

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

Кафедра механики материалов, конструкций и машин

Е. В. Пояркова

ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательной программе высшего образования по специальности 23.05.01 Наземные транспортно-технологические средства

Оренбург
2019

УДК 620.10
ББК 30.121
П 67

Рецензент – профессор, доктор технических наук В. М. Кушнарэнко

П 67 **Пояркова, Е. В.**

Измерения механических величин и методы обработки результатов измерений: методические указания / Е. В. Пояркова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2019. – 20 с.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторной работы по дисциплине «Сопротивление материалов» обучающимися по образовательной программе высшего образования по специальности 23.05.01 Наземные транспортно-технологические средства (профиль – Автомобильная техника в транспортных технологиях). Методические указания отражают в предельно краткой форме простейшие методы оценки погрешностей результатов прямых и косвенных физических измерений механических величин.

УДК 620.10
ББК 30.121

© Пояркова Е. В., 2019
© ОГУ, 2019

Содержание

Организационно-методические рекомендации к выполнению лабораторной работы	4
Введение	7
1 Лабораторная работа «Измерения механических величин и методы обработки результатов измерений»	9
1.1 Операции с приближенными числами	9
1.1.1 Запись приближенных чисел. Округление чисел	9
1.1.2 Арифметические и алгебраические действия над приближенными числами	11
1.2 Методы измерений и оценка погрешностей	12
1.2.1 Прямые и косвенные измерения	12
1.2.2 Методы измерений	13
1.2.3 Погрешности измерений	14
1.3 Обработка результатов косвенных измерений физической величины, полученной в невоспроизводимых условиях	18
2 Вопросы для самоконтроля	19
3 Список рекомендованных источников	20

Организационно-методические рекомендации к выполнению лабораторной работы

Настоящие рекомендации предназначены как руководство при выполнении лабораторной работы «Измерения механических величин и методы обработки результатов измерений» обучающимися по образовательной программе высшего образования по специальности 23.05.01 Наземные транспортно-технологические средства (профиль – Автомобильная техника в транспортных технологиях).

Цель данной разработки сводится к формированию у обучающихся представлений о месте и роли стандартных механических испытаний различных материалов в прочностной оценке конструкций транспортно-технологических средств и приобретению студентами навыков обработки результатов механических испытаний материалов.

Лабораторные занятия являются основным видом занятий, обеспечивающих практическую подготовку студентов. Лабораторные работы проводятся в специализированных учебных лабораториях, оснащенных современным лабораторным оборудованием, проекционной и компьютерной техникой с использованием макетов и натуральных образцов для определения физико-механических свойств материалов.

Выполнение лабораторных работ проводится на поверенном оборудовании, позволяющем использовать его и для проведения научных исследований. При необходимости в лаборатории оборудуются персональные рабочие места для бакалавров, выполняющих научные исследования в данной области.

Результатом проведения лабораторного практикума является реализация следующих компетенций:

- ОК-1 способностью к абстрактному мышлению, анализу, синтезу;
- ОПК-4 способностью к самообразованию и использованию в практической деятельности новых знаний и умений, в том числе в областях

знаний, непосредственно не связанных со сферой профессиональной деятельности.

Априори, лекционный материал, выданный обучающимся во время аудиторных занятий, закладывает основы знаний по предмету в обобщенной форме, а лабораторные занятия направлены на расширение и детализацию этих знаний, на выработку и закрепление навыков профессиональной деятельности. Подготовка к лабораторному занятию предполагает предварительную самостоятельную работу студентов в соответствии с данной методической разработкой.

Лабораторная работа позволит интегрировать теоретические знания и сформировать некоторые практические умения и навыки студентов в процессе их учебной деятельности. При этом предполагается:

- проверка готовности и способности применять обучающимися физико-математический аппарат, теоретические, расчетные и экспериментальные методы исследований, методы математического моделирования в процессе их подготовки к профессиональной деятельности;

- формирование привычки и умения самостоятельно пополнять свои знания, развивать умения, навыки и компетенции, в том числе с использованием современных информационных технологий;

- развитие способности выбирать средства и аппаратуру для экспериментальных исследований в соответствии с требуемой точностью и условиями;

- формирование умений использования теоретических знаний в процессе выполнения лабораторной работы;

- развитие аналитического мышления путем обобщения результатов лабораторной работы;

- формирование навыков использования нормативной и справочной литературы;

- развитие основных способностей к обобщению, анализу и систематизации информации;

– формирование навыков оформления результатов лабораторных испытаний в виде таблиц, графиков, иллюстраций, соответствующих выводов.

