

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра механики материалов, конструкций и машин

Р.Н. Узяков, Е.В. Пояркова

# **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ В РЕЗЬБОВОМ СОЕДИНЕНИИ**

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 24.03.01 Ракетные комплексы и космонавтика и 24.03.04 Авиастроение

Оренбург  
2018

УДК 620.10  
ББК 30.121  
У34

Рецензент – доцент, доктор технических наук Ю.А. Чирков

- Узяков, Р.Н.**  
У34 Определение коэффициентов трения в резьбовом соединении: методические указания / Р.Н. Узяков, Е.В. Пояркова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2018. – 18 с.

В методических указаниях представлено описание лабораторного практикума по теме «Расчет болтовых соединений».

Настоящие методические указания предназначены обучающимся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 24.03.01 Ракетные комплексы и космонавтика и 24.03.04 Авиастроение, осваивающим дисциплины «Соппротивление материалов», «Дефекты и повреждения деталей и конструкций летательных аппаратов», «Детали машин».

**Методические указания подготовлены в рамках реализации проектов по совершенствованию содержания и технологий целевого обучения студентов в интересах организаций оборонно-промышленного комплекса («Новые кадры ОПК–2017»).**

УДК 620.10  
ББК 30.121

© Узяков Р.Н.,  
Пояркова Е.В., 2018  
© ОГУ, 2018

## Содержание

Введение .....	4
1 Лабораторно-практическая работа «Определение коэффициентов трения в резьбовом соединении» .....	5
2 Краткие теоретические сведения .....	5
3 Изучение конструкции и возможностей лабораторного оборудования .....	8
3.1 Машина ДМ-30А .....	8
3.2 Приспособление ДМ-27А .....	11
4 Проведение испытаний .....	13
5 Контрольные вопросы .....	16
Список рекомендованных источников .....	17

## Введение

Дисциплины, связанные с изучением принципов расчета и конструирования различных деталей машин и оборудования, представляют собой основу общетехнической подготовки обучающихся направлений подготовки 24.03.01 Ракетные комплексы и космонавтика и 24.03.04 Авиастроение.

«Соппротивление материалов» и «Детали машин» – это дисциплины общетехнической подготовки обучающихся по теории, расчету и конструированию составных частей летательных аппаратов различного назначения (разнообразных деталей и узлов). Основными задачами изучения этих предметов являются обобщение инженерного опыта создания авиационных конструкций, разработка научных основ расчета и проектирования надежных элементов и узлов конструкции.

При изучении вышеперечисленных дисциплин обучающиеся расширяют свои знания в производственно-конструкторской деятельности в области проектирования деталей и узлов авиационного и космического применения. Материалы дисциплин содержат сведения о конструкциях, типаже критериев работоспособности деталей машин, сборочных единиц и агрегатов; об основе теории совместной работы (сопряжении) деталей машин и методов их расчета.

Настоящие указания к лабораторно-практической работе по теме «Определение коэффициентов трения в резьбовом соединении» представляют собой часть методического обеспечения интерактивных занятий, входящих в цикл лабораторного практикума, способствующего углублению и закреплению теоретических знаний студентов и развитию их навыков экспериментирования (в том числе получения эмпирических зависимостей с целью прогнозирования возможного появления дефектов и повреждений деталей и конструкций летательных аппаратов).

# 1 Лабораторно-практическая работа «Определение коэффициентов трения в резьбовом соединении»

**Цель работы** – определить значения коэффициентов трения в резьбе и на торце гайки и проверить достоверность теоретической зависимости между силой затяжки и моментом завинчивания.

## Оснащение работы:

- машина ДМ-30А;
- приспособление ДМ-27А;
- резьбовое соединение – болт М16-8q;
- штангенциркуль ШЦ-125.

## 2 Краткие теоретические сведения

При сборке резьбовых соединений с необходимой силой  $F_{зат}$  затрачивается работа на преодоление моментов сил трения в резьбе  $T_p$  и на торце гайки  $T_T$  (рисунок 1).

