Энгельсский технологический институт (филиал) федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Лабораторная работа

РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ РЕЗЬБОВОГО СОЕДИНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Методические указания к выполнению лабораторной работы
по курсу «Детали машин и основы конструирования»
для студентов направлений

15.03.02 «Технологические машины и оборудование»
21.03.01 «Нефтегазовое дело»

Энгельс 2024

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомиться с методикой и установкой для исследования трения в резьбовом соединении деталей, а также методом аналитического исследования точности эксперимента.

2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

2.1 Расчет сил и моментов в резьбовом соединении

При затяжке болтового соединения моментом М, приложенным к гайке или головке болта, преодолеваются моменты сил сопротивления непосредственно в резьбе и на торце гайки или головке болта:

$$M = M_р + M_т , \qquad (1)$$

где : Мр – момент сил сопротивления в резьбе;

Мт – смомент сил сопротивления на торце гайки.

В свою очередь моменты Мр и Мт определяются по формулам [2, 3]:

$$M_р = P\cdot \frac{d_{CP}}{2} \cdot tg\,(\gamma+\varphi_р) , \qquad (2)$$

$$M_т = 0{,}33\cdot P\cdot f_T\cdot \frac{D^3 - d^3}{D^2 - d^2}] , \qquad (3)$$

$$M = M_р + M_т = P\cdot[0.5\cdot d_{CP} \cdot tg(\gamma+\varphi_P) + 0{,}33\cdot f_T\cdot \frac{D^3 - d^3}{D^2 - d^2}] , \qquad (4)$$

где P – осевое усилие в болте, развивающееся при затяжке гайки,

$d_{CP} = (d + d_B)/2$ – средний диаметр резьбы;

d – наружный диаметр резьбы;

d_B – внутренний диаметр резьбы;

D = S – размер гайки под ключ;

$\gamma = arc\ tg\ (t/\pi\cdot d_{CP})$ – угол подъема витков резьбы;

t – шаг резьбы;

$\varphi_P = arc\ tg\ f_P$ – угол трения для сопряженных поверхностей резьбы гайки и болта;

f_P – коэффициент трения в резьбе (для метрической резьбы f_P вычисляется $f_P = 1{,}15\cdot f_П$, здесь $f_П$ – коэффициент плоскостного трения для данных материалов гайки и болта);

f_T – коэффициент трения на торце гайки.

Для резьбовых соединений, используемых в данной лабораторной установке (от М16 до М20) соотношение D/d = 1.37. С учетом этого соотношения формула (4) упростится:

$$M = P\cdot[\ 0{,}5\cdot d_{CP}\cdot tg\ (\gamma+\varphi_P) + 0{,}6\cdot f_T\cdot d] . \qquad (5)$$

В данной установке момент М завинчивания гайки создается с помощью динамометрического ключа с устройством контроля момента М, следовательно, при известных геометрических параметрах резьбы и

известных коэффициентах трения в резьбе и на торце гайки можно вычислить усилие P затяжки:

$$P = M / \ [\ 0{,}5 \cdot d_{CP} \cdot tg\ (\gamma + \varphi_P) + 0{,}6 \cdot f_T \cdot d]. \qquad (6)$$

2.2 Определение коэффициента трения в резьбовом соединении деталей

На рис. 1 показан пример резьбового соединения деталей, работающего на сдвиг. По этому принципу построено приспособление, используемое в лабораторной установке.

На основании 1 укреплены стойки 2 и 3, между которыми с помощью болтового соединения (7, 8, 9) зажаты пластины 4, 5, 6, имеющие нормированную шероховатость поверхностей прилегания. К средней пластине 6 прикладывается внешняя сила Q. В местах сопряжения пластин 4, 5, 6 при затяжке болтового соединения сило P создаются силы трения F, которые препятствуют смещению пластины 6 под действием силы Q. Между пластинами и болтом имеется зазор δ, который создает возможность взаимного смещения пластин во время эксперимента.

Работоспособность узлов механизмов предполагает относительную неподвижность деталей в неподвижных соединениях, следовательно:

$$2 \cdot F = 2 \cdot P \cdot f \ \geq Q\ , \qquad (7)$$

где f – коэффициент трения в сопряжении пластин 4, 5, 6.