Данная лабораторная работа (как и другие лабораторные работы по курсу «Сопротивление материалов») выполняется в соответствии с методическими указаниями и оформляется по требованиям СТО 02069024.101–2015 РАБОТЫ СТУДЕНЧЕСКИЕ. Общие требования и правила оформления. Данный локальный нормативный документ доступен для ознакомления и скачивания на сайте Оренбургского государственного университета по ссылке http://www.osu.ru/docs/official/standart/standart_101-2015.pdf .

Обучающиеся должны усвоить, что отчетность по лабораторным работам ведется в строгом соответствии с определенными требованиями, что контролируется ведущим преподавателем. Таким образом, у обучающихся формируются первоначальные умения ведения научной документации и представления отчетной информации.

Выполнение каждой лабораторной работы, входящей в курс дисциплины, предусматривает следующие этапы:

- 1) теоретическую подготовку;
- 2) допуск к выполнению работы;
- 3) проведение эксперимента, наблюдение и измерение;
- 4) обработку результатов измерений;
- 5) отчет о выполнении лабораторной работы;
- 6) защиту выполненной работы.

В процессе защиты лабораторной работы выявляется информационная компетентность в соответствии с заданием; затем преподавателем дается комплексная оценка деятельности студента.

При постановке всех физических опытов обучающиеся должны соблюдать правила техники безопасности. Неаккуратность, невнимательность, незнание правил техники безопасности могут повлечь несчастные случаи. *Лица, не прошедшие инструктаж по соблюдению правил техники безопасности, к работе в лаборатории не допускаются.*

Введение

При расчетах на прочность, жесткость и устойчивость элементов машин и различной автомобильной техники необходимо знать механические характеристики различных конструкционных материалов; при этом результаты расчетов тесно сочетаются с результатами экспериментальных исследований. По этой причине в учебной дисциплине «Сопротивление материалов» большое внимание уделяется лабораторным работам, которые выполняются параллельно с прохождением теоретического курса.

Часть лабораторных работ посвящена использованию моделей для проверки правильности основных гипотез и формул сопротивления материалов. Это испытания моделей балок и валов при различных видах нагружения, экспериментальное определение жесткости балок, испытания балок на удар и изучение их собственных колебаний.

При сравнении результатов расчета и данных испытаний не следует отдавать предпочтение ни одному из этих видов исследований. Самой распространенной методической погрешностью является сравнение экспериментального результата с «точным» теоретическим решением. В действительности оба результата являются равноправными: погрешности теоретического расчета заложены в самой математической модели, составление которой требует введения ряда упрощающих гипотез:

- погрешности эксперимента могут быть обусловлены погрешностями измеряющей аппаратуры;
- погрешностями измерения;
- неточностью изготовления самой модели;
- индивидуальными особенностями наблюдателя и рядом других трудно учитываемых факторов.

Поэтому, проведя расчет и эксперимент, следует сравнивать абсолютное и относительное расхождения их результатов, а не оценивать погрешность эксперимента.

С одной стороны, по значению этих расхождений можно оценить степень правдоподобия теории, если многократное повторение эксперимента доказало надежность его результатов.

С другой стороны, используя для расчетов опробованную теорию, можно оценить правильность постановки эксперимента и достоверность полученных значений измеряемых величин.

Сравнивая данные расчета и эксперимента, все же целесообразнее относить полученную разность к расчетному значению, так как значение, полученное экспериментально, нестабильно. Оно меняется от эксперимента к эксперименту, а даже среднее значение, вычисленное в результате большого числа экспериментов, колеблется в достаточно широких пределах.

Обрабатывая экспериментальные данные, условимся определять абсолютное отклонение Δn как

$$\Delta n = n_{\text{эксп}} - n_{\text{расч}},$$

а относительное отклонение \mathcal{E}_n как

$$\mathcal{E}_n = \frac{n_{\text{эксп}} - n_{\text{расч}}}{n_{\text{расч}}},$$

где n – определяемая величина (аббревиатуры *эксп* и *расч* у определяемой величины обозначают принадлежность экспериментальным и расчетным данным соответственно).

Применение методов статистической обработки экспериментальных данных будет рассмотрено в нескольких лабораторных работах в течение всего курса дисциплины «Соппротивление материалов».

