

На правах рукописи

ГАФФАНОВ РУСТЕМ ФЛИТОВИЧ

УДК 621.88

621.78

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТА СОЕДИНЕНИЯ С НАТЯГОМ,  
СОБИРАЕМОГО ТЕРМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Специальность 05.02.02 «Машиноведение, системы приводов и детали  
машин»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ижевск 2008

Работа выполнена на кафедре «Мехатронные системы» ГОУ ВПО  
«Ижевский государственный технический университет»

научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Щенятский Алексей Валерьевич

(Ижевский государственный технический университет)

Официальные оппоненты:

доктор физико–математических наук , профессор

М. Ю. Альес ОАО «ИжМАШ»

кандидат технических наук, доцент

В. А. Дулотин ГОУ ВПО ИжГТУ

Ведущая организация:

ФГУП «Воткинский завод»

Защита состоится

17 декабря 2008 года в 14.00 на заседании диссертационного совета

Д 212.065.01 в Ижевском государственном техническом университете по  
адресу: 426069, УР, г.Ижевск, ул. Студенческая, 7

Просим Вас принять участие в заседании диссертационного совета и  
направить по указанному адресу отзывы на автореферат в двух экземплярах,  
заверенные гербовой печатью, на имя ученого секретаря диссертационного  
совета. E-mail: [root@istu.udm.ru](mailto:root@istu.udm.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ижевского  
государственного технического университета

Автореферат разослан «14» ноября 2008 года

ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, профессор \_\_\_\_\_ А. В. Щенятский

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ.** Прочность соединения с натягом, точность базирования деталей, их напряженно-деформированное состояние (НДС) во многом зависят от метода сборки. Одним из наиболее распространенных методов сборки, является термический метод. Формирование соединений с гарантированным натягом за счет разницы температур сопрягаемых деталей, обеспечивающей монтажный зазор требует отдельного внимания, так как при обеспечении необходимой точности относительного положения деталей приходится учитывать особенности протекания физических и механических процессов.

Позиционирование деталей соединения происходит при выравнивании температур и образовании натяга. На этом этапе возникает снижение точности базирования (ТБ), обусловленное геометрией посадочной поверхности, неравномерными температурными деформациями сопрягаемых деталей и изменяющимися условиями контактного взаимодействия.

Анализ исследований Г.Я. Андреева, Г.А. Бобровникова, Е.С. Гречищева, Б.Ф.Федорова, А.С. Зенкина, И.С.Гречищева, А.А. Ильяшенко, Л.Т. Балацкого и других авторов показал, что при расчете НДС, несущей способности (НС), точность базирования не учитывался последний этап процесса формирования соединения в условиях изменения температур сопрягаемых деталей, теплообмена между ними окружающей средой, неравномерного натяга, изменяющихся геометрии контактных поверхностей и условий неравномерного фрикционного взаимодействия.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ.** Повышение несущей способности и точности базирования соединений с натягом, собираемых термическим методом на основе математического моделирования термоконтактного взаимодействия.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- на основе проведенного анализа разработать пути повышения точности базирования и несущей способности соединений, собираемых термическим методом;
- разработать математическую модель процесса формирования соединения, учитывающую сложную геометрию и условия термоконтактного взаимодействия сопрягаемых деталей;
- разработать методику расчета НС и ТБ на основе метода конечных элементов (МКЭ) с уникальной системой граничных условий;
- установить зависимость ТБ от конструктивных особенностей, технологических приемов, условий контактного взаимодействия;
- провести экспериментальную проверку адекватности разработанной математической модели (ММ) с использованием созданной на ее основе программы, путем исследования процессов нагрева (охлаждения) деталей, формирования соединения и сопоставлением расчетных данных с данными натурных экспериментов.

**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.** Теоретические исследования проведены с использованием вариационных методов расчета, а также теорий малых упруго–пластических деформаций и тепломассопередач. Проведены экспериментальные исследования с применением специальных и стандартных измерительных приборов, методов математического планирования и статистической обработки результатов.

**ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ.** Разработанная математическая модель процесса формирования термических соединений, реализованная в виде программы, позволяет исследовать влияние конструктивной особенности и технологических приемов на точность базирования. Разработаны рекомендации по выбору параметров конструктивных особенностей (КО), их комбинации с технологическими приемами.

**РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ.** Результаты работы внедрены на предприятиях ЗАО «Технология» проектировании составной нефтяной задвижки, собираемой термическим методом, а также в ИжГТУ при

разработке методики обучения конечно-элементному моделированию физико-технологических процессов.

## **ДОСТОВЕРНОСТЬ И ОБОСНОВАННОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ.**

Достоверность обеспечивается использованием методов математической статистики при оценке погрешностей численных и натуральных экспериментов.

Обоснованность подтверждается:

- экспериментальной проверкой основных теоретических выводов, математической модели термомеханических процессов в соединении с натягом, собираемых ТМ;
- сходимостью полученных теоретических результатов с данными эксперимента;
- внедрением результатов исследования в производство.

Достоверность новизны технического решения подтверждается авторским свидетельством на полезную модель.

**АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ.** Основные научные положения и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных форумах: конференции II-го международного летнего лагеря в области Механики железнодорожного транспорта TRANSMEC 2005 (Катовице, Польша), "Механика механизмов и машин" 2007 (Варна, Болгария).

**ПУБЛИКАЦИИ.** По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, из них в журналах, рекомендованных ВАК - 2, получена одна полезная модель на изобретение.

## **НА ЗАЩИТУ ВЫНОСИТСЯ:**

1. Математическая модель процесса формирования термических соединений.
2. Закономерности влияния конструктивной особенности (КО) на ТБ, НДС и несущую способность соединения.
3. Влияние технологических приемов на точность базирования.

4. Результаты экспериментальной проверки, подтверждающие адекватность математической модели.
5. Практические рекомендации по назначению КО деталей соединения.

**НАУЧНАЯ НОВИЗНА.** Заключается в подходе к управлению несущей способностью, НДС и ТБ, реализованном в математической модели процесса формирования ТС на базе теории малых упруго–пластических деформаций и МКЭ, позволяющей учитывать режимы нагрева и охлаждения деталей соединения, взаимодействие с внешней средой и изменяющиеся условия контактного взаимодействия.