При нарушении неподвижности соединения деталей, когда пластина 6 под действием силы Q равномерно смещается, справедливо равенство:

$$2 \cdot P \cdot f \ = \ Q\ . \qquad (8)$$

И тогда:

$$f \ = Q / 2P. \qquad (9)$$

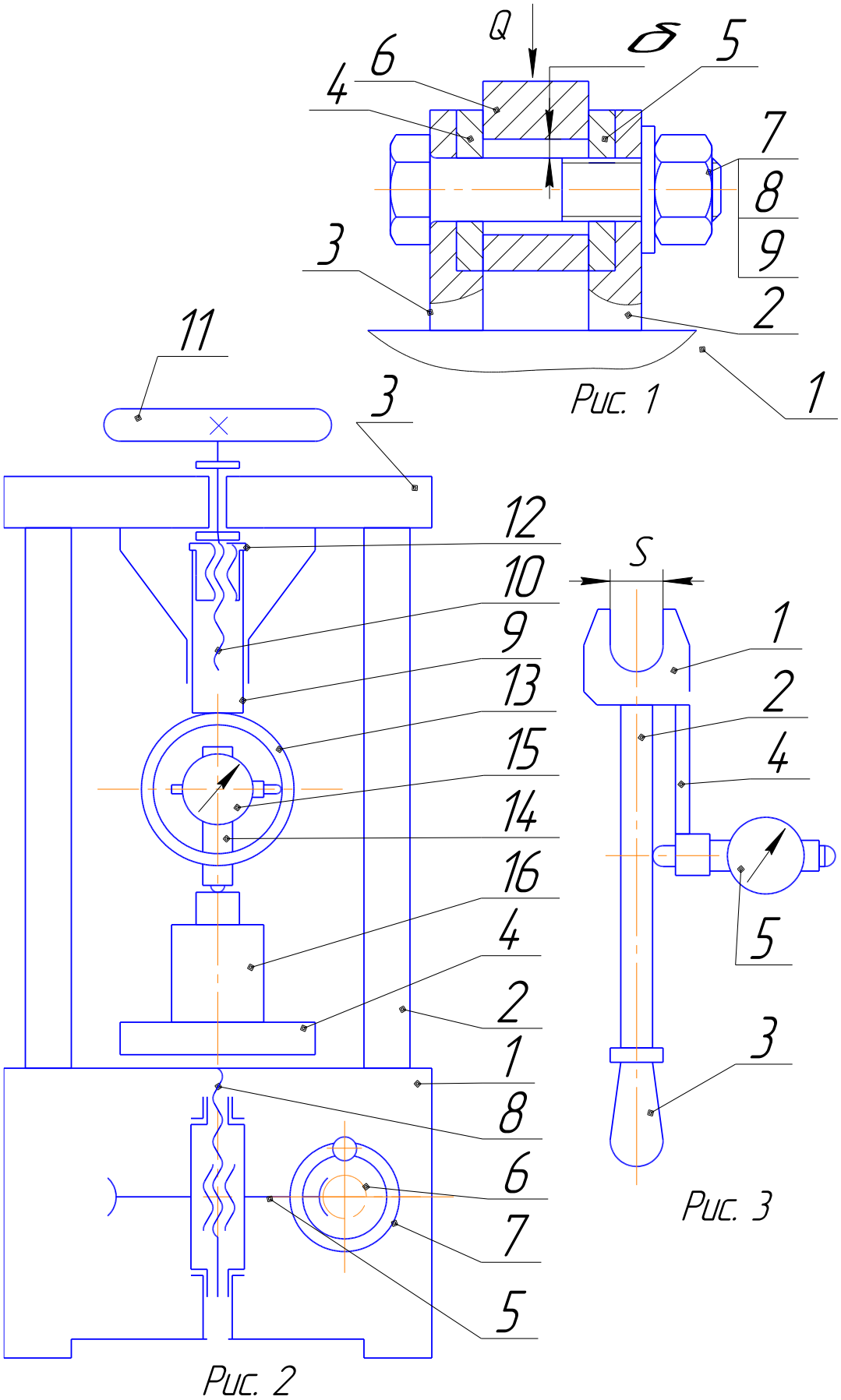
Таким образом, измеряя усилие Q и, вычисляя усилие затяжки P по формуле (6), можно определить коэффициент трения для данных деталей.