1 Лабораторная работа «Измерения механических величин и методы обработки результатов измерений»

Все значения физических величин, используемые в инженерных расчетах, являются *приближенными*, полученными путем измерения с той или иной степенью точности. Поэтому, говоря о действительном значении какой-либо величины, необходимо помнить, что оно является некоторым средним значением экспериментальной величины, которая от опыта к опыту может изменяться в некоторых пределах.

Будем считать *действительным* значением физической величины то, которое может быть получено измерением с наивысшей практически достижимой точностью. По мере совершенствования измерительной техники действительное значение все больше приближается к истинному значению измеряемой величины, то есть такому ее значению, которое идеальным образом отражало бы в качественном и количественном отношении соответствующее свойство объекта.

Поскольку истинное значение физической величины получить невозможно, будем использовать в качестве ее характеристики *приближенное число* с указанием возможного интервала его изменения, зависящего от точности производимых измерений и их количества.

Цель работы – научиться выполнять различные операции и действия с приближенными числами с учетом погрешности измерений.

1.1 Операции с приближенными числами

1.1.1 Запись приближенных чисел. Округление чисел

Всякое приближенное число должно записываться в форме, позволяющей судить о степени точности числа.

Например, может указываться интервал возможной погрешности:

$$24,03 \pm 0,01; 69,0 \pm 0,2.$$

Это означает, что возможные значения первой величины лежат в интервале от 24,04 до 24,02, а вторая величина может принимать значения в пределах от 69,2 до 68,8.

При этом следует иметь в виду, что точность основного числа (число разрядов после запятой в первом слагаемом) не должна превышать точность погрешности (второго слагаемого). Для этого перед окончательной записью результата число необходимо округлить, отбросив те разряды числа, которые не обеспечиваются точностью измерений.

Так, например, при точности измерений, составляющей $\pm 0,01$,

число 17,0342 должно быть записано как $17,03 \pm 0,01$;

число 0,5672 запишется как $0,57 + 0,01$;

число 2,0457 – как $2,04 \pm 0,01$,

а число 0,05534 – как $0,06 \pm 0,01$.

В последних двух случаях использовано правило, гласящее, что *если цифра наибольшего отбрасываемого разряда равна 5, то цифра предыдущего (остающегося) разряда не изменится, если она четная, и увеличится на единицу, если она нечетная.*

Если при написании числа погрешность не указана, то следует считать, что погрешность составляет единицу последнего указанного разряда. Число 87 следует рассматривать как 87 ± 1 , число 0,0806 – как $0,0806 \pm 0,0001$.

В связи с этим приобретают значение и нули, указанные после запятой. Числа 42 и 42,0 отнюдь не идентичны: первое означает 42 ± 1 , а второе означает $42 \pm 0,1$. В последнем случае нуль является значащей цифрой.

Если приближенные числа существенно различаются, то при операциях с ними удобно использовать понятие *не абсолютной, а относительной погрешности*, определяемой количеством верных значащих цифр в числе. Для этого следует представить все числа в показательной форме, указав такое

количество разрядов, которое соответствует точности рассматриваемой величины.

Приведем примеры записи различных чисел в показательной форме:

$$\begin{aligned}1,213 &= 1,213 \cdot 10^0; \\ 3760 &= 3,76 \cdot 10^3; \\ 0,07624 &= 7,624 \cdot 10^{-2}.\end{aligned}$$

В такой записи удержание первого разряда после запятой (то есть двух значащих цифр числа) соответствует погрешности в 0,1, то есть относительная погрешность в зависимости от цифры, стоящей в разряде единиц (1, ..., 9), составит от 1 % до 10 %.

Удержание трех значащих цифр (второго разряда после запятой) приводит к погрешности в пределах от 0,1 % до 1 %. Для практических расчетов такая точность считается вполне удовлетворительной. Поэтому обычно результаты инженерных расчетов округляются до трех значащих цифр.

1.1.2 Арифметические и алгебраические действия над приближенными числами

Совершая различные действия над приближенными числами, следует помнить, что точность результата не может быть больше точности наименее точного из чисел, участвующих в вычислениях. Проводя вычисления на микрокалькуляторе, нет необходимости округлять все числа до разряда наименее точного числа, но, получив результат, это округление совершенно необходимо сделать. Без округления полученный результат будет содержать ложную информацию о точности искомой величины.

