

PACS: 62.40.+i

В.А. Белошенко, В.Б. Примислер, Н.П. Пилипенко, А.Н. Пилипенко

## ТЕХНИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МЕТОДА НИЗКОЧАСТОТНОГО ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины  
ул. Р. Люксембург, 72, г. Донецк, 83114, Украина

Статья поступила в редакцию 7 ноября 2005 года

*Представлен краткий обзор развития метода низкочастотного внутреннего трения (ВТ). Рассмотрены два основных метода измерений, основанные на использовании крутильного маятника и отличающиеся режимами колебаний. Показаны их достоинства и недостатки. Описан новый подход к конструированию установок ВТ, заключающийся в объединении режимов свободнотухающих и вынужденных колебаний в одной автоматизированной системе.*

### Введение

Современный уровень развития науки и техники диктует необходимость создания материалов, способных работать в экстремальных условиях и обладающих особыми функциональными и механическими свойствами. В их число входят металлы, керамика, полимеры, композиты. В последние годы особый интерес вызывают объекты в неравновесном, в частности наноструктурном, состоянии. При приложении внешнего статического или циклического нагружения, а также при повышении температуры в таких неравновесных материалах происходит структурная релаксация, которая дает значительный вклад в изменение физико-механических свойств. Указанные изменения можно исследовать с помощью одного из наиболее структурночувствительных методов, используемых в физическом материаловедении, – метода низкочастотного ВТ, состоящего в измерении поглощения энергии механических колебаний фононными подсистемами и различными дефектами структуры.

Методика ВТ как эффективный инструмент изучения структурного состояния, деформационных и релаксационных процессов, фазовых превращений в функциональных и конструкционных материалах развивалась непрерывно со времени появления первых работ в сороковых годах. Существенное совершенствование экспериментальной техники состоялось в семидесятих годах прошлого столетия. Прежде всего это относится к констру-

ции и аппаратурному обеспечению обратного крутильного маятника, предназначенного для измерения ВТ методом свободнотухающих колебаний на частотах  $\sim 1$  Нз при изменении температуры и амплитуды деформации. Позднее появилась необходимость проводить измерения ВТ при более низких частотах (субрезонансная методика). Вначале эта методика широко использовалась только для изучения материалов с высоким уровнем демпфирования (например, полимеров). Для металлов и керамики она долгое время не применялась из-за низкой чувствительности. По мере усовершенствования субрезонансная методика, основанная на режиме вынужденных колебаний, тоже получила широкое применение, поскольку позволила проводить исследования в большом частотном диапазоне при фиксированной температуре и низких значениях амплитуды деформации.

### Методы свободнотухающих колебаний

Для измерения ВТ и модулей упругости в режиме свободнотухающих колебаний используется крутильный маятник [1,2]. Механические потери, которые являются мерой ВТ, определяются чаще всего в диапазоне частот 0.2–20 Нз. ВТ измеряется при постоянной частоте с изменением температуры или амплитуды колебаний.

Относительная амплитуда деформации кручения исследуемого образца  $\varepsilon$  находится по формуле [3]:

$$\varepsilon = \frac{r\varphi}{l},$$

где  $\varphi$  – угол закручивания;  $r$  – радиус сечения;  $l$  – рабочая длина образца.