3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

3.1 Устройство установки для исследования резьбовых соединений деталей

Схема установки показана на рис. 2. На основании 1 установлены стойки 2, которые в верхней части связаны между собой поперечиной 3. В основании смонтирован червячно-винтовой механизм подъема стола 4, на который устанвливается приспособление 16, выполненного по схеме, показанной на рис. 1. Червячно-винтовой механизм включает в себя червячную передачу (5 и 6), червяк приводится во вращение укрепленным на нем маховиком 7. Червячное колесо сопряжено с ходовым винтом 8, к которому непосредственно присоединен стол 4. В поперечине 3

смонтирован винтовой механизм перемещения ползуна 9. Винтовой механизм состоит из



винта 10 , маховика 11, укрепленного на винте, гайки 12, соединенной с ползуном 9.

К ползуну 9 крепится измерительное устройство – динамометр. Он состоит из стального закаленного кольца 13, к которому с помощью кронштейна 14 крепится индикатор 15. Приспособление 16 для установки образцов показано на рис.1 и описано в пункте 2.2.

Схема динамометрического ключа для затяжки гайки болтового соединения приспособления 16 показано на рис.3. Он сотоит из головки 1, выполненной по схеме рожкового ключа с параметром захвата S, к которой прикреплены упругий стержень 2 с ручкой 3 и державка 4 индикатора 5. При затяжке гайки стержень 2 изгибается. Деформация стержня, пропорциональная прикладывамому моменту, измеряется индикатором. Момент нагрузки вычисляется по формуле:

$$M\ [Н{\cdot}м] = k_1{\cdot}x_1, \qquad (10)$$

где $k_1 = 2$ (Нм/деление) – тарировочный коэффициент ключа,

x_1 – количество делений индикатора.

Если некоторое значение момента затяжки M_i было вычислено заранее, то для создания момента M_i с помощью ключа необходимо вычислить количество делений x_i , на которое должна переместиться стрелка индикатора 5 при соответствуюшей деформации стержня 2.

$$x_i = M_i / k_i. \qquad (11)$$

3.2 Принцип действия установки для исследования резьбовых соединений

Установка для исследования резьбовых соединений представляет собой механический пресс, в котором используется возможность перемещения рабочего стола и ползуна.

Приспособление, устройство которого показано на рис. 1, с исследуемыми образцами деталей, имеющих различную нормированную шероховатость обработки рабочих поверхностей, устанавливается на стол 4. Резьбовое соединение затягивается с помощью динамометрического ключа (рис. 3).

При вращении ходового винта 10 (рис. 2) с помощью маховика 11 ползун 9 с укрепленным на нем динамометром перемещается до соприкосновения опорной части кольца 13 динамометра со средней относительно подвижной пластиной приспособления 16. Пластина нагружается усилием Q. В случае, если нагрузка Q окажется больше, чем сила трения, пластина сдвинется. Кольцо 13 динамометра, передающее усилие, деформируется. Индикатор 15 показывает деформацию кольца. Усилие нагрузки Q вычисляется:

$$Q = k_2{\cdot}x_2\ [\,Н\,], \qquad (12)$$

где $k_2 = 300$ [Н / деление] – тарировочный коэффициент,

x_2 – количество делений индикатора.

При сдвиге пластины индикатор покажет наибольшее значение деформации кольца. В этот момент внешняя нагрузка уравняется с действующей силой трения. В этом можно убедиться, продолжая дальнейшее смещение пластины опусканием ползуна. Показания индикатора не изменятся, т.к. в момент сдвига было преодолено трение покоя, а трение движения меньше трения покоя, следовательно, в этом эксперименте определяется коэффициент трения покоя.

4.ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Геометрические характеристики резьбы болтовых соединений, используемых в данной работе, приведены в таблице 1. Болты изготовлены из стали 3 с допустимым напряжением [σ_P] = 100 МПа.