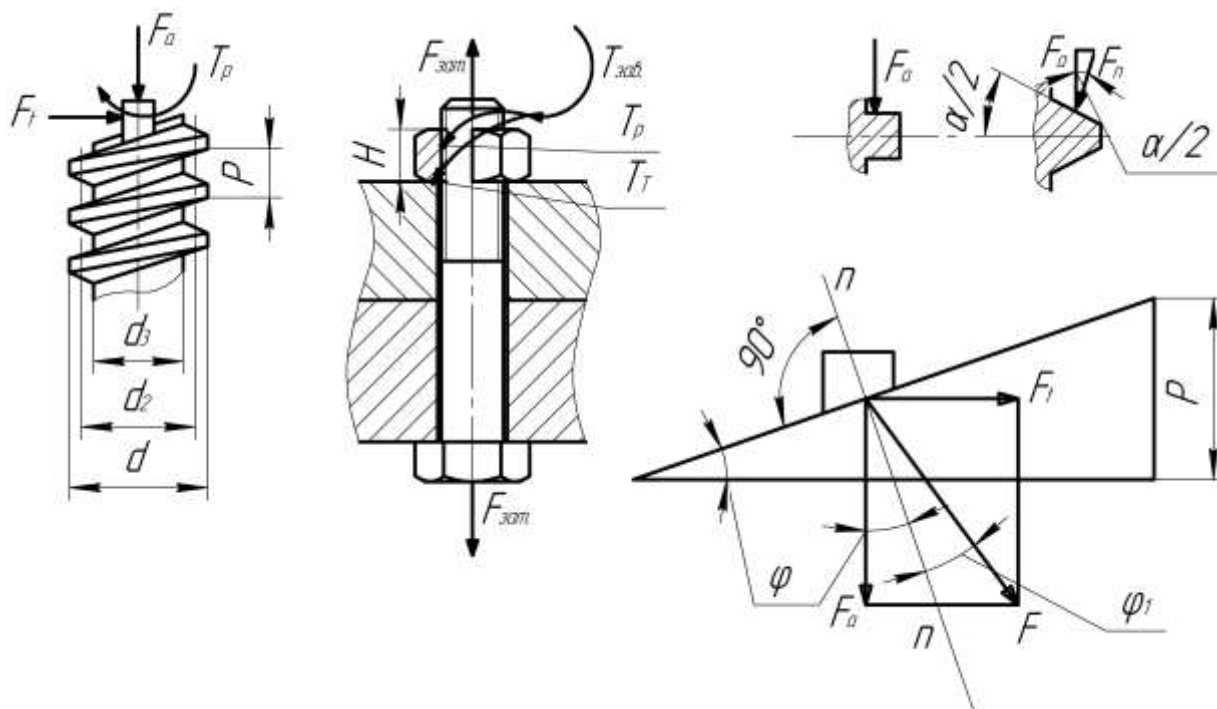


Рисунок 1 – Схема распределения моментов и сил в затянутом болте

Момент завинчивания, приложенный к гайке или головке винта:

$$T_{зав} = T_p + T_T.$$

Для определения момента  $T_p$  в теории винтовой пары устанавливают зависимость между осевой  $F_a$  (сила затяжки) и окружной  $F_t$  силами в резьбе. Окружная сила трения в резьбе с треугольным профилем:

$$F_t = F_a \cdot f / \cos \alpha / 2 = F_a \cdot f_1, \quad (1)$$

где  $f$  и  $f_1$  – действительный и приведенный коэффициенты трения в резьбе,  $f_1 = f / \cos \alpha / 2$ ;

$\alpha$  – угол профиля резьбы.

Для метрических резьб  $\alpha = 60^\circ$  и тогда:

$$f_1 \approx 1,15 \cdot f. \quad (2)$$

Соотношение коэффициентов трения  $f$  и  $f_1$  соответствует и соотношению между углами трения:

$$\varphi_1 = \varphi / \cos \alpha / 2,$$

где  $\varphi_1$  – приведенный угол трения для наклонного профиля.

Под влиянием сил трения полная реакция  $F$  отклоняется от нормали  $n-n$  на угол трения  $\varphi_1$  (рисунок 1). В результате разложения силы  $F$  получают:

$$F_t = F_a \cdot \operatorname{tg}(\psi + \varphi_1), \quad (3)$$

где  $\psi$  – угол подъема винтовой линии.

Для метрической резьбы с крупным шагом  $\psi = 2,479^0$ .

Момент трения в резьбе:

$$T_p = 0,5F_t \cdot d_2 = 0,5F_a \cdot d_2 \cdot tq(\psi + \varphi_1), \quad (4)$$

где  $d_2$  – средний диаметр резьбы (для М16 –  $d_2 = 14,701$  мм).

