника, 1980. - 304 с.
2. Беспалов К.И., Огар П.М., Яськов В.В. Определение герметичности клапан­ных уплотнений с учетом образования зон износа // Вестник Львовского по­литехнического института. - Львов: Высшая школа, 1985. № 190. - С. 5-7.