Впервые получены данные о влиянии режимов нагрева и охлаждения, параметров микрогеометрии, форм посадочной поверхности сопрягаемых деталей и натяга на ТБ деталей соединения, НДС и несущей способности.

Даны рекомендации по назначению КО, обеспечивающих ТБ.

**СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, списка литературы, приложения, заключения. Объем работы 90 стр, 30 иллюстраций, 15 таблиц, приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**ВО ВВЕДЕНИИ** даны определения объекта и предмета исследования, представлены краткая история развития, современное состояние и существующие недостатки объекта исследования, обоснована актуальность, сформулированы научная проблема, цель и задачи диссертационной работы, определены предполагаемые методы исследования, показаны новизна и практическая ценность работы, представлена краткая аннотация диссертационной работы по главам.

**В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ** проведен анализ методов расчета и прикладных исследований ТС: дана оценка методам сборки, систематизированы способы управления ТБ, исследованы возможности влияния различных конструктивных и технологических параметров на ТБ и НДС. Установлено,

что большой вклад в развитие теории и технологии ТС внесли научные школы проф. А.С. Зенкина, Г.Я. Андреева, Г.А. Бобровникова, М.К. Кварцова и А.И. Кварцова,

Согласно анализу последних работ в области расчетов ТС особое внимание уделялось повышению НС, обоснованию выбора натягов, режимов нагрева или охлаждения. В данных работах отмечено, что на последней стадии формирования соединения при сборке ТМ происходят осевые перемещения втулки и вала, вызванные температурными деформациями, которые обуславливают зазор  $\gamma$  между торцами вала и втулки (рис. 1).

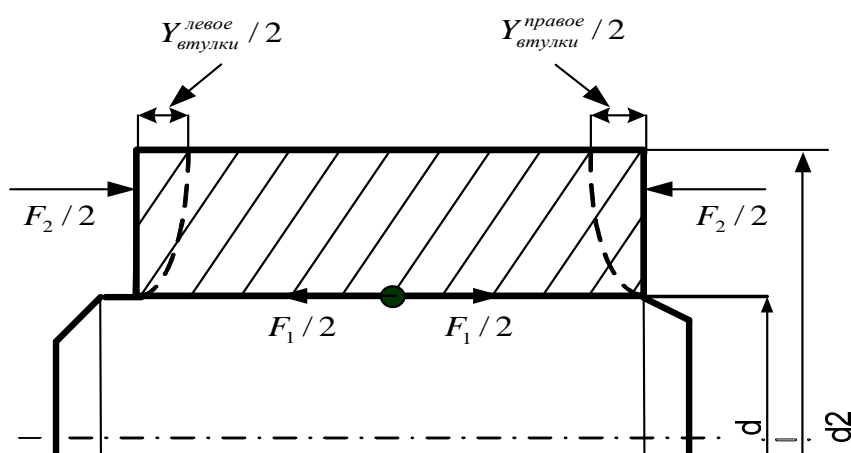


Рис. 1. Деформация охватываемой деталей в соединении с натягом

Деформации втулки отрицательно влияет на точность базирования деталей. Установлено что для обеспечения ТБ и НС применялись следующие методы:

- неравномерное охлаждение;
- применение жидких и твердых смазок в зоне контакта при сборке соединений.

В связи с существованием: погрешностей исходного позиционирования и форм сопрягаемых деталей, неравномерного первоначального температурного зазора и распределения температурных полей, не удастся добиться требуемой ТБ и расчета НС. Следовательно, развитие метода расчета ТС и повышенной ТБ является актуальным, так как процесс формирования соединения связан конструктивными и технологическими

факторами. Необходимо в предложенном подходе к расчету ТС обоснованно учитывать:

- распределение температурных полей и деформаций;
- профили контактных поверхностей;
- особенности контактного взаимодействия (теплообмен, неравномерный коэффициент трения).

**ВТОРАЯ ГЛАВА** посвящена развитию методики решения триединой задачи для определения температурных полей, НДС, НС и контактного взаимодействия в ТС. Анализ методов расчета показал, что НС в зоне упругости и упруго – пластичности определяется на основе известных зависимостей Ламе или численными методами (МКЭ, МГЭ). Зависимости Ламе – Годолина пригодны для деталей простой формы и могут применяться для получения приближенного решения поставленной задачи.

Применение численных методов позволяет учесть:

- неравномерное распределение температурных полей и деформаций;
- конструктивные особенности, отклонения геометрических форм и размеров деталей в расчетах НС;
- неравномерные контактное давление и условия контактного взаимодействия сопрягаемых деталей;
- деформирование сопрягаемых поверхностей;
- сопрягаемых деталей, получение конструктивной особенности.

Следовательно, для сложных контактных задач применение численных методов становится актуальным.

Решение задачи термоупругости соединения осуществлялось в два этапа. На первом этапе определяли нестационарные температурные поля в условиях контактного взаимодействия и конвективного теплообмена наружных поверхностей деталей с окружающей средой, с течением времени.

Нестационарное температурное поле при отсутствии внешних источников тепла описывается известным дифференциальным уравнением параболического типа:



$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (K_r \cdot r \frac{dT}{dr}) + \frac{d}{dz} (K_z \frac{dT}{dz}) - h(T - T_\infty) \frac{dT}{dr} = C_p \rho \frac{dT}{dt}, \quad (1)$$

где  $K_r, K_z$  – соответствуют коэффициентам теплопроводности,  $\rho$  – плотность материала,  $C_p$  – удельная теплоёмкость материала тела,  $T_\infty$  – внешняя температура,  $T$  – температура тела,  $h$  – коэффициент конвективного теплообмена.

Применение стандартной процедуры метода конечных элементов приводит к выражению (2) системы дифференциальных уравнений, типа:

$$[C_i] \frac{d\{\Phi_i\}}{dt} + [K_i]\{\Phi_i\} + \{F_i\} = 0, \quad (2)$$

где индекс  $i=1,2$ : 1 – для втулки, 2 – для вала,

соответствующие  $[K]$  – матрица теплопроводности,  $\{F\}$  – вектор нагрузки,

$[C]$  – глобальная матрица теплоемкости,  $\{T\}$  – вектор значений температуры

в узлах. Вклад каждого элемента в матрицы выражается формулами:

$$[k_i]^e = [B_i^{[e]}]^T [D_i^{(e)}] [B_i^{(e)}] 2\pi r A, \quad (3)$$

$$\{f_i^{(e)}\} = h(T - T_\infty) \{N\}^T 2\pi r, \quad (4)$$

$$[c_i]^e = \lambda [N_i]^T [N_i] 2\pi r A \quad (5)$$

где  $A$  – площадь элемента;  $r$  – радиус равный расстоянию от оси до узла элемента;  $\{N\}$  – функция формы элемента;  $[B]$  – матрица положения.

