

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
EXPERIMENTAL RESEARCHESDOI 10.22363/1815-5235-2019-15-5-399-404
УДК 624.04:004

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Использование точек покоя при экспериментальном изучении
внутреннего трения в материале

В.Б. Зылев, П.О. Платнов*

Российский университет транспорта, Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, 9
*manuntdfan@mail.ru

История статьи:

Поступила в редакцию: 11 мая 2019 г.
Доработана: 04 октября 2019 г.
Принята к публикации: 10 октября 2019 г.

Аннотация

Цели. Работа посвящена экспериментальному определению параметров внутреннего трения в материале. **Методы.** Внутреннее трение изучается путем рассмотрения затухающих колебаний экспериментальной установки, которая состоит из весьма жестких дисков и стального образца, испытывающего напряженное состояние, близкое к чистому изгибу. Материал образца – малоуглеродистая сталь, поперечное сечение образца – тонкостенный коробчатый профиль. Способ записи колебаний основан на записи перемещения пятна лазерного луча на экране, что полностью исключает потери энергии, связанные с контактом лабораторной установки с записывающим устройством. Для сведения к минимуму потерь энергии в местах крепления предложено устанавливать опоры в точках покоя. Точки покоя определяются при помощи конечно-элементного расчета с рассмотрением свободных колебаний незакрепленной модели, что и реализовано в работе. **Результаты.** Как пример приводятся кривые затуханий, которые демонстрируют весьма малый логарифмический декремент колебаний и частотную независимость внутреннего трения. Основным результатом работы являются опробованные усовершенствования экспериментальной методики, среди которых основным является использование точек покоя для определения мест закрепления лабораторной установки.

Ключевые слова: экспериментальное определение внутреннего трения в материале; лабораторная экспериментальная установка; определение точек покоя методом конечных элементов; минимизация потерь энергии в опорных точках; логарифмический декремент колебаний; частотная независимость внутреннего трения

Для цитирования

Зылев В.Б., Платнов П.О. Использование точек покоя при экспериментальном изучении внутреннего трения в материале // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 5. С. 399–404. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-399-404>

Введение

Внутреннее трение является важным параметром материала, оказывающим значительное влияние на напряженно-деформированное состояние

конструкций при динамическом нагружении [1–3]. Вопросам учета внутреннего трения в настоящий момент уделяется большое внимание, наиболее часто оно вводится в расчет благодаря различным математическим алгоритмам и методикам [4–7]. Однако изучению внутреннего сопротивления опытным путем уделяется намного меньше внимания [8], несмотря на отсутствие достаточной экспериментальной обоснованности математических моделей. В данной статье предложено определять параметры внутреннего сопротивления материала путем рас-

Зылев Владимир Борисович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительной механики.
Платнов Павел Олегович, аспирант, кафедра строительной механики.

© Зылев В.Б., Платнов П.О., 2019

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

смотрения затухающих колебаний в лабораторной установке. Чтобы изучить именно свойства материала, необходимо максимально уменьшить трение, связанное с другими факторами демпфирования, основными из которых являются: трение в опорных частях; рассеяние энергии через опорные части в виде волн деформаций, уходящих в основание; трение в сочленениях; силы сопротивления воздушной среды; силы сопротивления в приборах, записывающих колебания. При выполнении экспериментов в лаборатории РУТ (МИИТ) мы пришли к использованию точек покоя, которые позволяют ослабить гашение колебаний через опорные части.

1. Методика исследований

Задача по устранению негативного влияния распространения волн деформаций, исходящих от опорных закреплений при колебательном процессе, сводилась к определению местоположения точек покоя. Нахождение неподвижных точек конструкции могло быть реализовано различными способами. Мы рассматривали первую форму собственных колебаний незакрепленной системы, которую определяли с использованием метода конечных элементов расчетным путем, однако данная методика в принципе справедлива и для других форм собственных колебаний.