Пример. Вычислить приближенное значение величины x с учетом погрешности заданных чисел:

$$x = \frac{(6,066 - 2,3) * 453,1 \sqrt{0,04783}}{548,22 * 0,000450} = 1512,7151$$

Наименее точным числом является 2,3, имеющее всего две значащие цифры (число 0,000450 имеет три значащие цифры), поэтому и результат следует округлить до двух значащих цифр.

Следовательно, $x = 1500$.

Погрешность будет уже в третьем знаке, и правильный результат можно представить в виде $x = 1500 \pm 100$.

Полученное в формуле неокругленное значение x создает иллюзию большой точности, что не соответствует действительности.

1.2 Методы измерений и оценка погрешностей

1.2.1 Прямые и косвенные измерения

Если изучаемое явление допускает непосредственное определение измеряемой величины без каких-либо промежуточных вычислений, то такое измерение называется *прямым*. К таким измерениям относятся измерения длин, времени, массы и других величин, значения которых могут быть получены непосредственным сравнением с эталонной мерой. Измерение считается прямым и в том случае, когда измерительный прибор имеет условную шкалу, требующую пересчета с применением таблиц, графиков или номограмм.

Мера – средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера: гиря – мера массы, кварцевый генератор – мера частоты электрических колебаний и тому подобное.

Измерительный прибор – средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Примером такого прямого измерения является определение ударной вязкости материала.

Прямыми измерениями считаются также такие измерения, при которых требуется проведение дополнительных измерений для определения влияния различных побочных факторов и введения соответствующих поправок. Таким образом, понятие «прямое измерение» является относительным.

При *косвенных* измерениях искомая величина вычисляется на основании прямых измерений других величин, связанных с ней какими-либо физическими закономерностями. Так, например, измерив модуль упругости материала и относительное удлинение, можно используя закон Гука, вычислить напряжения. В зависимости от сложности изучаемого явления для косвенного измерения физической величины могут потребоваться прямые измерения нескольких величин, производимые различными методами, дающими различную точность.

1.2.2 Методы измерений

При проведении измерений применяются различные средства и принципы. Совокупность приемов использования средств и принципов измерений определяет метод измерений.

Методы измерений по ГОСТ 16263-70 объединены в следующие группы:

1. *Метод непосредственной оценки*, когда значение измеряемой величины определяется по шкале или другому отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия. Этот метод наиболее часто применяется для оценки таких фундаментальных величин, как расстояние, время, температура.

2. *Метод сравнения с мерой*, когда измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой. У этого метода есть несколько вариантов: дифференциальный метод, метод противопоставления, нулевой метод, метод замещения и метод совпадения.

3. При измерениях *дифференциальным методом* на измерительный прибор воздействует разность между измеряемой величиной и известной

величиной, воспроизводимой мерой. Этот метод реализуется, например, при измерении деформации.

4. При измерениях *методом противопоставления* измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, воздействуют на прибор сравнения, с помощью которого устанавливается соотношение между величинами.

5. При измерениях *нулевым методом* разность результатов воздействия на прибор сравнения измеряемой величины и величины, воспроизводимой мерой, доводят до нуля. Этот метод применяется при определении собственных частот колебаний балок или пластинок с использованием явления резонанса.

6. При измерениях *методом замещения* измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой.

7. При измерениях *методом совпадений* разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, определяют по совпадению отметок шкал или периодических сигналов. Элементы этого метода просматриваются при использовании отметчика времени шлейфового осциллографа при анализе колебательных процессов.

Выбор того или иного метода зависит от многих причин. В ряде случаев, когда не удается получить требуемую точность измерений одним методом, приходится изменять не только средство, но и принцип измерений, то есть переходить к использованию другой группы методов.

1.2.3 Погрешности измерений

Погрешностью измерения называется разность между истинным и измеренным значением величины. Любое измерение производится с некоторой погрешностью, которую необходимо научиться оценивать.

Погрешности вызываются большим количеством причин, как случайных, так и детерминированных. Методические погрешности возникают вследствие несовершенства метода измерений, инструментальные объясняются несовершенством средств измерений. Могут возникать также погрешности,

обусловленные индивидуальными особенностями наблюдателя и другими случайными причинами.