Матрица свойств будет определяться соотношением  $[D] = \begin{bmatrix} K_r & 0 \\ 0 & K_z \end{bmatrix}$ .

На втором этапе решается термо-упругая задача, температурные деформации, вызванные неравномерностью температурных полей, определяются соотношением:

$$\{\epsilon_o^e\} = \alpha \Delta T \{N^e\}^T. \quad (6)$$

Через известные матрицы положения  $[B]$  находятся перемещения узлов сетки конечных элементов. Соответствующие перемещения позволяют получить реальную геометрию при их суммировании, связь между и упругими напряжениями согласно закону Гука, определяется соотношением:

$$[\sigma] = [D](\varepsilon^e + \varepsilon_0^e). \quad (7)$$

Матрица свойств в этом случае будет определяться соотношением

$$[D_i] = \frac{E_i(1-\mu_i)}{(1+\mu_i)(1-2\mu_i)} \begin{vmatrix} 1 & e & e & 0 \\ e & 1 & e & 0 \\ e & e & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e' \end{vmatrix}, \quad (8)$$

где  $e = \frac{\mu_i}{1-\mu_i}$ ,  $e' = \frac{1-2\mu_i}{2(1-\mu_i)}$ .

Применив процедуру МКЭ получим для охватываемой и охватывающей детали две физико-математические модели, которым соответствуют системы алгебраических уравнений

$$[K_1]\{X_1\} = \{P_1\}, \quad (9)$$

$$[K_2]\{X_2\} = \{P_2\} \quad (10)$$

где узловые силы:  $\{P_i\} = \{P\}_q + \{P\}_b + \{P\}_\sigma$ ,  $\{P\}_q$  – обусловлены распределенными нагрузками;  $\{P\}_b$  – обусловлены дополнительной нагрузкой, прикладываемой в узлах граничного элемента;  $\{P\}_{\varepsilon_0}$  – обусловлены начальными деформациями;  $\{P\}_{\sigma_0}$  – обусловлены начальными напряжениями;  $X_1, X_2$  – перемещения деталей 1, 2.

Если между телами существует третье тело в виде вязкой или твердой смазки, то решение в численном виде получить достаточно сложно из-за микрогеометрии деталей и прослойки между ними на участке D (рис. 2). Согласно исследованиям, проведенным в ИжГТУ на кафедре «Мехатронные системы», время существования прослойки между деталями незначительно, но может оказывать влияние на процесс формирования соединения, однако эта проблема требует дополнительных исследований. Поэтому при исследовании влияния антифрикционных тел не учитывалось время их существования между деталями. Следовательно, условия для двух

сопрягаемых тел будут различными, в зависимости от особенности зоны контакта соединения (рис. 2).

Зону контакта двух или более сопрягаемых тел предложено разделить на следующие участки (таблица), изменяющиеся от условий контактного взаимодействия в соединении.

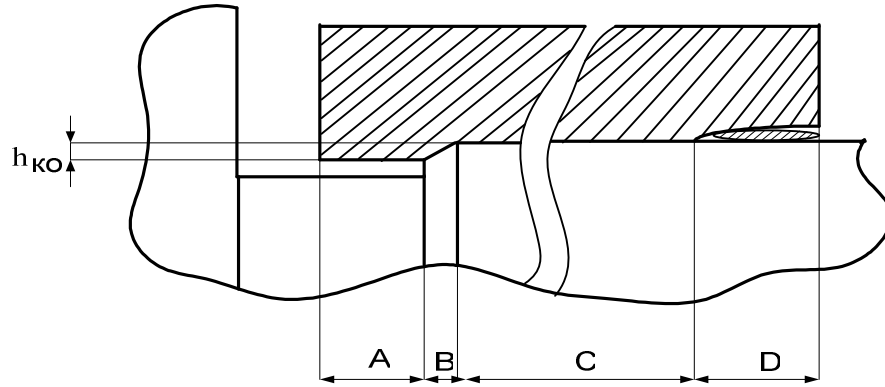


Рис. 2. Участки зоны контакта соединения

Математическая модель обеспечивает учет различных видов трения в зоне контакта. Условия трения, в контактных узлах конечноэлементной сетки, для каждой зоны контакте представляются уравнениями (11), (12).

*Условие контактного взаимодействия на участках соединения*

Участки контакта	Условия контактного взаимодействия	
	трение	тепло обмен
А нет контакта	$f_{mpA} = 0, N = 0, P_K = 0$	$K_r = 0$
В с переменным натягом	$f_{mpB} \neq 0, N \neq \text{const}, P_K \neq \text{const}$ $F_{oc} = 2\pi \int_0^b r \tau_{cp} dz$ -срез КО $F_{oc} = 2\pi \int_{r-h}^r \sigma_r \pi r (1 - h/r) dr$ - смятие КО $M_{kp} = \pi \int_0^{\delta_{kp}} \pi r (1 - h/r) P_{ki} 1_{KO} d\delta_{ko}$	$K_r \geq 0$

С основной	$f_{mpC} \neq 0, N \neq \text{const}, P_k \neq \text{const}$ $F_{oc} = 2\pi \int_0^r P_{ki} f_{mpC} l_C dr, M_{кр} = \pi \int_0^r P_{ki} f_{mpC} r_i dr$		$K_r \geq 0$
D нестационарное трение	$F_{oc} = 2\pi \int_0^r P_{ki} f_{mpD} l_D dr$	Сухое трение	$f_{mpD}(Pk, Rz)$ $K_r \geq 0$
	$M_{кр} = \pi \int_0^r P_{ki} f_{mpD} r_i dr$	жидкостн -ое	$f_{mpD}(Pk, Rz, \vartheta)$ $K_r \geq 0$

Примечания:  $Pk$  – контактное давление,  $Rz$  – шероховатость поверхности,  $\vartheta$  – вязкость смазки,  $h_{KO}$  – высота КО.