После того как форма собственных колебаний была получена расчетным путем, осуществлялся поиск точек конструкции, не имеющих линейных перемещений. Далее будем называть их точками покоя. При размещении в этих местах опорных закреплений, препятствующих поступательным перемещениям, обеспечивается сохранение частоты и формы собственных колебаний, а также сведение к минимуму динамических составляющих опорных реакций и, как следствие, потерь энергии за счет волн, уходящих в основание.

Положение точек покоя, справедливое для одной формы собственных колебаний, нуждается в переопределении при рассмотрении других форм. Помимо вышесказанного, следует еще отметить, что точки покоя остаются неизменными лишь при малых линейных колебаниях. Далее перейдем к описанию нашей экспериментальной установки.

Установка состоит из испытуемого стержня, расположенного горизонтально, и прикрепленных к его концам идентичных весьма жестких стальных плит. Поперечное сечение стержня коробчатое, 4×2 см, с толщиной стенок 1,5 мм. Жесткие плиты имеют толщину 5,5 см и массу 71 кг каждая. Объединение стержня и плит происходит притя-

гиванием друг к другу шпильками М12 через накладку толщиной 16 мм.

Внутри образца с коробчатым поперечным сечением помещаются стальные вставки, изготовленные точно по размерам внутренней полости образца с таким расчетом, чтобы при затягивании шпилек верхняя и нижняя полки образца сжимались и создавалось крепление, близкое к глухой заделке.

Использовался стержень длиной пролета 278 см. Объединенная конструкция вывешивалась на стальных канатах, которые обеспечивали возможность небольших продольных перемещений, неизбежных при изгибе образца. Это обусловлено тем, что в реальном эксперименте мы всегда имеем малые, но все же конечные перемещения. Если допустить, что образец изгибается по окружности, и при этом в крайних волокнах возникает напряжение порядка 2000 кг/см^2 , то можно определить сближение крайних точек образца. Несложные вычисления приводят к значению порядка 0,9 см для сближения крайних в пролете точек за счет искривления его оси. Отметим, что линейный расчет никак не фиксирует это перемещение, и оно будет уменьшаться с уменьшением амплитуды колебаний.

В местах крепления тросов к плитам при колебаниях также будет возникать нежелательная утечка энергии за счет их изгиба, поэтому для эксперимента были смонтированы блоки с подшипниками качения, на которые одевались тросы.

Для данной экспериментальной установки предусмотрена возможность изменения длины пролета образца, а также добавления дополнительных масс, которые крепятся к жестким плитам через шпильки с гайками. Система присоединения образца к плитам позволяет использовать стержни с другими размерами поперечного сечения.

Установка позволяет сдвигать точки подвеса по горизонтали, что дает возможность устанавливать их в точках покоя. При любой модификации первоначальной системы неизбежно меняются частота и форма собственных колебаний и, следовательно, положение точек покоя, которое придется определить новым расчетом.

Компьютерная модель установки и исследуемая форма колебаний приведены на рис. 1.

Наличие трения о воздух при колебаниях конструкции вызывает нежелательное затухание. Оценка величины влияния сопротивления среды была произведена в работе [9] при помощи численного моделирования нелинейных колебаний. Схема крепления коробчатого образца в работе [9] была консольной, однако сечение образца было тем же, что и в настоящей работе. Также близкими были и частоты затухающих колебаний. Все

это позволяет высказать предположение о том, что силами сопротивления воздуха в рассматриваемом здесь случае можно пренебречь или, по крайней мере, оценивать их как пренебрежимо малые.

Также дополнительное рассеяние энергии может возникать при записи процесса затухания. При использовании различных записывающих устройств происходит контакт этого устройства с образцом, что сказывается на всем колебательном процессе. В наших экспериментах мы используем оптический метод – лазерная указка проецирует колебания на экран, при этом никаким образом не влияя на затухание.