Отсюда:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \arctg(2T_p / F_a \cdot d_2) - \psi, \\ f_1 &= tq \varphi_1. \end{aligned} \quad (5)$$

Момент трения  $T_T$  на опорной поверхности гайки или головки винта при завинчивании:

$$T_T = 0,5 \cdot F_a \cdot f_T \cdot d_{cp}, \quad (6)$$

где  $d_{cp}$  – средний диаметр опорной поверхности гайки.

Для резьбового соединения М16 –  $d_{cp} = 20$  мм.

Отсюда коэффициент трения на торце гайки:

$$f_T = 2T_T / (F_a \cdot d_{cp}) \quad (7)$$

Расчет болта на прочность проводят с учетом совместного действия силы затяжки  $F_a$ , создающей нормальные напряжения  $\sigma_p = F_a / \frac{\pi d_p^2}{4}$ , и момента трения в резьбе  $T_p$ , вызывающего касательные напряжения:  $\tau = T_p / W_p$ .

В расчетах учитывают, что расчетный диаметр

$$d_p = 0,5 \cdot (d_2 + d_3),$$

где  $d_3$  – внутренний диаметр резьбы болта (для М16 –  $d_3 = 13,402$  мм).

Расчетный момент сопротивления кручению определяется по формуле:

$$W_p = \pi d_p^3 / 16 .$$

Согласно энергетической гипотезе прочности эквивалентные напряжения:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\left(\frac{4F_a}{\pi d_p^2}\right)^2 + 3\left(\frac{T_p}{W_p}\right)^2} \text{ или } \sigma_{\text{экв}} = \sigma_p \sqrt{1 + 12\left[\frac{d_2}{d_p} \operatorname{tg}(\psi + \varphi_1)\right]^2} . \quad (8)$$

Для метрических резьб в расчетах используют следующие значения:

– угол подъема винтовой линии  $\psi = 2,479^\circ$ ;

– соотношение диаметров  $\frac{d_2}{d_1} = 1,12$ .

Приняв  $f_1 = 0,15$ , что соответствует  $\varphi_1 = 8^0 40'$ , после подстановки в (8), получим  $\sigma_{\text{экв}} \approx 1,3\sigma_p$ .

Последнее выражение позволяет заменить расчет болта на сложное сопротивление расчетом на растяжение при пониженном в 1,3 раза допустимом напряжении.

### 3 Изучение конструкции и возможностей лабораторного оборудования

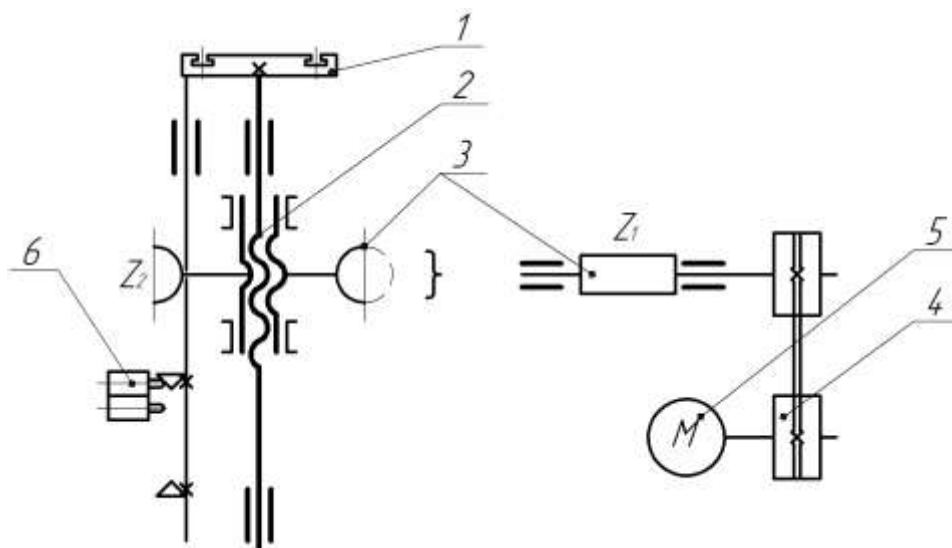
#### 3.1 Машина ДМ-30А

Машина ДМ-30А в сочетании с различными приспособлениями (в том числе с используемым в настоящей работе приспособлением ДМ-27А) предназначена для создания растягивающих и сжимающих нагрузок до 25 кН при исследовании соединений.