Таблица 1

Резьба	t мм	d мм	d_{CP} мм	d_B мм	γ^o	S мм
M16x1,5	1,5	16	15,026	14,376	1,82°	24
M16	2,0	16	14,701	13,835	2,48°	24
M18x1,5	1,5	18	17,026	16,376	1,6°	30
M18x2	2,0	18	16,701	15,835	2,18°	30
M18	2,5	18	16,376	15,294	2,78°	30
M20x1,5	1,5	20	19,026	18,376	1,43°	30
M20	2,5	20	18,376	17,294	2,48°	30

4.1 Исходя из допустимого напряжения [σ_P] определяем значение допускаемого усилия [P] затяжки гайки резьбовой пары, установленной в приспособлении:

$$[\,P\,] = \{\pi \cdot d_B^2 \cdot [\sigma_P]\} / 5{,}2\ . \qquad (13)$$

Вычислим значения усилия P затяжки и занесем в таблицу 2:

$$P_1 = 0{,}25 \cdot [P]\ ;\ \ P_2 = 0{,}5 \cdot [P]\ ;\ \ P_3 = 0{,}75 \cdot [P]\ ;\ \ P_4 = [P].$$

Таблица 2.

№	P [H]	M [H·м]	x_2	Q [H]	f=Q/2P
1					
2					
3					
4					

4.2 Определим допускаемые значения момента завинчивания гайки:

$$[M] = [P] \cdot [\,0{,}5 \cdot d_{CP} \cdot tg(\gamma + \varphi_P) + 0{,}6 \cdot f_T \cdot d\,] \qquad (14)$$

Для вычисления [M] используем следующие значения параметров трения в резьбовой паре :

а) при наличии смазки $f_T = f_П = 0,1$; $\varphi_P = 6^0 36'$;

б) без смазки $f_T = f_П = 0,16$; $\varphi_P = 10^0 26'$.

4.3 Вычислим значения моментов завинчивания M и занесем в таблицу 2:

$$M_1 = 0,25\cdot[M];\ M_2 = 0,5\cdot[M];\ M_3 = 0,75\cdot[M];\ M_4 = [M].$$

4.4 Вращая маховик 11 (рис. 2) привода ползуна поднять его в верхнее положение.

4.5 Установить пластину 6 (рис.1) в верхнее положение и, придерживая ее, затянуть гайку болтового соединения моментом M_1 с помощью динамометрического ключа.

4.6 Вращая маховик , опустить ползун до соприкосновения опорной части колца динамометра с пластиной 6 приспособления. При дальнейшем опускании ползуна создается нагрузка Q на пластину 6 приспособления, фиксируемая по показаниям индикатора динамометра. Остановить движение ползуна сразу же, как только стрелка индикатора перестанет двигаться, т.е. при достижении равенства нагрузки и сил трения. Снять показания индикатора и занести в табл. 2.

4.7 Затянуть гайку болтового соединения моментом M_2, продолжить опускание ползуна вращением маховика, следя за ходом стрелки индикатора. В момент остановки стрелки остановить движение ползуна и снять показания индикатора.

4.8 Повторить действия по пункту 4.7, затягивая гайку приспособления моментами M_3 и M_4.

4.9 Используя выражение (12) найти нагрузку $Q_1 \div Q_4$ и занести в таблицу 2.

4.10. По формуле (9) вычислить значение коэффициента трения f и занести в таблицу 2.

4.11. Ослабить гайку приспособления. Поднять ползун в верхнее положение.

5. Требования техники безопасности

5.1. При затягивании болтового соединения не допускать нагрузок, превышающих расчетные значения.

5.2 При испытаниях не допускать нагрузок на приспособление, превышающих $2\cdot10^4$ Н.

5.3. При сборке приспособления рис.1 пластина 6 закрепляется в верхнее положение так, чтобы установился зазор δ, как показано на рис.1. В процессе эксперимента пластина смещается вниз, при этом необходимо следить за тем, чтобы хотя бы небольшой зазор сохранялся и пластина не уперлась в болт.

6. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ЭКСПЕРИМЕНТА

6.1. Анализ точности физических параметров, участвующих в эксперименте

Рассмотрим физические параметры, входящие в формулы (6) и (9), используемые для расчета трения в резьбовом соединении :

$M \pm \Delta M$ - момент завинчивания гайки болтового соединения;

$Q \pm \Delta Q$ - нагрузка на подвижную пластину приспособления;

$f_т \pm \Delta f_т$ – коэффициент трения на торце гайки;

$f_п \pm \Delta f_п$ – коэффициент плоскостного трения в резьбе;

$\varphi_р \pm \Delta\varphi_р$ – угол трения в резьбе.

Здесь ΔM, ΔQ, Δf и пр. – абсолютные погрешности соответствующих параметров.

Геометрические параметры резьбы, входящие в формулу (6) будем считать однозначными, т.е. без учета погрешностей резьбы. Момент M завинчивания гайки болтового соединения рассчитывается по допускаемому напряжению в материале болта и создается динамометрическим ключом, показанным на рис. 3, представляющим собой упругий стержень, деформация которого при создании момента завинчивания гайки измеряется индикатором. Согласно нормативным данным, приведенным в [4], относительная погрешность измерения момента динамометрическим ключами, выполненными по этому принципу, составляет $\delta M = \pm 0.5\%$.

$$\delta M = \pm \frac{\delta M}{M} \cdot 100\% \qquad (15)$$

Так как значение абсолютной погрешности в рабочем диапазоне динамометрического ключа меняется незначительно, то для оценки ΔM следует выбрать наибольшее из расчетных значений момента, т.е. M_4. Вычислим ΔM:

$$\Delta M = \frac{\delta M \cdot M_4}{100} = \pm 5 \cdot 10^{-3} \cdot M_4 \text{ (Нм)} \qquad (16)$$

Измерение силы с помощью кольцевого упругого динамометра, который применен в качестве силоизмерительного средства в данной установке, характеризуется относительной погрешностью измерения $\delta Q = \pm 0{,}25\%$.

$$\delta Q = \pm \frac{\Delta Q}{Q} \cdot 100\% \qquad (17)$$

Наибольшее значение Q приобретает при затяжке моментом M_4. Для расчета абсолютной погрешности ΔQ выберем наибольшее измеренное значение $Q = Q_4$:

$$\Delta Q = \frac{\delta Q \cdot Q_4}{100} = \pm 2{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot Q_4. \qquad (18)$$

Лабораторные исследования трения в резьбовых парах, применяемых в данной установке, показывают, что $f_т$ незначительно отличается от $f_п$. С небольшой погрешностью можно принять, что f п = f т.

Ряд экспериментов показывает, что коэффициент трения лежит в области :

для соединений, работающих со смазкой fп = fт = 0,08 ÷ 0,12;

для соединений, работающих без смазки fп = fт = 0,13 ÷ 0,19.

Для данного расчета принимаем : соединения, работающие со смазкой fт ± Δfт = fп ± Δfп = 0,1 ± 0,02 .

Соединение без смазки fт ± Δfт = fп ±Δfп = 0,16 ± 0,03.

Угол трения в резьбе :

при наличии смазки $\varphi_P \pm \Delta\varphi_P = 6°36' \pm 1°20$;

без смазки $\varphi_P \pm \Delta\varphi_P = 10°26' \pm 1°50'$.

6.2 Расчет погрешностей экспериментальных исследований

Расчет погрешностей эксперимента выполняется в соответствии с правилами математических операций с приближенными числами [4] .

При анализе формулы (6) необходимо рассмотреть делитель, который обозначим А:

$$A = 0{,}5 \cdot d_{CP} \cdot tg(\gamma + \varphi_P) + 0{,}6 \cdot f_T \cdot d \,, \qquad (19)$$

в котором обозначим $A' = 0{,}5 \cdot d_{CP} \cdot tg(\gamma + \varphi_P)$, $A'' = 0{,}6 \cdot f_T \cdot d$.