Для контактирующих тел граничные условия формируются в виде неравенства:

$$u_n^{i-1} + u_n^{i+1} - N_n^i \leq 0 \text{ – радиальные перемещения;} \quad (11)$$

$$(u_n^{i-1} + u_n^{i+1} - N_n^i)\sigma_n^i = 0 \text{ а – осевые напряжения,} \quad (12)$$

где  $u_n^{i-1}, u_n^{i+1}$  - нормальные компоненты перемещений точек подобластей,

$N_n^i$  - натяг в направлении положительных нормалей контактирующих участков, наклон которых совпадает с направлением общей нормали  $n_j$ ,

$\sigma_n^i$  - напряжения взаимодействия в направлении нормали  $n$ .

Условия взаимодействия с трением на контактной поверхности принимаются по закону Кулона. При этом нормальные и касательные напряжения подчинены соотношению.

$$|\tau_n^i| \leq f_{mp} \sigma_n^i \leq [\tau_{cp}], \quad (13)$$

где  $f_{mp}$  - коэффициент трения.

На основе ММ была создана программа, моделирующая нестационарный процесс формирования ТС, с учетом различных свойств материалов, геометрии деталей соединения, условий контактного взаимодействия и граничных условий, что позволяет максимально точно получать данные о ТБ, НС и НДС. Анализ расчета показал, что погрешность базирования будет включать в себя компоненты, (рис. 3):

$$Y_{\Sigma} = Y_{\varepsilon_{\text{штулки}}}^{\text{левое}} + Y_{\varepsilon_{\text{вала}}}^{\text{левое}} + Y_T + Y_{\text{трэн}} , \quad (14)$$

где:  $Y_{\varepsilon_{\text{штулки}}}^{\text{левое}}$  - перемещение, обусловленное деформацией охватываемой детали;

$Y_{\varepsilon_{\text{вала}}}^{\text{левое}}$  - перемещение, обусловленное деформацией вала детали;

$Y_T$  - перемещение, обусловленное температурной деформацией штулки и вала;

$Y_{\text{трэн}}$  - перемещение, обусловленное неравномерным коэффициентом трения;  $f_{\text{тр}}$  деталей соединения, который является функцией контактного давления  $P$  и шероховатости  $Rz$ ;  $f_{\text{тр}}(P, Rz)$  для сухого трения и вязкости  $\nu$  для жидкостного  $f_{\text{тр}}(Pk, Rz, \nu)$ ; причем  $Y_{\varepsilon_{\text{вала}}}^{\text{левое}}$  или  $Y_{\varepsilon_{\text{штулки}}}^{\text{левое}}$  не равны  $Y_{\varepsilon_{\text{штулки}}}^{\text{правое}}$  и  $Y_{\varepsilon_{\text{вала}}}^{\text{правое}}$  соответственно.

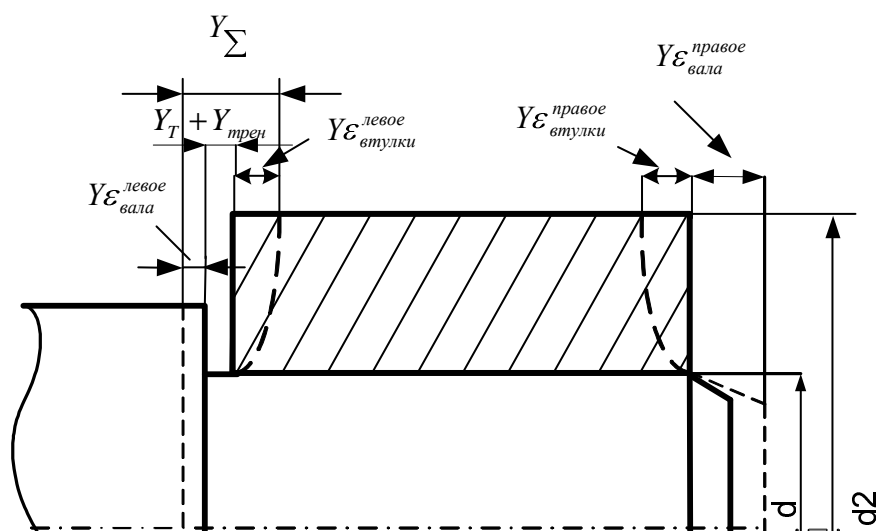


Рис. 3. Суммарные погрешности деталей, влияющие на точность базирования

**В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ** результаты теоретических исследований подтверждены натурными испытаниями. Проводилось две серии экспериментов, в первой серии определялось распределение температурных полей и деформаций, что подтвердило адекватность ММ. Во второй серии влияние введения конструктивной особенности на точность базирования. Численный эксперимент показал, что с помощью управляемого термовоздействия и КО на штулке можно повысить ТБ в ТС.

Для исследования температурных полей и деформаций была спроектирована установка (рис. 4), состоящая из адаптера, макетной платы с

датчиками измеряющими температуру в диапазоне от - 53 до 150 °С с точностью 0,01 °С и индикаторами часового типа, измеряющими перемещение с точность измерения 1мкм. По результатам измерений была проверена адекватность ММ, результаты натуральных и численных экспериментов представлены на рисунках 5 и 6. Незначительные расхождения в пределах 6-11% подтверждают адекватность ММ.

