

Научная статья
УДК 677.017.4:620.171.3
EDN ZKJAJW
doi 10.34216/2587-6147-2023-3-61-17-22

Александр Валерьевич Орлов¹

Евгений Львович Пашин²

¹ Костромской государственной университет, г. Кострома, Россия

² Костромская государственная сельскохозяйственная академия, г. Кострома, Россия

¹ aorlov@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4995-3393>

² evgpashin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5871-874X>

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА ВЕРИФИКАЦИИ РАЗРЫВНОЙ МАШИНЫ КОПРОВОГО ТИПА ПО ПОТЕРЯМ ЭНЕРГИИ НА ТРЕНИЕ

Результаты исследований, представленные в статье, получены при грантовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-26-00147).

Аннотация. В статье представлены результаты исследований, связанных с совершенствованием метода верификации копровых машин, в частности разрывной машины К-1. Рассматривается параметр потерь энергии на трение. Из анализа применяемых на практике методов оценки этого параметра следует, что они не учитывают влияние изменения скорости перемещения маятника при испытании. Это вносит системную погрешность в результаты измерения и ограничивает область применения таких машин. С помощью скоростного метода регистрации движения маятника предложено оценивать влияние сил трения в различные моменты времени, используя модель, описывающую величину сил трения как линейную комбинацию известных параметров движения маятника, таких как угловые координата, скорость и ускорение. При этом вес составляющих, а также значение момента инерции маятника определяются методом наименьших квадратов с наложенными ограничениями. В итоге исследований создан алгоритм расчетов потерь энергии из-за действия паразитных сил сопротивления маятника копровых машин К-1 и программное обеспечение для его реализации.

Ключевые слова: копер, трение, верификация, момент сил трения, момент инерции, угловая скорость, потери энергии, разрывная машина К-1

Для цитирования: Орлов А. В., Пашин Е. Л. Совершенствование способа верификации разрывной машины копрового типа по потерям энергии на трение // Технологии и качество. 2023. № 3(61). С. 17–22. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2023-3-61-17-22>.

Original article

Alexander V. Orlov¹

Evgeny L. Pashin²

¹ Kostroma State University, Kostroma, Russia

² Kostroma State Agricultural Academy, Kostroma, Russia

IMPROVING THE METHOD OF PENDULUM IMPACTOR VERIFICATION IN REGARD TO ENERGY LOSS DUE TO FRICTION

Abstract. Article presents an attempt to improve the method of pendulum impactors, such as tensile strength testing machine K-1 in regard to energy loss due to friction. Analysis of existing methods suggests a discrepancy caused by ignoring the relationship between the energy loss caused by the tested material sample and that caused by friction. This introduces a systemic error and limits the applicability of such testing machines. Thanks to the modern rotational motion registration methods it becomes possible to estimate the intensity of friction at different points of the pendulum's trajectory. This leads to a model of friction forces' magnitude consisting of a linear combination of known motion parameters, such as angular coordinate, velocity and acceleration. The coefficients of this model can be determined using the non-negative variant of the least-squares method. This algorithm has been implemented into a software module for the K-1 testing machine.

Keywords: *pendulum, friction, verification, inertial momentum, angular velocity, energy loss, K-1 tensile strength tester*

For citation: Orlov A. V., Pashin E. L. Improving the method of pendulum impactor verification in regard to energy loss due to friction. *Technologies & Quality*. 2023. No 3(61). P. 17–22. (In Russ.) <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2023-3-61-17-22>.

Для испытания текстильных волокон и нитей предложена разрывная машина копрового типа [1], которая после широкой апробации и проверки предложена в качестве средства испытания (разрывная машина К-1) при оценке качества трепаного льняного волокна по ГОСТ Р 53484–2022 «Лен трепаный. Технические условия».

Для использования этой машины органами Росстандарта утверждена методика верификации (поверки) ее основных параметров. Этот процесс позволяет убедиться в соответствии параметров машины стандарту. Рассматриваемая методика сходна с методикой верификации маятниковых копров [2, 3], предусматривающей контроль затрат энергии, необходимой на преодоление сил трения, возникающих при перемещении маятника.

Контроль основан на оценке влияния всех сил сопротивления перемещению маятника, включая силы трения, в том числе в системе подвеса маятника. Это осуществляется путем определения потерь энергии маятником за половину периода колебаний на холостом ходу на основе знания угла зарядки маятника φ_0 и регистрации максимального угла отклонения маятника φ_{\max} (рис. 1).