Принцип действия машины ДМ-30А основан на поднятии либо опускании стола относительно неподвижной траверсы. Рабочий ход стола машины 90 мм, скорость перемещения 0,65 мм/с.

Кинематическая схема машины представлена на рисунке 2.



1 – стол; 2 – винтовая пара; 3 – червячная передача; 4 – клиноременная передача; 5 – электродвигатель; 6 – конечные выключатели.

Рисунок 2 – Кинематическая схема установки ДМ-30А

В станине 1 (рисунок 3) на салазках 2 установлен электродвигатель 3, который через клиновой ремень 4 передает движение шкиву 5, установленному на червяке. Натяжение приводного ремня осуществляется перемещением салазок винтом 6. Винты 7 служат для стопорения положения двигателя. Червячный редуктор 8 установлен в верхней части станины 1. Крышки редуктора 9, 10 служат направляющими шпинделя 11 стола 12.

Стол прямоугольной формы выполнен с пазами 13 и центрирующим отверстием 14 для установки и крепления приспособления ДМ-27А, служащего для изучения соединений.

Для обеспечения установки кулачков 15, 16 служит штанга 17, жестко соединенная со столом. Кулачки 15, 16 воздействуют на конечные выключатели 18.

В редукторе предусмотрен люк 19, через который можно следить за необходимым уровнем смазки, меняющимся с перемещением стола. В верхней части машины на траверсе 20 расположен пульт управления 21 и силовая панель 22. Включение происходит через автоматический выключатель 23, о наличии напряжения в электросхеме сигнализирует лампа 24.

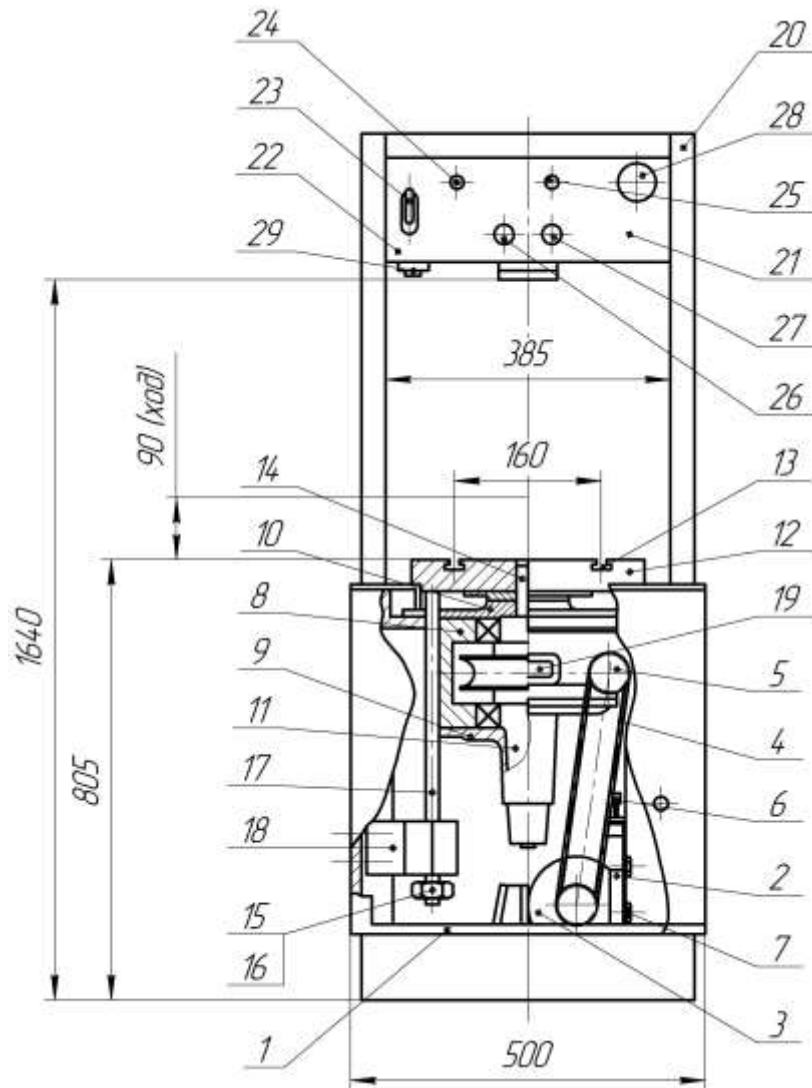


Рисунок 3 – Установка ДМ – 30А

Выбор режима (автоматический или наладочный) осуществляется переключателем 25, имеющим три положения: перемещение стола вверх, вниз и режим наладки. Автоматический режим может осуществляться только при установленном на машине приспособлении. Пуск электродвигателя в обоих режимах осуществляется:

- для хода стола вниз – кнопкой 26;
- для хода стола вверх – кнопкой 27;
- для останова машины – кнопкой 28.