В зависимости от причин погрешности могут быть систематическими, постоянными в данной серии опытов либо изменяющимися закономерно или случайными, зависящими от множества неконтролируемых случайных изменений, происходящих во внешней среде, в образце, в измерительных приборах. Как правило, случайные погрешности невелики. Их характеристики могут быть получены статистическими методами. Особое место среди причин случайных погрешностей занимают грубые ошибки или промахи, приводящие к серьезным нарушениям методики измерения. Такие погрешности должны выявляться и исключаться из рассмотрения при статистической обработке данных.

Систематические погрешности одинаковы для всех измерений, проводящихся данным методом при помощи одних и тех же приборов. Они возникают в случае неправильной юстировки приборов, смещения нуля шкалы и вследствие недостаточно точного планирования эксперимента.

К числу систематических погрешностей относятся следующие:

1. Погрешности, природа которых известна. Они могут быть определены и устранены введением соответствующей поправки.

2. Погрешности, причины которых известны, но оценить которые невозможно.

3. Погрешности, о существовании которых ничего не известно. С ними приходится либо мириться, либо для их обнаружения нужно определять измеряемую величину по другой, принципиально отличной методике.

4. Систематические погрешности, связанные с закономерным отклонением параметров исследуемого объекта от их номинальных значений. Систематическая погрешность не влияет на разброс результатов. Как правило, наличие систематической ошибки не искажает зависимости исследуемой величины от рассматриваемых параметров.

Особую роль при обработке результатов испытаний играют случайные погрешности. Вследствие небольших случайных изменений условий эксперимента, значений параметров, некоторой нестабильности работы приборов результаты измерений при повторении опытов будут иметь некоторый разброс вокруг истинного значения, нам неизвестного. Отклонение каждого результата измерения от истинного значения, взятое по абсолютной величине, называется *абсолютной погрешностью* измерения:

$$\Delta n_i = |n_i - N|, \quad (1.1)$$

где Δn_i – абсолютная погрешность i -го измерения;

n_i – значение величины, полученное при i -м измерении;

N – истинное значение измеряемой величины.

Значение абсолютной погрешности позволяет оценить измерение с количественной стороны, показывая погрешность данного измерения.

Поскольку при проведении измерений истинное значение измеряемой величины неизвестно, его заменяют средним арифметическим значением $\langle N \rangle$ результатов, полученных при измерениях:

$$\langle N \rangle = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m n_i, \quad (1.2)$$

где m – количество произведенных изменений.

Это значение близко к истинному и еще больше приближается к нему при увеличении числа измерений.

Таким образом, абсолютную погрешность каждого измерения следует вычислять по формуле:

$$\Delta n_i = |n_i - \langle N \rangle|. \quad (1.3)$$

Абсолютная погрешность не может служить мерой оценки качества проводимых измерений, так как одна и та же погрешность может оказаться несущественной при большом $\langle N \rangle$ и весьма существенной при малом $\langle N \rangle$. Оценка качества проведенных измерений осуществляется путем вычисления *относительной погрешности* δn_i :

$$\delta n_i = \frac{\Delta n_i}{\langle N \rangle}. \quad (1.4)$$

Относительной погрешностью i -го наблюдения называется отношение абсолютной погрешности данного наблюдения к среднему значению измеряемой величины, полученному в данной серии наблюдений. Относительную погрешность часто выражают в процентах от среднего значения $\langle N \rangle$. Относительная погрешность δn_i является случайной величиной. Она изменяется от опыта к опыту.

Чтобы оценить качество серии опытов, вычисляют среднее значение относительной погрешности по формуле:

$$\langle \delta n \rangle = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \delta n_i = \frac{\langle \Delta n \rangle}{\langle N \rangle}, \quad (1.5)$$

где $\langle \Delta n \rangle = \sum_{i=1}^m \frac{\Delta n_i}{m}$ – среднее значение абсолютной погрешности в данной серии опытов.

Не прибегая к сложным методам статистической обработки результатов измерений, можно грубо оценить измеряемую величину таким образом:

$$N = \langle N \rangle \pm \langle \Delta n \rangle = \langle N \rangle (1 \pm \langle \delta n \rangle). \quad (1.6)$$

Точность этой оценки является достаточной для большинства измерений, проводимых в инженерной практике.

1.3 Обработка результатов косвенных измерений физической величины, полученной в невоспроизводимых условиях

Задание на лабораторную работу: определить коэффициент упругости пружины.