Величина ВТ определяется как

$$Q^{-1} = \frac{1}{\pi n} \ln \frac{A_m}{A_{m+n}}$$

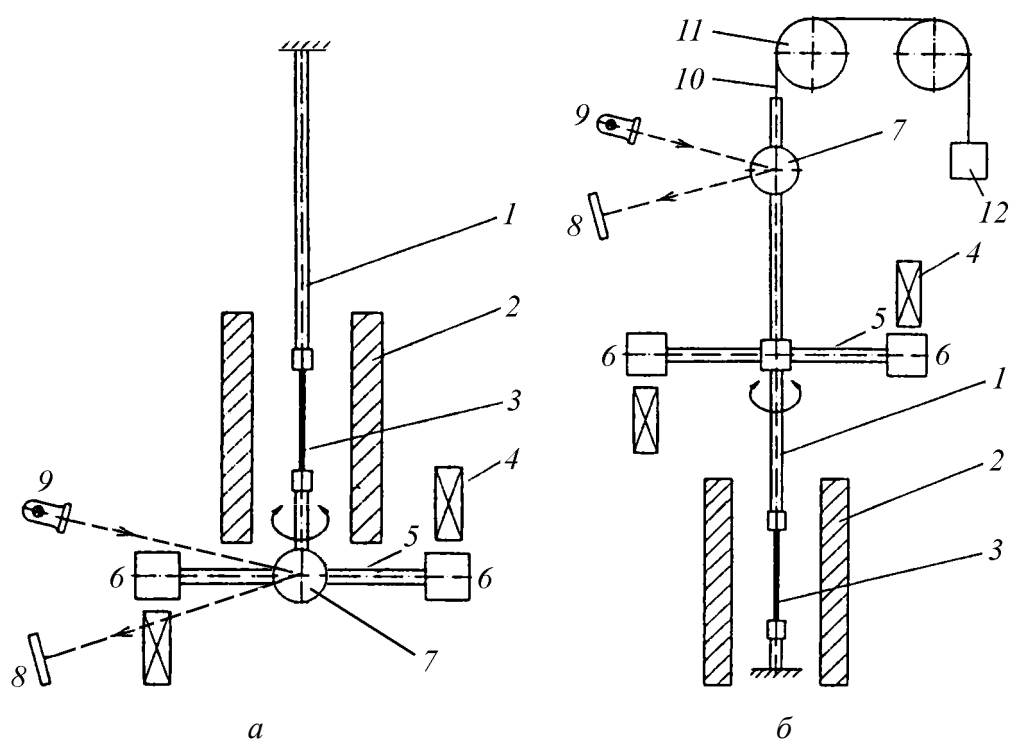
или

$$Q^{-1} = \frac{\delta}{\pi},$$

где  $A_m$  и  $A_{m+n}$  – соответственно начальная и конечная амплитуды, выбранные для отсчета числа колебаний;  $n$  – число колебаний;  $\delta$  – логарифм уменьшения амплитуды колебаний в единицу времени.

Крутильный маятник имеет ряд модификаций. В прямом маятнике (рис. 1,а) инерционное коромысло, как правило, подвешивается к образцу. Однако под действием массы коромысла индуцируется продольное напряжение, что приводит к деформации ползучести образца при высокой температуре. Ползучесть становится заметной при температуре выше  $0.6T_m$  (где  $T_m$  – температура плавления).

Этот недостаток в значительной мере был преодолен в конструкции [4], где отсутствует инерционная система в виде коромысла, а осевая нагрузка



**Рис. 1.** Схемы установок на основе прямого (*а*) и обратного (*б*) маятников со свободнзатухающими колебаниями: 1 – вертикальный стержень, 2 – печь, 3 – образец, 4 – электромагниты, 5 – горизонтальный стержень, 6 – грузики, 7 – зеркало, 8 – оптический детектор, 9 – источник света, 10 – нить подвеса, 11 – блоки, 12 – противовес

на образец обусловлена лишь весом постоянного магнита и маленького зеркала, прикрепленных к его свободному концу. В режиме свободнзатухающих колебаний измерения ВТ осуществляются как на основной частоте, так и на гармониках.

У обратного крутильного маятника (рис. 1,*б*) инерционное коромысло помещается над образцом, а подвижная масса уравнивается противовесом. В результате одноосная деформация практически исключается даже при очень высоких температурах.

Для исследования образцов с большим поперечным сечением или жесткостью в работе [5] предложен модифицированный обратный маятник, особенностью конструкции которого является наличие второй нити подвеса, размещенной между инерционным коромыслом и образцом. Маятник работает на частотах  $\sim 1$  Hz и позволяет измерять ВТ при очень малых ( $10^{-8}$ – $10^{-6}$ ) амплитудах деформации.

Использование автоматики расширяет возможности крутильных маятников, работающих в режиме свободнзатухающих колебаний. На рис. 2 показана схема одной из наиболее удачных установок на основе прямого маятника, достаточно часто использовавшейся при исследовании разнообразных материалов [4,6–8].



Рис. 2. Схема автоматической установки ВТ на основе прямого маятника

Типичным примером современного обратного маятника, работающего в режиме свободнзатухающих колебаний, является прибор, описанный в работе Д.К. Даукеева с соавторами [9]. Он представляет собой автоматизированную систему, где в качестве датчика колебаний выбран сканистор, работающий под управлением миниЭВМ. Эта система позволяет не только получать температурные и амплитудные зависимости ВТ, но и наблюдать их в процессе измерений.