На кожухе внизу расположен предохранитель (тепловая защита) двигателя – 29.

### 3.2 Приспособление ДМ-27А

Приспособление ДМ-27А предназначено для изучения трения в резьбовом соединении; содержит болт М 16-8q с гайкой (угол поворота которой находится как  $3,14 - 0,1$  рад).

Для предохранения болта от вращения имеется пружина. Наибольшая осевая сила, создаваемая пружиной,  $14,7 - 1,5$  кН.

Принцип действия приспособления основан на завинчивании гайки под действием вращающего момента, созданного парой «рейка – шестерня».

Приспособление (рисунок 4) состоит из корпуса 1, в котором на подшипниках 2 установлена шестерня 3, приводящаяся в движение зубчатой рейкой 4. Через шестерню проходит торсион 5, который одним концом 6 связан с шестерней, а другим 7 со втулкой 8.

Исследуемый болт 9 с гайкой 10 действуют на втулку 11, жестко соединенную с пружиной 12, которая одним концом 13 предохраняет болт от вращения, а другим через втулку связана со ступицей 14, имеющей рукоятку 15, служащую для вращения ступицы, при необходимости, на угол до  $90^\circ$ . Штифт 16 ограничивает поворот ступицы. Позиция ступицы фиксируется рукояткой 17, воздействующей на зажимное устройство 18. Для исключения влияния трения опорной торцевой площадки гайки в приспособлении предусмотрен упорный подшипник 19, на который опирается подгаечная втулка 20. При определении полного момента сопротивления подгаечная втулка изымается, и на ее место вставляется опорная втулка 21, которая исключает работу упорного подшипника. На втулку 11 нагрузителя по наружной поверхности наклеены тензорезисторы 22, а на торсион тензорезисторы 23.