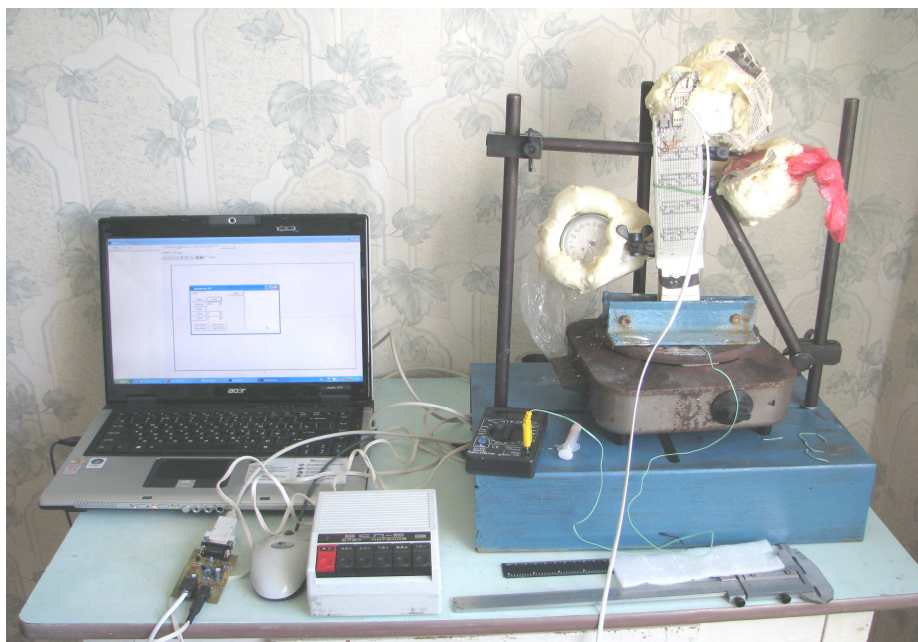


Рис. 4. Экспериментальная установка по замеру температурных полей и деформаций

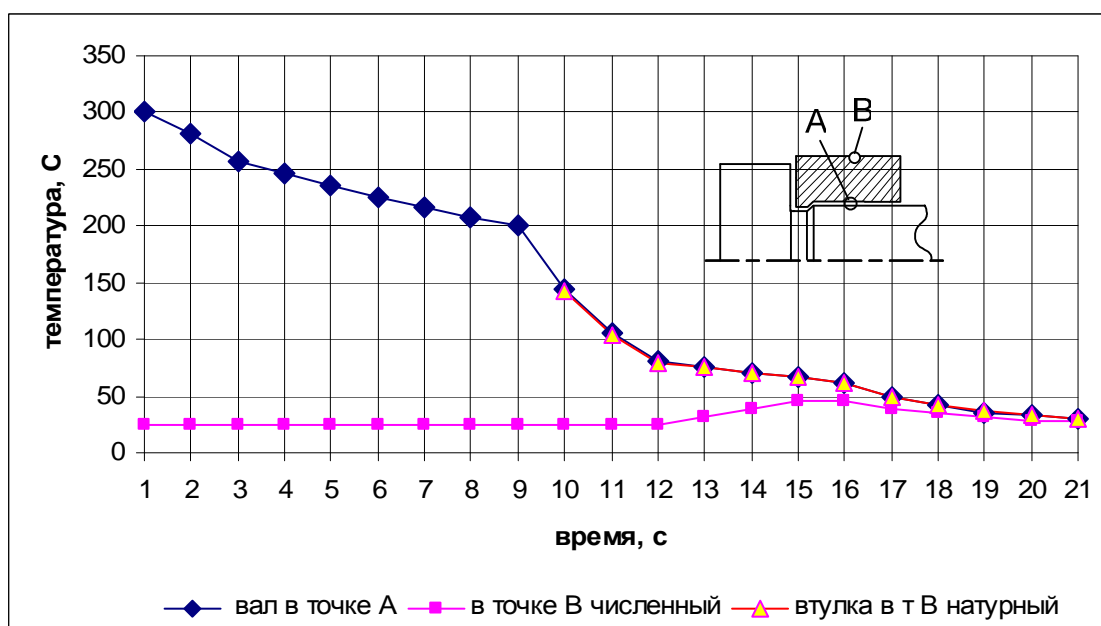


Рис. 5. Зависимость температуры от времени

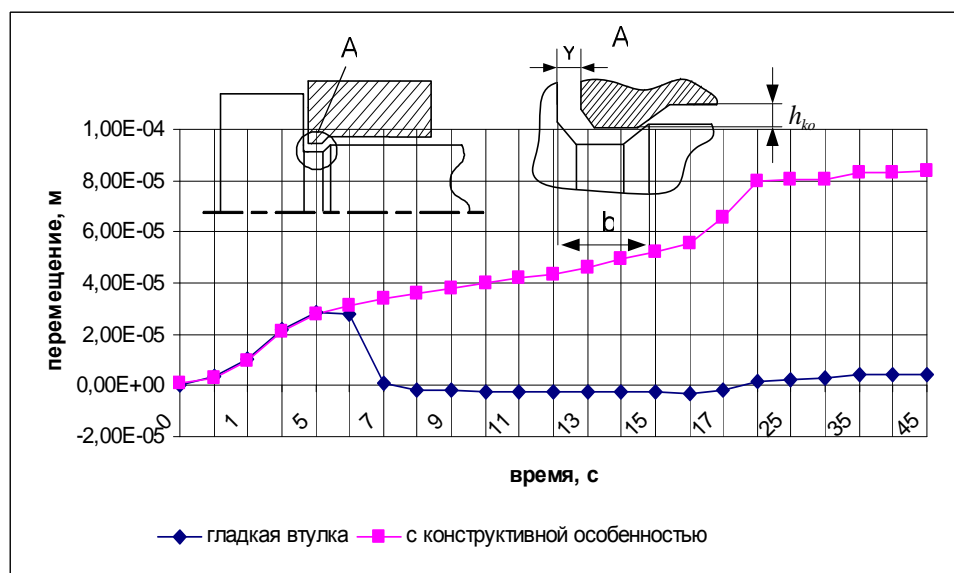


Рис. 6. Зависимость перемещений от времени

С помощью численного эксперимента определены зависимости перемещений и погрешности базирования вала, втулки от времени (рис. 6). МКЭ позволил получить НДС деталей соединения с КО (рис. 6). Анализ процесса формирования соединения показал, что контактное давление и напряжение в детали изменяется во время формирования соединения (рис. 7, 8, 9). Наибольшие градиенты  $P_k$ ,  $\sigma$  наблюдаются с 15 по 50 с (для данного соединения). В дальнейшем эти изменения незначительны, следовательно 95 % НДС достигаются в первую минуту формирования соединения при остывании на воздухе, охлаждающая жидкость позволят ускорить этот процесс.