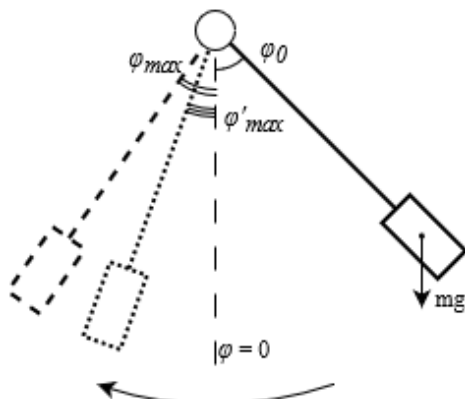


Рис. 1. Схема движения маятника копра

В стандартах [2, 3] приняты схожие методики энергетических потерь маятника копра. Различие состоит только в раздельном учете трения в стрелке индикатора (для механических индикаторов) и других видов трения. Энергопотери измеряются либо по результатам одного полупериода колебаний маятника на холостом

ходу, либо усредняются по результатам 20 полупериодов.

Анализ применяемых методик верификации копровых машин по потерям энергии из-за паразитных сил сопротивления выявил их недостатки. Отмечено, что энергия, затраченная на преодоление трения, представляет собой кумулятивную величину, определяемую не только величиной момента сил трения, но и углом поворота вала маятника:

$$E_{\text{тр}} = \int_{\varphi_0}^{\varphi_{\max}} M_{\text{тр}} d\varphi. \quad (1)$$

Поскольку при испытании часть энергии маятника будет затрачена на деформацию или разрушение испытываемого образца, максимальный достигнутый угол составит $\varphi'_{\max} < \varphi_{\max}$ (см. рис. 1). Как следствие, силы трения произведут меньшую работу, чем при холостом ходе, и оценка затраченной на взаимодействие с образцом энергии будет завышена. Величина этой погрешности будет тем выше, чем больше энергии потерял маятник.

В случае усреднения потерь по нескольким колебаниям маятника ошибка будет менее системной. Энергия маятника после N колебаний будет представлять собой убывающую последовательность, и оценка потерь от трения путем усреднения первых N членов этой последовательности будет ниже, чем потери на первом колебании. Как следствие, эта оценка может оказаться как выше, так и ниже потерь на трение во время рабочего хода маятника.

Считают, что указанным недостатком можно пренебречь в случаях, когда работа сил трения составляет пренебрежимо малую долю от общего запаса энергии маятника. Именно такое условие в виде допущения предусматривается в стандартах [2, 3]. Однако этот подход накладывает серьезные технические ограничения на область применения маятниковых копров для низкоэнергетических испытаний, например при оценке гибкости материалов [4]. Важным является и то, что конструкция подвеса, обеспечивающего достаточно малое трение, приводит к повышению стоимости испытательного устройства.

Более существенным фактором, требующим исключения указанного недостатка существующей методики оценки потерь энергии на трение, является зависимость момента сил трения $M_{тр}$ от скорости перемещения маятника $\dot{\varphi}$. Это объясняется наличием обоснованных моделей сил трения, имеющих линейную или квадратичную зависимость от $\dot{\varphi}$ [5]. В нижней точке траектории маятника копра почти вся его энергия представлена в виде кинетической энергии, которая зависит от скорости. Как следствие, потеря маятником энергии на взаимодействие с испытываемым образцом приведет к уменьшению скорости маятника, а значит, и к уменьшению величины момента сил трения. Это также внесет системную погрешность в оценку энергии, затраченной на взаимодействие с образцом.

Выходом из этой ситуации мог бы послужить подход, основанный на расчете работы, совершенной силами трения, как доли от потерь энергии на холостом ходу, пропорциональной длине траектории маятника. Однако для этого требуется принять допущение о постоянстве момента сил трения на всем протяжении траектории маятника [6]. Однако, как было указано выше, с учетом [5] это допущение далеко не всегда является корректным.

Чтобы избавиться от необходимости принятия такого допущения, был предложен альтернативный вариант. Он состоит в том, чтобы оценить распределение энергии, затрачиваемой на преодоление трения, по различным участкам траектории маятника. Это позволит не только учесть физические закономерности, описывающие поведение сил трения, но и потенциально адаптироваться к имеющему место варьированию величины силы трения из-за влияния мелких дефектов конструкции подвески маятника.

Несомненно, такой подход вносит свою техническую сложность, так как требует регистрации хода маятника на всем протяжении его траектории. Однако эта задача становится решаемой с помощью современных датчиков угловых перемещений, таких как используемые в машине К-1 инкрементальные энкодеры [7], а также быстродействующих вычислительных устройств, способных обрабатывать поступающие данные [8]. Используя эти средства, становится возможным измерить угловую координату φ маятника в каждый момент времени. Применяя же методы численного дифференцирования, рассчитываются значения угловой скорости $\dot{\varphi}$ и углового ускорения $\ddot{\varphi}$.