В более поздних работах также применяются полуавтоматические [10] или автоматические [11–13] схемы управления, но уже с использованием последних достижений в этой области. Обобщенная схема автоматической установки ВТ на основе обратного маятника приведена на рис. 3.

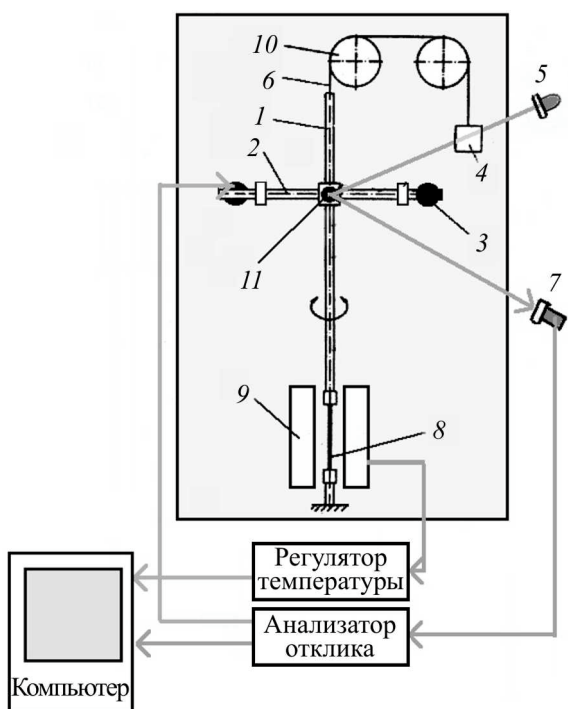
### Методы вынужденных колебаний

Субрезонансные методики, базирующиеся на вынужденных колебаниях, предусматривают деформирование образцов с одновременным измерением прикладываемого синусоидального напряжения постоянной амплитуды, а также измерение амплитуды деформации, которую это напряжение вызывает, и разницы фаз между напряжением и деформацией. Отставание по фазе деформации  $\varphi$  от прикладываемого к материалу напряжения связано с ВТ как

$$Q^{-1}(\omega) = \operatorname{tg}\varphi(\omega) \quad \text{при } \omega \ll \omega_R,$$

где  $\omega$  – частота колебаний,  $\omega_R$  – резонансная частота.

Указанные методы позволяют исследовать релаксационные спектры материалов в диапазоне частот  $10^{-5}$ –20 Hz (при разрешении  $Q^{-1} \approx 10^{-4}$ ), что



**Рис. 3.** Обобщенная схема автоматической установки ВТ на основе обратного маятника: 1 – вертикальный стержень, 2 – горизонтальный стержень с грузиками, 3 – электромагниты, 4 – противовес, 5 – источник света, 6 – нить подвеса, 7 – оптический детектор, 8 – образец, 9 – печь, 10 – блоки, 11 – зеркало

существенно расширяет возможности ВТ. До появления цифровых систем основные трудности были связаны с точным определением очень низких значений  $Q^{-1}$ , например, в случае кристаллических материалов, подвергаемых малым деформациям. Большинство современных установок, реализующих методику вынужденных колебаний, являются автоматизированными системами, которые с помощью периферийных устройств, аппаратных комплексов и компьютерных программ осуществляют управление сбором, анализом и обработкой информации.

В методе крутильного маятника с вынужденными колебаниями точность измерений зависит, с одной стороны, от электронной, а с другой – от механической частей устройства. В настоящее время цифровая обработка сигнала позволяет проводить измерения отставания по фазе с разрешением  $10^{-5}$  rad, и основной причиной, снижающей точность определения ВТ, является механическая часть маятника.

Главным требованием к маятнику является создание высокой собственной частоты, необходимой для того, чтобы повысить верхний предел измерений. Это предполагает, в частности, использование легких и коротких, но одновременно достаточно жестких подвижных частей, расположенных между образцом и подвеской. Однако наличие таких коротких элементов затрудняет проведение измерений при высоких или низких температурах. Вместе с тем нить подвеса должна иметь минимальную жесткость при кручении с высокой поперечной устойчивостью. Отмеченные условия являются до некоторой степени противоречивыми, поэтому необходимо найти наилучший компромисс.