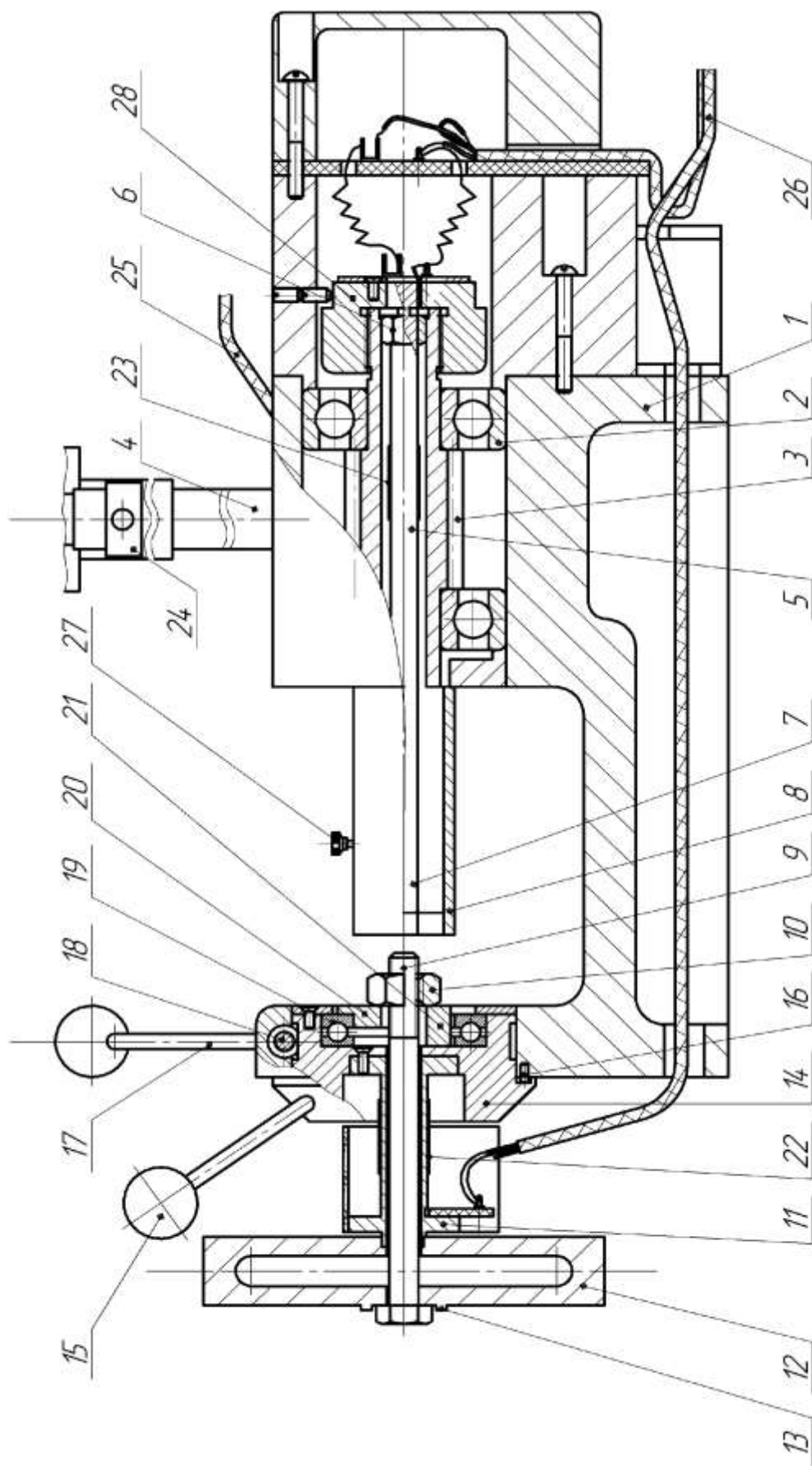


Рисунок 4 – Приспособление ДМ – 27А

Корпус приспособления фиксируется болтами на столе машины ДМ-30А. Зубчатая рейка приспособления крепится к верхнему опорному фланцу машины 24. Жгут 25 подключается к машине ДМ-30А, а жгут 26 – к тензоусилителю.

Исследуемый болт 9 вставляется в паз пружины 12 головкой, вручную навинчивается гайка 10 до упора. Рукояткой 17 растормаживают ступицу 14, а рукояткой 15 вращают ступицу настолько, чтобы втулка 8 находила на шестигранную гайку 10; затем втулку фиксируют винтом 27.

При движении вниз стол машины ДМ-30А взаимодействует с рейкой 4, при этом вращается шестерня 3 и через торсион 5 и втулку 8 заворачивает гайку 10, тем самым нагружает болт 9. Поворот гайки 10 происходит за половину оборота шестерни 3.

Это движение контролируется конечными выключателями, на которые воздействуют упоры, перемещающиеся под действием гайки 28, жестко связанной с шестерней 3.

Возвращение гайки 10 в исходное положение осуществляется по команде конечных выключателей автоматически.

Измерительный блок приспособления ДМ-27А обеспечивает измерение сил, возникающих в нагрузателе и торсионе при их нагружении, усиление полученных сигналов рассогласования и преобразование их в линейное перемещение двух взаимосвязанных координат с последующей регистрацией измеренных величин на диаграммной бумаге. Регистрирующее устройство вычерчивает на диаграмме зависимость сил, возникающих в нагрузателе, от сил, возникающих в торсионе при наличии трения в резьбе.

#### **4 Проведение испытаний**

Перед монтажом болта в приспособление ДМ-27А измеряют наружный диаметр и шаг резьбы.

Устанавливают в приспособление, требуемую для гайки болта опорную втулку, в зависимости от вида определяемого момента – с учетом трения на торце (рисунок 5, б) или без такового (рисунок 5, а).