При такой реализации поставленной задачи ее решение осложняется тем, что не всегда

известен момент инерции маятника I . Определение его значения при известных значениях массы маятника и положении центра масс затруднено из-за существенного отличия формы маятника от геометрических примитивов, для которых известны формулы вычисления момента инерции. Это особенно верно для низкоэнергетических испытаний, проводимых с помощью маятников малой массы. Важно также отметить, что, наряду с определением значения момента инерции I , необходим расчет момента сил трения $M_{тр}$.

Для определения указанных характеристик предложено следующее. Приняв за точку отсчета угловой координаты нижнюю точку траектории маятника и выбрав положительное направление, совпадающее с движением маятника, опишем полную энергию маятника E как сумму потенциальной энергии $E_{п}$ и кинетической энергии $E_{к}$. Это представляется в виде

$$\begin{aligned} E &= E_{п} + E_{к} = \\ &= mgr(1 - \cos \varphi(t)) + \frac{1}{2} I \dot{\varphi}^2(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где m – масса маятника;

r – расстояние от оси вращения до центра масс маятника;

I – момент инерции маятника.

В этом случае мощность $W_{тр}$, развиваемую моментом сил трения, можно описать через производную энергии (2) по времени:

$$\begin{aligned} W_{тр}(t) &= -\frac{dE}{dt} = \\ &= -mgr \sin \varphi(t) \dot{\varphi}(t) - I \dot{\varphi}(t) \ddot{\varphi}(t). \end{aligned} \quad (3)$$

С другой стороны, работу, совершаемую силами трения, можно описать как интеграл момента силы трения по дуге, описываемой маятником по формуле (1). С учетом изменения момента силы трения во времени получим

$$E_{тр}(t) = \int_0^t M_{тр}(\tau) \dot{\varphi}(\tau) d\tau. \quad (4)$$

Продифференцировав (4) по времени, мы получим следующее выражение для описания мощности $W_{тр}$, развиваемой силами трения:

$$W_{тр}(t) = M_{тр}(t) \dot{\varphi}(t). \quad (5)$$

Из выражений (3) и (5) выводится равенство:

$$\begin{aligned} -mgr \sin \varphi(t) \dot{\varphi}(t) - I \ddot{\varphi}(t) &= \\ = M_{\text{тр}}(t) \dot{\varphi}(t). \end{aligned} \quad (6)$$

На основании существующих исследований [5] аппроксимируем зависимость изменения момента сил трения с помощью полинома второй степени от угловой скорости маятника:

$$M_{\text{тр}}(t) = k_0 + k_1 \dot{\varphi}(t) + k_2 \dot{\varphi}^2(t). \quad (7)$$

В условиях отсутствия дефектов в системе крепления вала маятника величина момента силы трения не должна убывать при возрастании скорости. В этом случае ни один из коэффициентов k_i не должен быть отрицательным. Теоретически, если схема испытания или особенности конструкции маятника предполагают более сложный закон изменения силы трения, от этого допущения можно будет отказаться.

Подставив (7) в (6), сократив обе части на $\dot{\varphi}(t)$ и преобразуя, получим следующее уравнение:

$$\begin{aligned} 1 \cdot k_0 + \dot{\varphi}(t) k_1 + \dot{\varphi}^2(t) k_2 + \ddot{\varphi}(t) I &= \\ = -mgr \sin \varphi(t). \end{aligned} \quad (8)$$

В уравнении (8) присутствуют четыре неизвестных величины (k_0 , k_1 , k_2 , I), относительно которых оно является линейным. Для определения этих величин можно воспользоваться тем фактом, что это соотношение должно выполняться для любого момента времени и любой точки траектории маятника. Поэтому возможно выбрать $N \geq 4$ моментов времени t_i и составить из N соответствующих вариантов уравнения (3) линейную систему.

В то же время значения угловой координаты φ могут быть подвержены погрешностям измерения, а значения угловой скорости $\dot{\varphi}$ и ускорения $\ddot{\varphi}$ могут содержать дополнительные погрешности, внесенные процессом численного дифференцирования. Как следствие, имеет смысл не ограничивать значение $N=4$, а составить переопределенную систему уравнений, содержащую все зарегистрированные участки траектории маятника. Такая переопределенная система может быть приближенно решена рядом методов, например методом наименьших квадратов [9]. С учетом принятых выше ограничений $k_i \geq 0$ и $I > 0$, рекомендуется использовать вариации метода, позволяющие накладывать граничные условия на значения неизвестных.