Для этого необходимо:

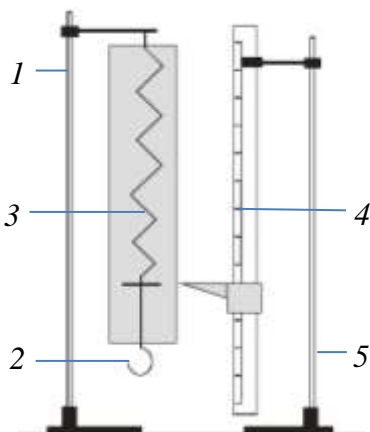


Рисунок 1 – Общий вид экспериментальной установки

1. Собрать на штативе 1 установку так, как показано на рисунке 1. Держась за динамометр 2, растянуть пружину 3 на $l = 1$ см (фиксацию удлинения вести с помощью линейки 4, закрепленной на штативе 5). Измерить силу. Результат измерения занести в таблицу 1.

2. Повторить пункт 1, растянув пружину на 2, 3, 4 и 5 см. Провести серию измерений. Результаты измерений занести в таблицу 1.

3. По формуле $k = F/l$ вычислить (угловой) коэффициент упругости пружины.

С учетом погрешности оценить приближенное значение запрашиваемого коэффициента. Оценить точность измерения. Установить абсолютную и относительную ошибки измерений.

4. Построить график зависимости силы F от удлинения пружины l .

Результаты эксперимента, необходимых вычислений и полученный графический материал отразить в отчете по лабораторной работе.

Таблица 1

Удлинение пружины $l \cdot 10^{-2}, м$	1	2	3	4	5
Сила $F, Н$					
Угловой коэффициент упругости пружины $k, Н/м$					

2 Вопросы для самоконтроля

1. Какие цифры в десятичном изображении числа являются значащими?
2. Что такое абсолютная погрешность результата?
3. Как округляются следующие числа, представляющие собой абсолютные погрешности результатов, если число повторных измерений в сериях не превышало 10: 0,551; 84,7; 1,522?
4. Как разделяются погрешности по характеру появления?
5. Какие погрешности называются систематическими?
6. Как разделяются случайные погрешности по причинам, их порождающим?
7. Каким образом округляется результат измерения?
8. Что такое относительная погрешность результата δn_i ?

3 Список рекомендованных источников

1. ГОСТ 16263-70. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Термины и определения. – Введ. 01.01.71. – М. : Изд-во стандартов, 1970. – 55 с.

2. Пояркова, Е.В. Механика материалов (методы механических испытаний материалов) [Электронный ресурс] : учебное пособие / Е.В. Пояркова, В.И. Грызунов, И.Р. Кузеев. – Москва : Флинта. – 2015. – ISBN 978-5-9765-2481-1. – 228 с – Загл. с тит. экрана. <https://e.lanbook.com/book/72683#authors>

3. Калеева, Ж.Г. Обработка результатов механических испытаний материалов методом линейного регрессионного анализа [Электронный ресурс] : методические указания / Ж.Г. Калеева, Е.В. Пояркова, С.Н. Горелов. – 2-е изд. – Москва : Флинта. – 2015. – ISBN 978-5-9765-2482-8. – 46 с – Загл. с тит. экрана. https://e.lanbook.com/book/72680#book_name

4. Быков, С.Ю. Испытания материалов : учеб. пособие для вузов / С.Ю. Быков, С.А. Схиртладзе . – М. : ТНТ, 2009. – 136 с. – Библиогр.: с. 135. – ISBN 978-5-94178-213-0.

5. Аксенова, Е.Н. Методы обработки результатов измерений физических величин: Учебно-методическое пособие / Е.Н. Аксенова, Н.П. Калашников. – М.: МИФИ, 2015 – 32 с.

6. Золоторевский, В.С. Механические испытания и свойства металлов: учеб. пособие для вузов / В.С. Золоторевский; под ред. И.И. Новикова. – М. : Металлургия, 1974. – 304 с. : ил. – Библиогр.: с. 303.

7. Пояркова, Е.В. Сопротивление материалов для транспортных направлений подготовки [Электронный ресурс] : электронный курс в системе Moodle / Е.В. Пояркова; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования "Оренбург. гос. ун-т". – Оренбург : ОГУ. – 2019. – 11 с. – Режим доступа: https://ufer.osu.ru/index.php?option=com_uferdbsearch&view=uferdbsearch&action=details&ufer_id=1749 – Загл. с тит. экрана.