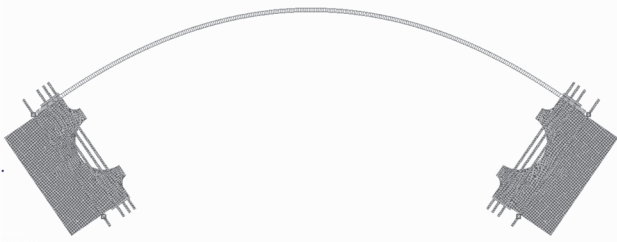


Рис. 1. Форма собственных колебаний, используемая в экспериментах

[Figure 1. The form of natural oscillations used in experiments]

Форма колебаний, изучаемая в экспериментах, приведена на рис. 1. Чтобы определить положение неподвижных точек системы, было выполнено моделирование конструкции в программно-расчетном комплексе Femap with NX Nastran. Особенностью модели является отсутствие в ней опорных закреплений. Состоит модель из стержневых (bar) и пластинчатых (plate) конечных элементов размером 4 мм. Всего модель включает в себя 26 204 конечных элемента.

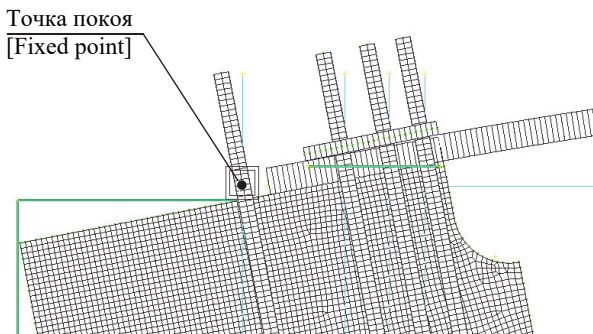


Рис. 2. Фрагмент конструкции с точкой покоя, которая легко определяется при рассмотрении формы колебаний
[Figure 2. A fragment of a construction with a fixed point that is easily determined by considering the form of natural oscillations]

Поиск точек покоя проводился визуально при рассмотрении анимации собственных колебаний

исследуемой формы с многократным увеличением масштаба изображения. Найденные неподвижные точки по высоте находились практически на нейтральной оси испытываемого стержня. Фрагмент колебаний конструкции при определении положения точки покоя показан на рис. 2.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 3.

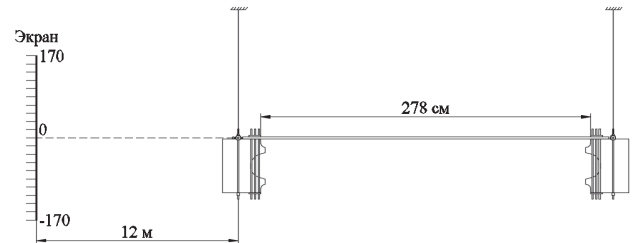


Рис. 3. Экспериментальная установка, подвешенная на тросах (расстояние до экрана на рисунке дано не в масштабе)
[Figure 3. Experimental model hanging on steel cables (the distance to the screen in the figure is not giving in scale)]

Вертикальный экран расположен на расстоянии 12 м по направлению вдоль стержня от ближайшей к экрану точки покоя. Экран расчерчен с шагом в 10 см между отметками –170 и 170 см.

При выведении стержня из положения равновесия по исследуемой форме в нем появляется деформация, весьма близкая к чистому изгибу, что было проверено расчетным путем. Также было определено, что, когда лазерное пятно попадает на отметку 170 см, в крайних волокнах образца возникают напряжения 2000 кг/см^2 . В качестве расчетного допущения мы приняли, что угол поворота точки подвеса пропорционален смещению лазерного пятна на экране по вертикали при равномерно расчерченной шкале. Питание лазера осуществлялось от батареи, таким образом колебания не стеснялись проводами.

Как недостаток рассматриваемой методики можно отметить то обстоятельство, что образец имеет стенки, в пределах которых эпюра меняется по линейному закону, что приводит к занижению параметров демпфирования материала. Идеал, к которому надо стремиться, имеет место при одноосном растяжении. Рассматриваемый нами чистый изгиб лишь приближается к этому идеалу.

Далее выполняется запись движения лазерного луча на видеокамеру. Записанные колебания имеют частоту, хорошо совпадающую с теоретической, что подтверждает удовлетворительное качество экспериментальной формы и конечно-элементной модели. Способ записи колебаний, описанный выше, ранее был использован в работах [9; 10].