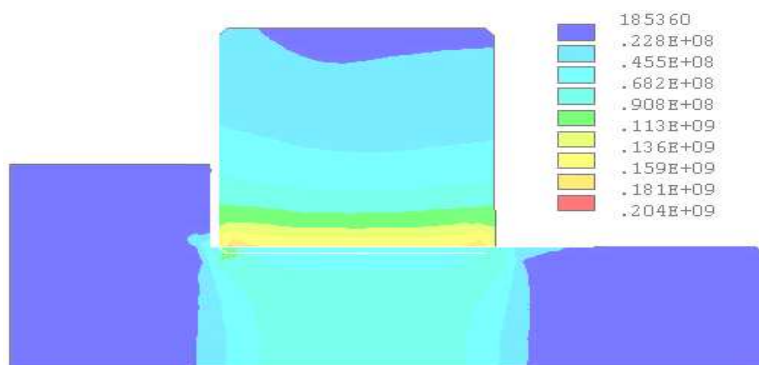


Рис. 7. Интенсивность напряжений в соединении

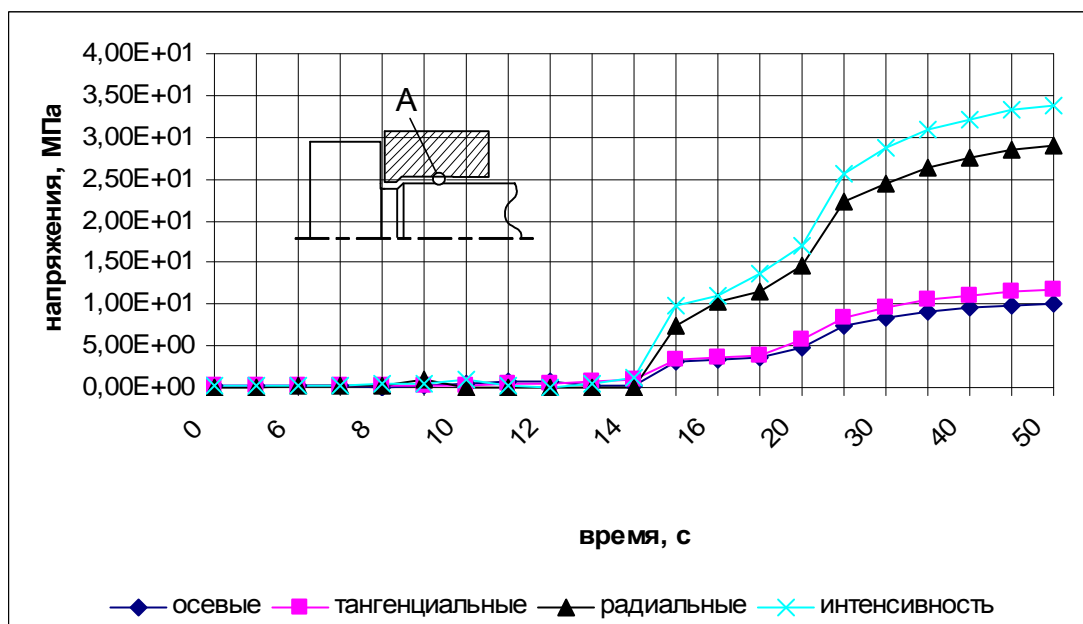


Рис. 8. Зависимость напряжений от времени

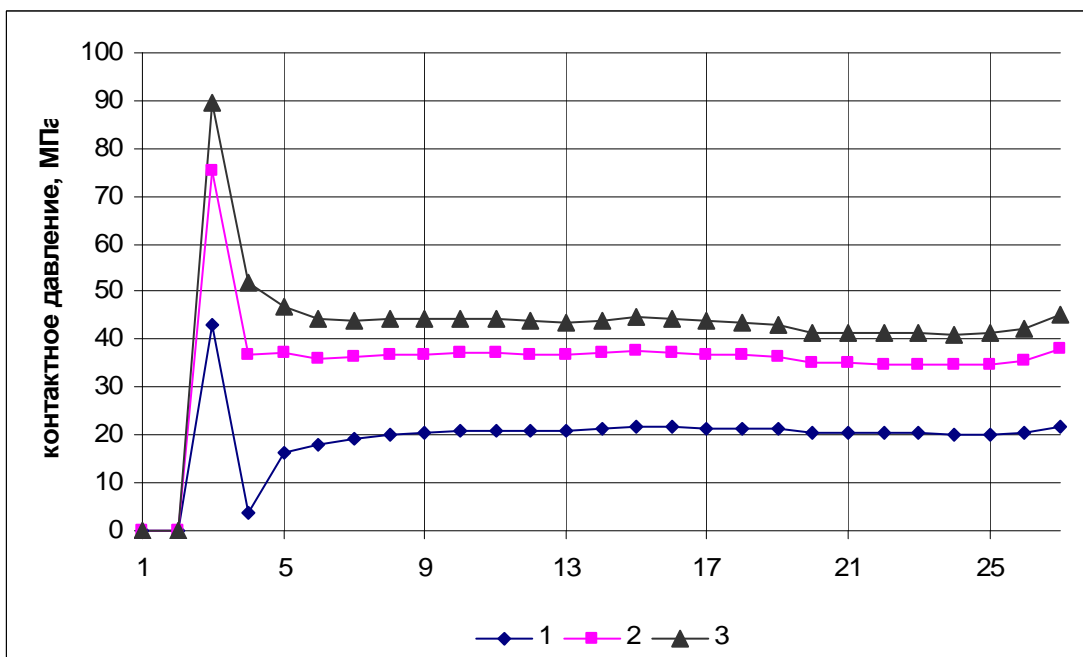


Рис. 9. Зависимость контактного давления от времени

1 – 20 с, 2 – 30 с, 3 – 50 с.

Анализ НС, определенный с помощью ММ и натуральных экспериментов показал, что расхождение составит от 8 до 12%, что объясняется применением в ММ коэффициента трения и его зависимости от давления из справочной литературы. Характер полученных зависимостей полностью совпадает. Анализ графиков (рис. 10, 11) показал, что высота уступа  $h_{ko}$  в 30 мкм и ширине канавки  $b/d = 0,0875$  позволяет повысить НС при осевом



воздействия с 23000 до 25500 Н. Испытание проводилось для разной ширины канавки  $b$ . Установлено, что соотношение  $b/d = 0,0875$  снижает  $M_{кр}$  на 0,6 % и увеличивает  $F_{oc}$  на 8 %.