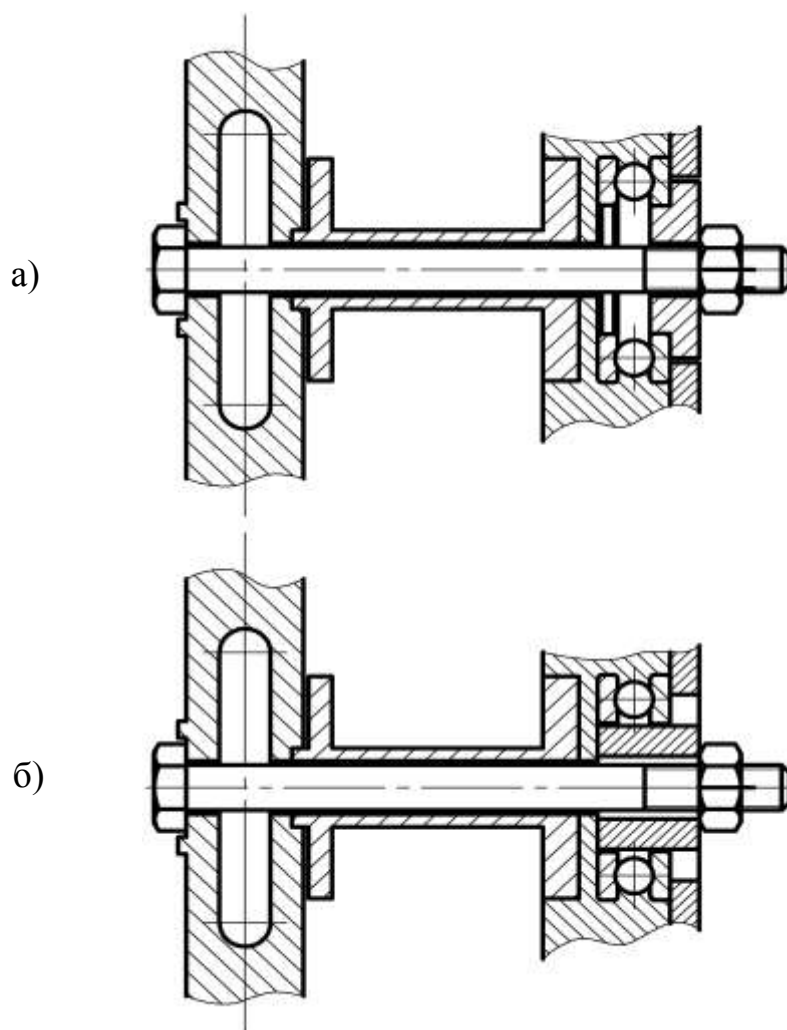


Рисунок 5 – Схемы сборки болтового соединения

Вставляют болт 9 (рисунок 4) в приспособление и вручную, с небольшим усилием, навинчивают гайку 10.

На гайку 10 надвигают втулку 8. Если контуры шестигранников не совпадают, то рукояткой 17 освобождают стопор 18.

Рукояткой 15 поворачивают ступицу 14 до совпадения контуров втулки и гайки.

Рукояткой 17 стопорят позицию ступицы. На тензометрической станции и графопостроителе приводят в соответствие органы управления для данной операции.

Включают машину ДМ-30А. В автоматическом режиме после завершения цикла нагружения машина остановится в исходном положении. Регистрирующее устройство зафиксирует график зависимости осевой силы (координата  $y$ ), возникающей в нагружателе, от вращающего момента на торсионе  $T_{зав}$  (координата  $x$ ).

Для получения зависимости осевой силы  $F_a$  от момента трения на опорной поверхности гайки  $T_T$  заменяют подгаечную втулку на опорную втулку и повторяют эксперимент с записью графика  $F_a = f(T_T)$ .

Из графиков определяют значение момента завинчивания  $T_{зав}$  и значение момента трения на торце гайки  $T_T$  для четырех значений осевой силы  $F_a$ : соответствующих 0,25; 0,5; 0,75 и 1,0 максимального значения  $F_a$ , полученного в эксперименте.

Используя теоретические зависимости, рассчитывают величины коэффициентов трения  $f_1, f, f_T$ , а также величины нормальных  $\sigma_p$  и эквивалентных  $\sigma_{эке}$  напряжений для указанных значений  $F_a$ . Результаты заносят в таблицу 1.

Таблица 1

$F_a / F_{a\max}$ %	$T_{зав} = T_p$						$T_{зав} = T_p + T_T$		
	$F_a, \text{Н}$	$T_{зав}, \text{Н}\cdot\text{мм}$	$f_1$	$f$	$\sigma_p, \text{МПа}$	$\sigma_{эке}, \text{МПа}$	$T_{зав}, \text{Н}\cdot\text{мм}$	$T_T, \text{Н}\cdot\text{мм}$	$f_T$
25									
50									
75									
100									

В отчете приводят:

- название и цель работы;
- эскиз одновинтового резьбового соединения;
- краткое описание методики исследований и основные расчетные зависимости;

- таблицу и графики;
- анализ полученных результатов и выводы.