Таким образом $A = A' + A''$. Вследствие неоднозначности параметров, входящих в формулу, запишем выражение для А с учетом абсолютных ошибок ΔA , $\Delta A'$, $\Delta A''$.

$$A \pm \Delta A = (A' \pm \Delta A') + (A'' \pm \Delta A'') \qquad (20)$$

Ошибка $\Delta A'$ зависит от ошибки угла трения $\Delta\varphi_P$ в резьбе. Определим $\Delta A'$, считая, что $|+\Delta A'| = |-\Delta A'|$,

$$\Delta A' = 0{,}5\, d_{CP} \cdot [\, tg\,(\gamma + \varphi_P + \Delta\varphi_P) - tg\,(\gamma + \varphi_P)] \qquad (21)$$

Ошибка $\Delta A''$ зависит от Δf_T:

$$\Delta A'' = \pm\, 0{,}6 \cdot d \cdot \Delta f_T \qquad (22)$$

Абсолютная ошибка суммы или разности приближенных величин равна сумме абсолютных ошибок слагаемых. Так как знаки абсолютных ошибок отдельных слагаемых могут быть разными, то нет возможности в общем случае определить суммарную абсолютную ошибку суммы. Поэтому прибегают к определению предельной абсолютной ошибки. В этом наиболее неблагоприятном случае полагают, что все абсолютные ошибки имеют один и тот же знак, тогда предельная абсолютная ошибка алгебраической суммы приближенных чисел равна сумме абсолютных значений ошибок слагаемых:

$$\Delta A = \pm\,(\,\Delta A' + \Delta A''\,). \qquad (23)$$

Предельная абсолютная ошибка определения усилия Р затяжки определится по выражению:

$$\Delta P = \pm \frac{|\Delta M| \cdot A + |\Delta A| \cdot M}{A^2}, \qquad (24)$$

где $M = M_4$ (табл. 1).

Определим предельную абсолютную погрешность трения:

$$\Delta f = \pm \frac{|\Delta Q| \cdot P + |\Delta P| \cdot Q}{2P^2}, \qquad (25)$$

где $Q = Q_4$; $P = P_4$ (табл. 1).

Относительная погрешность экспериментального определения трения равна:

$$\delta f = \pm \frac{\Delta f}{f} \cdot 100\%, \qquad (26)$$

где $f = \sqrt{\frac{f_1^2 + f_2^2 + f_3^2 + f_4^2}{4}}$ – среднеквадратичная величина, определяемая по результатам расчета f согласно таблице 2.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА ПО РАБОТЕ

Отчет должен включать: название лабораторной работы, цель работы, схему испытательной установки, результаты исследования трения в резьбовых соединениях, расчет погрешностей эксперимента.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Устройство установки для исследования трения в резьбовых соединениях.
2. Принцип действия установки.
3. Устройство и принцип действия приспособления для исследования трения в резьбовых соединениях.
4. Устройство и принцип действия динамометрического ключа, используемого в лабораторной установке.
5. От чего зависит момент завинчивания гайки ?
6. Как определяется коэффициент трения в резьбовом соединении деталей ?
7. В чем заключается методика эксперимента ?
8. Как определяется абсолютная погрешность коэффициента трения ?
9. Как определяется относительная погрешность коэффициента трения ?

ЛИТЕРАТУРА

1. Гузенков, П.Г. Детали машин: учебник/ П.Г. Гузенков. –М.: Высшая школа, 1986.– 359 с.

2. Иванов, М.Н. Детали машин: учебник/ М.Н. Иванов. –М.: Высшая школа, 1998.– 383 с.

3. Крайнев, А.Ф. Детали машин: словарь–справочник/ А.Ф. Крайнев. –М.: Машиностроение, 1992. –480 с.

4. Решетов, Д.Н. Детали машин: учебник/ Д.Н. Рещетов. –М.: Машиностроение. 1989. –496 с.

ВРЕМЯ, ОТВЕДЕННОЕ НА ЛАБОРАТОРНУЮ РАБОТУ

Подготовка к работе ……1 ч
Выполнение работы …….. 0,5 ч
Обработка результатов эксперимента и
оформление отчета …… 1 ч
Отчет по лабораторной работе …… 0,5 ч

РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ РЕЗЬБОВОГО СОЕДИНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Руководство к лабораторной работе по курсу
«Детали машин и основы конструирования»

Составили: ПОТЕХИНА Лариса Николаевна
САВРАСОВ Генрих Андреевич