В режиме вынужденных колебаний работают системы, использующие как прямой, так и обратный маятники. В статье [4] описана установка на основе прямого крутильного маятника для изотермического определения вязкоупругих свойств твердого тела при изменении частоты на 10 порядков ( $10^{-6}$ – $10^4$  Hz) (см. рис. 2). Закручивание образца с закрепленным концом осуществляется электромагнитом. Величина деформации определяется с помощью лазерного луча, который отражается от зеркала на дифференциальный фотодиод. Данное устройство эффективно при изучении материалов с высоким значением ВТ.

Большинство аппаратов для измерения ВТ в режиме вынужденных колебаний используют обратный маятник. В работе [14] описан подобный прибор с высокой собственной частотой. Он позволяет путем измерения фазовой задержки в диапазоне  $10^{-5}$ – $10$  Hz измерять как большие, так и малые значения  $Q^{-1}$ . Прибор работает в «ручном» режиме.

Интересным вариантом технического решения является установка, предложенная в работе [15]. Ее основа – обратный маятник, отличающийся от традиционного наличием второго упругого эталонного образца, что дает возможность исследовать только неупругую составляющую ВТ. Деформация образцов измеряется системой детектирования, состоящей из лазеров, зеркал и линейных датчиков, с выводом данных на компьютер.

Авторами [16] предлагается программируемая система, разработанная для измерения tgφ и динамического модуля упругости в широком ( $10^{-7}$ – $100$  Hz) диапазоне частот. Вся механическая часть, система возбуждения и печь с образцом находятся в вакуумированном цилиндре. Система пригодна для точных измерений при работе с короткими (рабочая длина 10 mm) образцами при уменьшенном влиянии вибрации.

В статье [17] описан прибор для исследования ВТ и механических свойств (модуля упругости, ползучести и релаксации напряжений) образцов при малых нагрузках и низких температурах. Эта установка, работой которой управляет микроЭВМ, представляет собой крутильный маятник с режимом вынужденных колебаний в области частот  $10^{-5}$ – $1$  Hz.

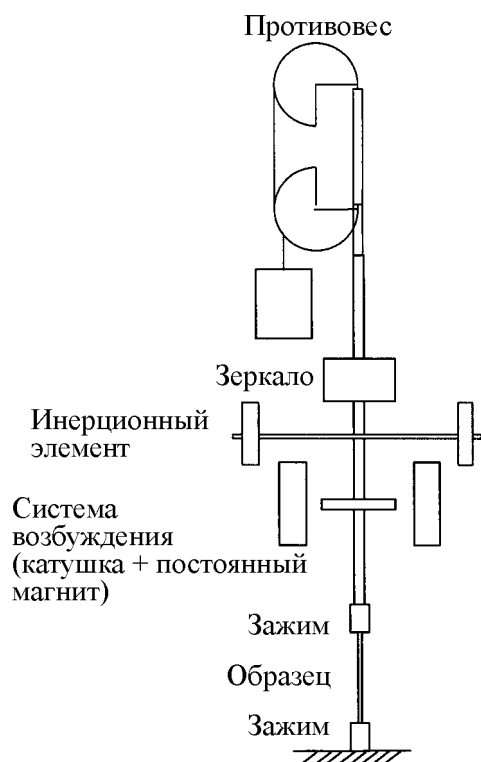
Разработка [18] дает возможность получать температурные и частотные спектры ВТ в режиме вынужденных колебаний при частотах  $10^{-4}$ – $10$  Hz в температурном интервале 80–1250 K.

В [19–24] имеется много данных, которые касаются описания отдельных элементов различных частей систем измерения ВТ, в частности механической, систем возбуждения, регистрации и обработки данных. Их анализ очень полезен при разработке и создании новых автоматизированных установок. Изучение этих данных показывает, что основным недостатком метода вынужденных колебаний, даже в условиях автоматизации измерений, является сложность определения сдвига фаз в области инфранизких частот. В результате он позволяет измерять  $Q^{-1}$  с разрешением до  $10^{-4}$ , в то время как метод свободнзатухающих колебаний дает  $Q^{-1} \approx 10^{-6}$ .