2. Результаты исследований

Было проведено два эксперимента для длины пролета стержня 278 см. Во втором случае мы уменьшали частоту собственных колебаний путем добавления грузов к системе. Грузы по 5 кг крепились к жестким плитам при помощи шпилек и плотно притягивались гайками. На каждую плиту было навешено по 40 кг. После этого точки покоя выставлялись в новое положение.

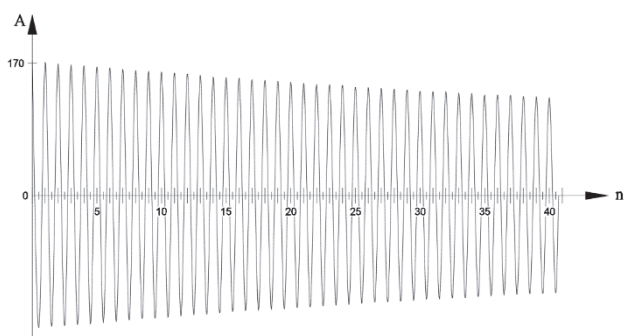


Рис. 4. График затухания колебаний конструкции при $v_1^e = 2,22$ Гц (установка без дополнительных грузов)
[Figure 4. The graph of the damped oscillations at frequency $v_1^e = 2,22$ Hz (model without additional weights)]

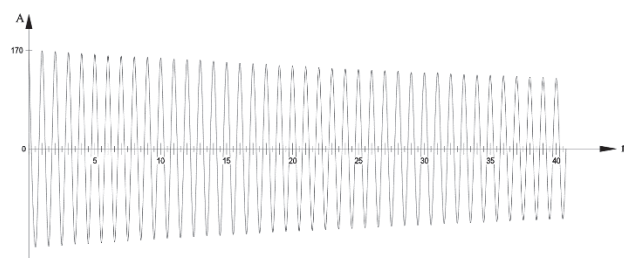


Рис. 5. График затухания колебаний конструкции при $v_2^e = 1,58$ Гц (установка с дополнительными грузами)
[Figure 5. The graph of the damped oscillations at frequency $v_2^e = 1,58$ Hz (model with additional weights)]

После анализа видеозаписей были построены графики затухания для первых 40 циклов колебаний для обоих случаев. Графики представлены на рис. 4 и 5. Также были получены экспериментальные значения технических частот собственных колебаний для двух случаев. Они оказались равны $v_1^e = 2,22$ Гц, $v_2^e = 1,58$ Гц. Разность частот, как видно, достаточно значительная для того, чтобы могла проявиться частотная зависимость внутреннего трения в соответствии с теорией Фойгта.

По графикам видно, что затухание колебаний происходит слабо. В обоих рассмотренных случаях амплитуда за один цикл убывает менее чем на 1 % ($\approx 0,9$ %). Это говорит о том, что доля затухания, относящаяся к внутреннему сопротивлению материала, есть крайне небольшая величина.

Логарифмические декременты с осреднением по первым 40 циклам оказались равными $\delta_1^{40} = 0,0076$, $\delta_2^{40} = 0,0082$. Отсюда можно сделать вывод, что величина логарифмического декремента почти не зависит от частоты колебаний, что противоречит гипотезе Фойгта, что также отмечалось рядом специалистов [11–15]. Кроме того, при сильном уменьшении амплитуды декремент колебаний резко уменьшается. Отметим, что в обоих исследованных случаях полное затухание колебаний не наступало и через 10 минут наблюдения (в этот момент времени запись прекращалась).

Выводы

Точки покоя легко определяются теоретическим путем, и их использование можно рекомендовать в экспериментах по внутреннему трению.

Для обычной малоуглеродистой стали декремент колебаний оказался небольшим (около 0,008) и практически независимым от частоты колебаний при максимальных напряжениях цикла порядка предела упругости.