При этих же параметрах ширины канавки и высоты уступа достигается максимальная ТБ детали (рис. 6), которая в 10-11 раз выше, чем у соединения без КО.

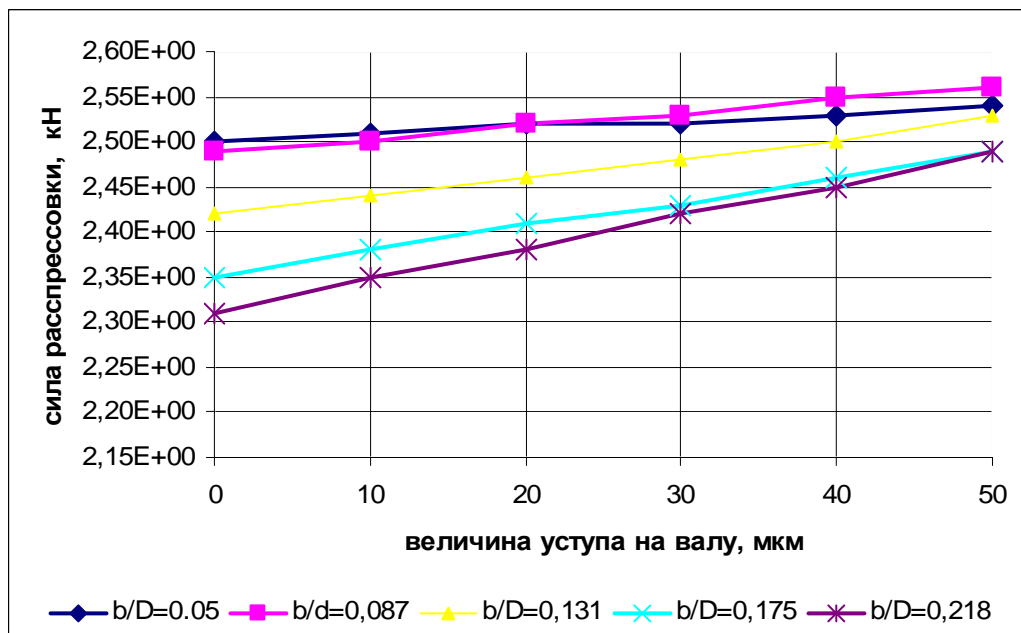


Рис. 10. Зависимость НС от высоты уступа

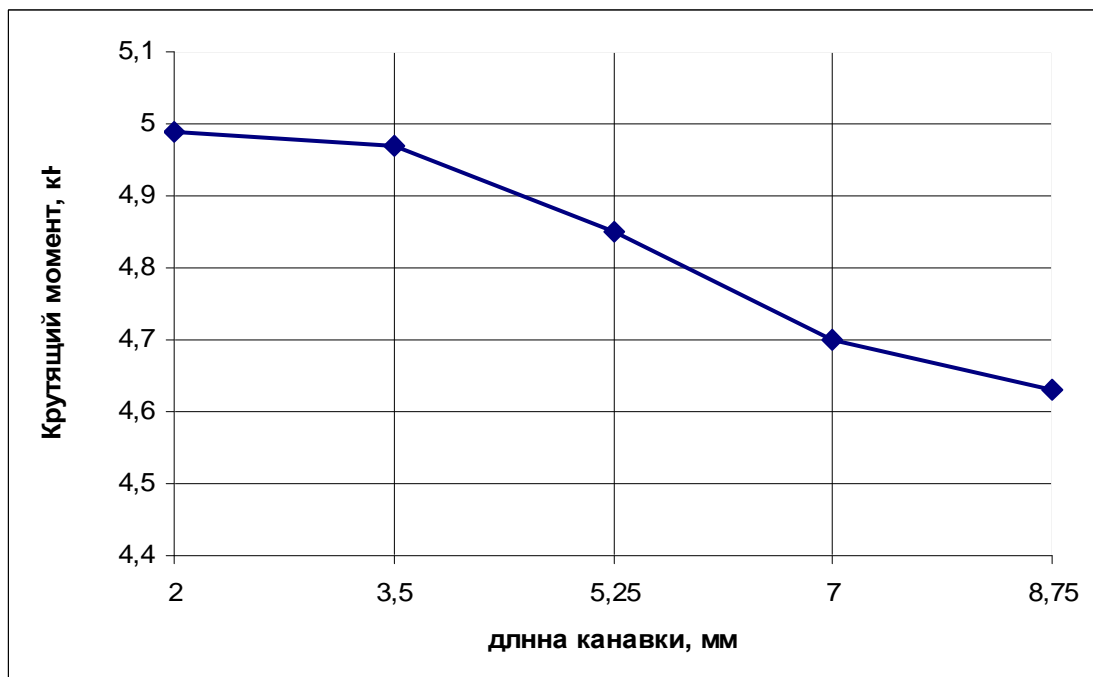


Рис. 11. Зависимость НС крутящего момента от длины канавки

По результатам вычислительных экспериментов, проведенных в соответствии с методикой планирования, получены зависимости перемещения втулки во время формирования ТС от длины и высоты КО, которые показали с помощью вычислительных и натуральных экспериментов, что выдвинутые во второй главе положения верны.

Результаты исследований позволили выявить и установить закономерности изменения ТБ, несущей способности и НДС от конструкторских особенностей и технологических приемов, разработать рекомендации по их расчету и выбору.

**В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ** изучено практическое применение результатов теоретических и экспериментальных исследований.

**Апробация полученных результатов в промышленных условиях**, их внедрение в применяемую конструкцию, технологический процесс сборки и эксплуатационное обслуживание узла. Объектом внедрения стал сборный полукорпус составной нефтяной задвижки шиберного типа, собираемого ТМ выпускаемый предприятием ЗАО «Технология» (рис. 12).