### Комбинированные методы

При исследовании широкого круга материалов (от полимеров до сверхпрочной керамики) и решении различных физических задач (от измерений коэффициентов затухания и упругих модулей до изучения структурных и фазовых превращений в сильнонеравновесных материалах при внешнем нагружении и изменении температуры) необходимо задействовать устройства, основанные на разных принципах – использовании свободнозатухающих и вынужденных колебаний. Сегодня имеются подобные устройства, которые способны работать в широком диапазоне температур, частот и амплитуд деформации. Они основаны на объединении в одной измерительной системе обоих методов ВТ, что целесообразно с точки зрения как удобства проведения эксперимента, так и экономии времени и средств.

Одно из подобных технических решений описано в авторском свидетельстве [19]. Установка ВТ может работать в двух режимах, причем возбуждение вынужденных колебаний осуществляется с помощью реверсивного двигателя. В.С. Биланичем предложена установка ВТ [25] с аналогичными возможностями, функционирующая в диапазоне частот  $10^{-3}$ –1.5 Hz. Современная система измерения ВТ двойного действия на базе обратного маятника (рис. 4) описана в [26]. При снятом маятнике она работает в режиме вынужденных колебаний, а при подсоединенном маятнике – в режиме свободнозатухающих колебаний. Диапазон частот  $10^{-3}$ –100 Hz.



**Рис. 4.** Схема обратного маятника для измерения ВТ в режиме свободнозатухающих и вынужденных колебаний

В устройствах, разработанных авторами [25,26], кроме указанных выше преимуществ, существует еще и возможность проводить измерения на одном и том же образце без его перемонтажа, что снижает опасность дополнительных механических воздействий на образец. Вместе с тем здесь также есть некоторые конструктивные недостатки. Оба они имеют один источник возбуждения колебаний, установленный в первом случае на концах инерционного коромысла маятника, а во втором – на несущем стержне (рис. 4). В результате возникают проблемы с генерацией колебаний соответственно малой или большой амплитуды. Это нужно учитывать при создании новых универсальных установок ВТ.

### Заключение

Пройдя путь от простых устройств, основанных на использовании одной из разновидностей крутильного маятника, до сложных автоматизированных систем, позволяющих проводить измерения при варьировании целого ряда параметров, низкочастотное ВТ сегодня является широко востребованным методом неразрушающих испытаний, пригодным для изучения множества явлений и процессов и часто не имеющим альтернативы. Наличие в научном подразделении установок ВТ, регистрирующих тончайшие изменения в структуре и механических свойствах материала, свидетельствует о высоком уровне проводимых здесь исследований. Вместе с тем, как следует из приведенного обзора, имеется необходимость в дальнейшем развитии и усовершенствовании данного метода. Очевидно, что новые технические решения должны базироваться на подходе, предусматривающем возможность измерения ВТ в режиме свободнотухающих и вынужденных колебаний на одном и том же образце без его перемонтажа. При этом системы обеспечения жизнедеятельности установки, возбуждения и регистрации колебаний, управления изменяемыми параметрами, обработки экспериментальных данных должны составлять единый автоматизированный комплекс, позволяющий получать большой объем достоверной информации при сравнительной простоте в эксплуатации.

1. *В.С. Постников*, Внутреннее трение в металлах, Металлургия, Москва (1974).
2. *М.А. Криштал, С.А. Головин*, Внутреннее трение и структура металлов, Металлургия, Москва (1976).
3. *Л.Т. Тимошук*, Механические испытания металлов и сплавов, Металлургия, Москва (1971).
4. *M. Brodt, L.S. Cook, R.S. Lakes*, Rev. Sci. Instr. **66**, 5292 (1995).
5. *T.S. Collete*, C. R. Acad. Sci. Paris **246**, 2756 (1958).
6. *L.K. Edwards, R.S. Lakes, W.A. Nixon*, J. Appl. Phys. **87**, 1135 (2000).
7. *Y.C. Wang, M. Ludwigson, R.S. Lakes*, Mater. Sci. Eng. **A370**, 41 (2004).
8. *R.S. Lakes*, Rev. Sci. Instr. **75**, 797 (2004).
9. *Д.К. Даукеев, Б.И. Медеуов, И.В. Хромушин, Р.М. Айтмамбетов*, ПТЭ № 4, 184 (1992).
10. *C.R. Grandini*, Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo **21**, №1–2, 13 (2002).
11. *V.G. Gavriljuk, O. Söderberg, V.V. Bliznuk, N.I. Glavatska, V.K. Lindroos*, Scripta Mat. **49**, 803 (2003).
12. *T.C. Niemeyer, J.M.A. Gimenez, L.H. Almeida, C.R. Grandini, O. Florencio*, Mat. Research **5**, 143 (2002).
13. *O. Florencio, P.S. Silva, Jr., W.J.B. Filho, C.R. Grandini*, Mat. Research **6**, 541 (2003).
14. *J. Woigard, Y. Sarrazin, H. Chaumet*, Rev. Sci. Instr. **48**, 1322 (1977).
15. *P. Gadaud, B. Guisolan, A. Kulik, R. Schaller*, Rev. Sci. Instr. **61**, 2761 (1990).
16. *J. Woigard, Ph. Mazot, A. Riviere*, J. Physique, Col. C5, **42**, № 11, C5–1135 (1991).