Список литературы

1. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Корягин С.И. Внутреннее трение при продольных колебаниях троса // Вестник Балтийского федерального университета имени И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки. 2017. № 3. С. 84–92.
2. Read T.A. The internal friction in single metal crystals // Physical review. 1940. Vol. 58. Pp. 371–380.
3. Вронская Е.С. Динамический расчет призматических систем с учетом внутреннего трения // Градостроительство и архитектура. 2017. № 3. С. 24–27.
4. Хромов В.Г., Хромов И.В., Хромов Е.В. Методика определения интегрального коэффициента внутреннего трения для поперечных колебаний стержня // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2016. № 3. С. 3–7.
5. Вешкин М.С., Гребенюк Г.И. Об использовании комплексной модели внутреннего трения в расчетах стержневых систем на импульсные воздействия // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2019. № 5. С. 5–17.
6. Сеницкий Ю.Э. Об учете сил внутреннего трения в нестационарных задачах динамики // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Естественные науки и техносферная безопасность. 2017. С. 182–186.
7. Novick A.S. Variation of amplitude-dependent internal friction in single crystals of copper with frequency and temperature // Physical review. 1950. Vol. 80. No. 2. Pp. 249–257.
8. Хромов О.В. Экспериментальное исследование характеристик внутреннего трения стальных спираль-

ных канатов и проволоки // Труды Одесского политехнического университета. 2009. № 1. С. 32–35.

9. Платнов П.О. Эксперимент по проверке частотной независимости внутреннего трения // Аспирантские чтения: сборник научных статей аспирантов ИПСС РУТ (МИИТ). 2018. С. 66–70.

10. Зылев В.Б., Григорьев Н.А. Обобщенная модель Прандтля для учета сил внутреннего трения // Строительная механика и расчет сооружений. 2011. № 11. С. 58–62.

11. Давиденков Н.Н. Обзор о рассеянии энергии при вибрациях // Журнал технической физики. 1938. Т. 8. Вып. 6. С. 483–499.

12. Писаренко Г.С. Колебания упругих систем с учетом рассеяния энергии в материале. Киев: Изд-во Академии наук Украинской ССР, 1955. 240 с.

13. Сорокин Е.С. Метод учета неупругого сопротивления материала при расчете конструкций на колебания // Исследования по динамике сооружений. 1951. С. 5–90.

14. Сорокин Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем. М.: Госстройиздат, 1960. 154 с.

15. Пановко Я.Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем. М.: Гос. изд-во физико-математической литературы, 1960. 193 с.

RESEARCH PAPER

The use of fixed points in experimental research of the internal friction of material

Vladimir B. Zylev, Pavel O. Platnov*

Russian University of Transport, 9 Obratsova St., Moscow, 127994, Russian Federation

*zylev@ya.ru

Article history:

Received: May 11, 2019

Revised: October 04, 2019

Accepted: October 10, 2019

For citation

Zylev V.B., Platnov P.O. (2019). The use of fixed points in experimental research of the internal friction of material. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(5), 399–404. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-399-404>. (In Russ.)

Abstract

The aim of the work. The work is devoted to experimental research of internal friction parameters of the material. **Methods.** The research of internal friction is carried out by consideration of damped oscillations of the experimental system that consist of rigid plates and a specimen in a state of pure bending. We propose to locate bearings in the fixed points to minimize energy losses in support fastenings. Fixed points are determined by using a finite element complex with consideration of free oscillations of the loose model. **Results.** Damping curves were determined, which demonstrate a very small logarithmic decrement of oscillations and frequency independence of inertial friction. The main result of the work is the tested improvements of the experimental technique, among which the main one is the use of fixed points for determining the places of fastening of the laboratory installation

Keywords: experimental determination of internal friction in a material; laboratory experimental model; determination of fixed points by finite element method; minimization of energy losses in support fastenings; logarithmic decrement of oscillations; frequency independence of inertial friction

References

1. Velikanov N.L., Naumov V.A., Koryagin S.I. (2017). Vnutrennee trenie pri prodol'nyh kolebaniyah trosa [The internal friction in longitudinal oscillations of the wire rope]. *Journal of I. Kant Baltic Federal University. Series: Physical, Mathematical and Technical Sciences*, (3), 84–92. (In Russ.)