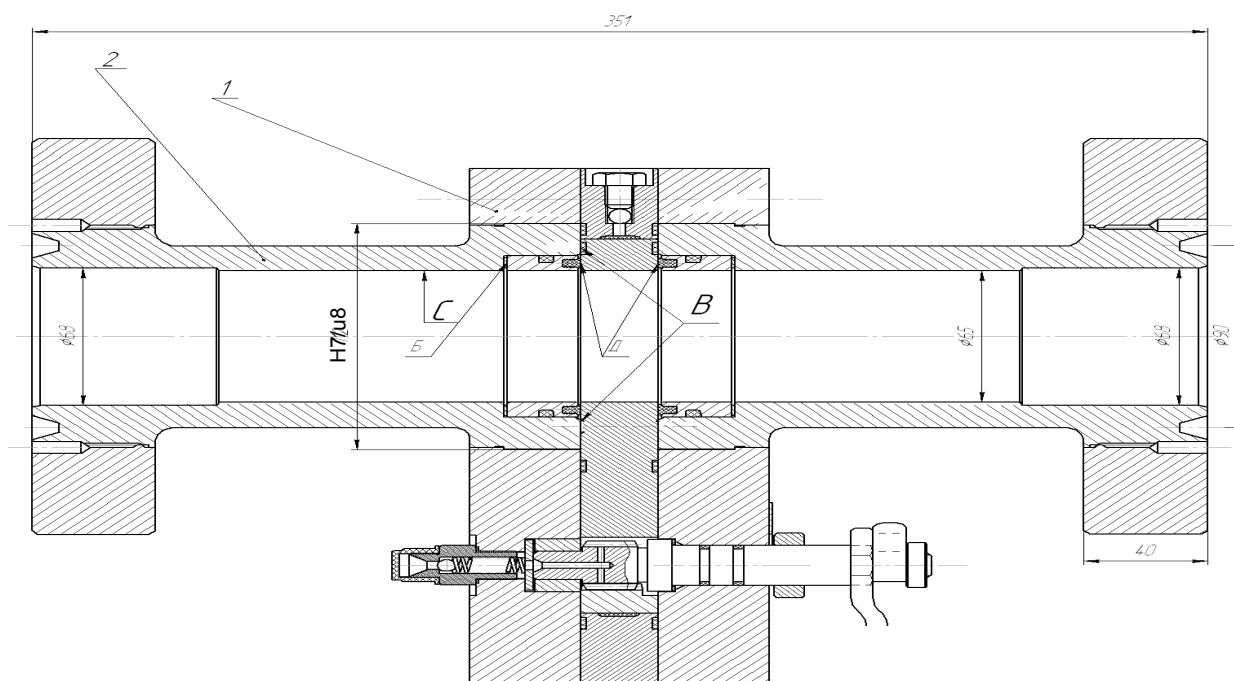


Рис. 12. Конструкция задвижки

Данным предприятием была поставленной задача – обеспечить ТБ и определить работоспособность соединения под номинальным давлением 26 МПа и максимальным 32 МПа. Расчет позволил определить

работоспособность изделия при толщине фланца полукорпуса 42 мм и физико-механических свойствах, соответствующих закаленной стали 40Х. Введение КО позволило ликвидировать зазор между втулкой и фланцем полукорпуса. В процессе серийного производства изделий и его испытании было получено подтверждение о соответствии результатов расчета НС и ТБ фактическим данным.

**ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.** Проведенные теоретические и экспериментальные исследования ТС показали эффективность предлагаемого подхода к оценке влияния на ТБ и НС конструктивных особенностей и технологических приемов. Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. В результате анализа подготовки производства и сборки ТС показана актуальность разработки путей повышения ТБ и НС путем научно обоснованного назначения: режимов термического воздействия, конструктивных особенностей контактных поверхностей сопрягаемых деталей технологических приемов.
2. В результате теоретического исследования впервые для ТС с натягом разработана ММ, способная учитывать первоначальный температурный зазор в деталях, управляемое температурное воздействие, наличие конструктивной особенности, переменные условия контактного взаимодействия.
3. Разработана методика расчета несущей способности и точности базирования ТС на основе метода конечных элементов, учитывающая особенности термоконтанного взаимодействия и процесса формирования.
4. Установлено, что конструктивные особенности в виде канавки на валу и выступа на охватывающей детали более эффективно влияют на точность базирования, чем такие технологические приемы, как дискретно изменяющийся коэффициент трения и управляемое температурное воздействие. При ширине канавки  $b/D=0,131$  ТБ возрастает в 20 раз, НС в осевом направлении увеличивается на 8 %, при передаче крутящего момента уменьшается на 0,6 %.
5. На основе анализа отклонений расчетных данных от результатов натурального эксперимента был сделан вывод о эффективности применения конструктивной особенности для повышения ТБ и адекватности ММ.

6. Результаты диссертационной работы внедрены при разработке конструкции и технологии сборки составного шибера на ООО «ПКФ» «Техновек» и разработке конструкции и технологии сборки составной нефтяной задвижки ЗАО «Технология».

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих статьях:

1. *Гаффанов Р. Ф.* Применение метода конечных элементов, для повышения нагрузочной способности соединений, собираемых термическим методом. / Щенятский А. В. // Высокие технологии – 2004 Вып. 3. Ижевск : Изд-во ИжГТУ, - 2004. с 162-167.
2. *Гаффанов Р. Ф.* Оценка возможности управления процессом формирования термических соединений. / Щенятский А. В. // Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки и сборки в машиностроении приборостроении: материалы 4-го международного научно-технического семинара 24 – 26 февраля 2004 г., г. Свалява. : АТМ Украины, 2004.
3. *Gaffanov R. F.* Mathematical simulation of thermal assembling of interference joints / Sheniatsky A. V. // Akademicka Dubnica : 2004 II. Del. pp. 509-513.
4. *Gaffanov R. F.* Calculation and determination the efficiency of joint fit composite oil – gate valve using finite element method./ M. V. Abashev // "Механика на машините и механизмите" брой 75 Варна : дом на учения. II del година XVI, книга 3, 2008, pp 77-78.
5. *Гаффанов Р. Ф.* Управление процессом формирования соединения с натягом, собираемого термическим методом / Щенятский А. В. // Вестник ИжГТУ, Ижевск : 2008 №39 - вып .3, с 6-9.
6. *Гаффанов Р.Ф.* Оценка работоспособности соединения составной нефтяной задвижки методом конечных элементов // Интеллектуальные системы, Ижевск - 2(12) 2008 Изд-во ИжГТУ. ISSN 1813-7911 с 10-12.
7. Патент на полезную модель №69183 Нефтяная задвижка шибера типа. Патентообладатели: Гаффанов Рустем Флитович, Костюченко Валерий Владиславович.