17. *S. Etienne, J.Y. Cavaille, J. Perez*, Rev. Sci. Instr. **53**, 1261 (1982).
18. *I. Gutierrez-Urrutia, M.L. No, E. Carreno-Morelli, B. Guisolan, R. Schaller, J. San Juan*, Mater. Sci. Eng. **A370**, 435 (2004).
19. *В.С. Постников, М.М. Поцелуев, Ю.К. Шлык, В.И. Ковалевский*, А.с. SU 1041914, МКИ G 01 N 11/16, Устройство для измерения внутреннего трения в диапазоне инфранизких частот, опубл. 15.09.83. Б. № 34
20. *В.А. Гречишкин, В.Г. Шаталов, В.К. Алтухов, Л.А. Квачева*, А.с. SU 972329 МКИ G 01 N 11/16, Крутильный маятник, опубл. 07.11.82. Б. № 41
21. *В.А. Ломовской, Г.М. Бартнев, Г.М. Синуцына*, А.с. SU 1778627 МКИ G01N 11/16, Крутильный маятник, опубл. 07.11.82. Б. № 41.
22. *A.P. Thiruvengadam, A.A. Hochrein, Jr.*, United States Patent 4,231,259, G 01 № 29/00, G 01 № 11/16, Method and apparatus for non-destructive evaluation utilizing the internal friction damping (IFD) technique, November 4, 1980.
23. *K. Matsushita; T. Okamoto, M. Shimada, H. Takeuchi*, United States Patent 4,794,798, G 01 № 3/00, Device for measuring Young's modulus and internal friction of specimen, January 3, 1989.
24. *O. Chrithian, C. Brun et al*, United States Patent 4,852,406, G 01 № 27/80, Method and apparatus for determining the coefficient of internal friction of steel or the like, August 1, 1989.
25. *В.С. Биланич*, Автореф. канд. дис., Ужгородский университет, Ужгород (1993).
26. *M. Weller, H.-R. Damson*, Quasicrystals – Structure and Physical Properties, Trebin (ed.), Wiley-VCH, Weinheim (2003).

*V.A. Beloshenko, V.B. Primisler, N.P. Pilipenko, A.N. Pilipenko*

## TECHNICAL LEVEL AND TRENDS OF DEVELOPMENT OF THE LOW-FREQUENCY INTERNAL FRICTION METHOD

A brief review of development of the low-frequency internal friction (IF) method is presented. Two basic methods of measurement based on using the torsion pendulum and differing in oscillation modes have been considered. Merits and demerits of the methods are shown. New approach to design of the internal friction facility consisting in combination of both free damping and forced oscillation modes in a single automatic system has been described.

**Fig. 1.** Scheme of apparatus based on direct (*a*) and inverted (*b*) pendulum with free damping oscillations: 1 – vertical rod, 2 – heater, 3 – specimen, 4 – electromagnets, 5 – horizontal rod, 6 – weights, 7 – mirror, 8 – optical detector, 9 – light source, 10 – support wire, 11 – pulleys, 12 – counterweight

**Fig. 2.** Scheme of automatic apparatus for IF on direct pendulum base

**Fig. 3.** Generalized scheme of IF automatic apparatus based on inverted pendulum: 1 – vertical rod, 2 – horizontal rod, 3 – electromagnets, 4 – counterweight, 5 – light source, 6 – support wire, 7 – optical detector, 8 – specimen, 9 – heater, 10 – pulleys, 11 – mirror

**Fig. 4.** Scheme of inverted pendulum for IF measuring at free damping and forced oscillations