2. Read T.A. (1940). The internal friction in single metal crystals. *Physical review*, 58, 371–380.

3. Vronskaya E.S. (2017). Dinamicheskij raschet prizmaticheskikh sistem s uchetom vnutrennego treniya [Dynamic calculation of prismatic systems taking into account inter-

nal friction]. *Urban planning and architecture*, (3), 24–27. (In Russ.)

4. Khromov V.G., Khromov I.V., Khromov E.V. (2016). Metodika opredeleniya integral'nogo koeffitsienta vnutrennego treniya dlya poperechnykh kolebanij sterzhnya [Method of determining integral coefficient of internal friction for transverse vibrations of a rod]. *Fundamental and applied problems of engineering and technology*, (3), 3–7. (In Russ.)

5. Veshkin M.S., Grebenyuk G.I. (2019). Ob ispol'zovanii kompleksnoj modeli vnutrennego treniya v raschetakh sterzhnevyykh sistem na impul'snye vozdeystviya [On the use of the complex model of internal friction in calculation of rod systems on pulse impacts]. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*, (5), 5–17. (In Russ.)

6. Senitskiy Y.E. (2017). Ob uchete sil vnutrennego treniya v nestacionarnykh zadachah dinamiki [About the ac-

Vladimir B. Zylev, Doctor of Science (Technical), Professor, Head of the Department of Structural Mechanics.

Pavel O. Platnov, PhD student of the Department of Structural Mechanics.

count of internal friction forces in non-stationary problems of dynamics]. *Traditions and Innovations in Construction and Architecture. Natural Sciences and Technosphere Safety* (pp. 182–186). (In Russ.)

7. Novick A.S. (1950). Variation of amplitude-dependent internal friction in single crystals of copper with frequency and temperature. *Physical review*, 80(2), 249–257.

8. Khromov O.V. (2009). Eksperimental'noe issledovanie harakteristik vnutrennego treniya stal'nyh spiral'nyh kanatov i provoloki [Experimental research of internal friction characteristics of steel spiral ropes and wires]. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*, (1), 32–35. (In Russ.)

9. Platnov P.O. (2018). Eksperiment po proverke chasotnoj nezavisimosti vnutrennego treniya [Experimental verification of the frequency independence of internal friction]. *Postgraduate recitations: collection of scientific articles of RUT postgraduates* (pp. 66–70). (In Russ.)

10. Zylev V.B., Grigor'ev N.A. (2011). Obobshchennaya model' Prandtlya dlya ucheta sil vnutrennego treniya [Generalized Prandtl model for the account of internal friction forces]. *Construction mechanics and calculation of structures*, (11), 58–62. (In Russ.)

11. Davidenkov N.N. (1938). Obzor o rasseyanii energii pri vibratsiyakh [Overview of energy dissipation in vibrations]. *Journal of Technical Physics*, 8(6), 483–499. (In Russ.)

12. Pisarenko G.S. (1955). *Kolebaniya uprugih sistem s uchetom rasseyaniya energii v materiale* [Oscillations of elastic systems taking into account the energy dissipation in the material]. Kiev: Akademiya nauk Ukrainskoj SSR Publ. (In Russ.)

13. Sorokin E.S. (1951). Metod ucheta neuprugogo soprotivleniya materiala pri raschete konstruktsii na kolebaniya [Method of accounting for inelastic resistance of the material in the calculation of structures under vibrations]. *Research on the dynamics of structures* (pp. 5–90). (In Russ.)

14. Sorokin E.S. (1960). *K teorii vnutrennego treniya pri kolebaniyah uprugih sistem* [On the theory of internal friction at oscillations of elastic systems]. Moscow: Gosstroyizdat Publ. (In Russ.)

15. Panovko Ya.G. (1960). *Vnutrennee trenie pri kolebaniyah uprugih sistem* [The internal friction at oscillations of elastic systems]. Moscow: Izdatel'skij dom fiziko-matematicheskoy literatury Publ. (In Russ.)