## 5 Контрольные вопросы

1. Назовите основные параметры резьбового соединения.
2. Почему при завинчивании гайки в стержне болта возникают касательные напряжения?
3. Как учитывают касательные напряжения при расчете резьбового соединения на прочность?
4. Какие способы применяют для уменьшения моментов трения в резьбе и на торце гайки?
5. Как изменится момент завинчивания  $T_{зав}$  в случае увеличения угла подъема винтовой линии резьбы  $\psi$  ?



## Список рекомендованных источников

1. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов: учебник для вузов / В.И. Феодосьев. –14-е изд., испр. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 590 с.: ил. – (Механика в техническом университете: В 8 т.; Т. 2).– ISBN 978-5-7038-3024-6.
2. Горшков, А.Г. Сопротивление материалов: учебное пособие / А.Г. Горшков, В.Н. Трошин, В.И. Шалашилин. – 2-ое изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 544 с.– ISBN 5-9221-0181-1.
3. Афанасьев, А.М. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов / А.М. Афанасьев, В.А. Марьин. – М.: Наука, 1975. – 287 с.
4. Стёпин, П.А. Сопротивление материалов: учебник для немашиностроительных специальностей вузов / П.А. Стёпин. – 7-е изд. – М.: Высш. школа, 1983. – 303 с.
5. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов. / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наукова Думка, 1988. – 736 с.
6. Александров, Л.И. Детали машин: лабораторные работы / Л.И. Александров, Н.П. Артеменко, Л.М. Фельдман. – 2-е изд., перераб. и доп. – Харьков: Изд-во ХГУ. – 1966. – 184 с.
7. Кушнарченко, В.М. Прикладная механика: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В.М. Кушнарченко, А.М. Ефанов, В.П. Ковалевский, Ю.А. Чирков. – изд. 2-е, испр. и доп. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2009. – 396 с. – ISBN978-5-7410-0918-5.
8. Кушнарченко, В.М. Прикладная механика. Механизмы приборов : учебное пособие / В.М. Кушнарченко, Р.Н. Узяков, Г.А. Клещарева. – Оренбург: ОГУ, 2005. – 441 с.
9. Лабораторный практикум по прикладной механике / В.М. Кушнарченко [и др.]. – Оренбург: ОГУ, 2012. – 148 с. – ISBN 978-5-91854-073-2.
10. Механика: учебное пособие / В.М. Кушнарченко [и др.]. – Оренбург: ОГИМ, 2014. – 275 с. – ISBN 978-5-9723-0150-8.

11. Пояркова, Е.В. Механика материалов (методы механических испытаний материалов) : учебное пособие / Е.В. Пояркова, В.И. Грызунов, И.Р. Кузеев. – М.: ФЛИНТА. – 2015. – 228 с. – ISBN 978-5-9765-2481-1.
12. Механика материалов : лабораторный практикум / Е.В. Пояркова [и др.]. – Оренбург: ОГУ. – 2017. – 163 с.– ISBN 978-5-7410-1808-8.
13. Пояркова, Е.В. Механика материалов и основы конструирования: учебное пособие / Е.В. Пояркова, Л.С. Диньмухаметова. – М.: ФЛИНТА. – 2017. – 276 с. – ISBN 978-5-9765-3385-1.
14. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов : учеб. пособие для вузов / Р.В. Ромашов [и др.]; под ред. Р.В. Ромашова. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2009. – 123 с. – ISBN 978-5-7410-0949-9.
15. Клевцов, Г.В. Физика и механика разрушения. Основы диагностики разрушения металлических материалов [Электронный ресурс] : электронный учебник / Г.В. Клевцов, Н.А. Клевцова, О.А. Фролова; Тольят. гос. ун-т. – Тольятти: ТГУ. – 2014.
16. Кушнарченко, В.М. Лабораторный практикум по прикладной механике [Электронный ресурс] / В.М. Кушнарченко, Ю.А. Чирков, Р.Н. Узяков. – 2-е изд., стер. – М.: ФЛИНТА, 2018. – 152 с. – ISBN 978-5-9765-3990-7.