Такая методика может быть применена к любой модели момента сил трения, в том числе при повышенной степени полинома. Однако модель должна представляться линейной комбинацией известных параметров движения маятника. Тем не менее, во избежание чрезмерной адаптации (overfitting [10]), рекомендуется ограничиваться сравнительно простыми моделями, например полиномами второго порядка.

Предложенный алгоритм расчетов был реализован в виде программного модуля. Он принимает на вход таблично выраженный закон изменения угловой координаты $\varphi(t)$, построенный на базе данных, полученных при холостом ходе маятника массой m (в рассматриваемом примере $m = 69$ г со смещением центра масс $r = 40$ мм). С помощью методов численного дифференцирования [11] определяются значения угловой скорости $\dot{\varphi}$ и углового ускорения $\ddot{\varphi}$. Используя эти значения, а также известные величины m , r и g , была составлена и решена система уравнений (8). Для рассматриваемого примера получили оценочное значение $I = 2,42 \cdot 10^{-4}$ кг·м² и следующую закономерность изменения момента сил трения:

$$M_{\text{тр}}(\dot{\varphi}) = 1,58 \cdot 10^{-4} + 1,05 \cdot 10^{-5} \dot{\varphi} - 0 \cdot \dot{\varphi}^2.$$

Из анализа зависимости следует, что для данного варианта реализации маятникового копра вязкая составляющая трения оказалась пренебрежимо мала. С учетом изменения угловой скорости во времени итоговая закономерность изменения $M_{\text{тр}}(t)$ будет иметь вид, представленный на рис. 2.

На основании полученных значений были рассчитаны величины составляющих полной энергии маятника, представленные на рис. 3. Эти закономерности хорошо согласуются с общепринятыми представлениями о движении маятника, что подтверждает корректность вычислений. В частности, составляющая, представляющая собой ошибку измерения, остается близка к нулю на протяжении всего хода маятника.

Исходя из полученных результатов, было сделано заключение о применимости предлагаемого алгоритма контроля потерь энергии из-за трения для верификации машин копрового типа и, в частности, разрывной машины К-1.

ВЫВОДЫ

1. Установлена необходимость в повышении точности определения момента сил трения и момента инерции маятника в испытательных машинах копрового типа, так как существ-

вующие способы определения этих характеристик не учитывают влияние изменения скорости перемещения маятника при испытании, что вносит системную погрешность в результаты измерения, что ограничивает область применения таких машин.

2. На основе применения скоростного метода регистрации координат движения маятника предложено оценивать влияние сил трения в тот или иной момент времени.

3. Для оценки сил трения следует использовать модель, описывающую их величину как линейную комбинацию нескольких составляю-

щих, базирующихся на известных параметрах движения маятника, таких как угловые координата, скорость и ускорение. При этом вес составляющих, а также значение момента инерции маятника определяются методом наименьших квадратов с наложенными ограничениями.

4. Созданы алгоритм расчетов потерь энергии из-за действия сил сопротивления маятника копровых машин и программное обеспечение для его реализации, которые предложены для совершенствования существующей системы верификации результатов испытания с применением К-1.

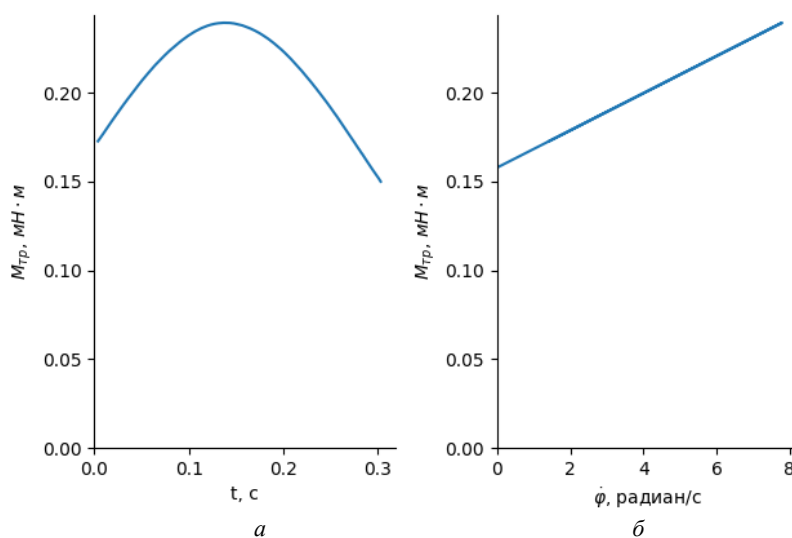


Рис. 2. Законы изменения $M_{тр}$ во времени (а) и в зависимости от скорости (б)

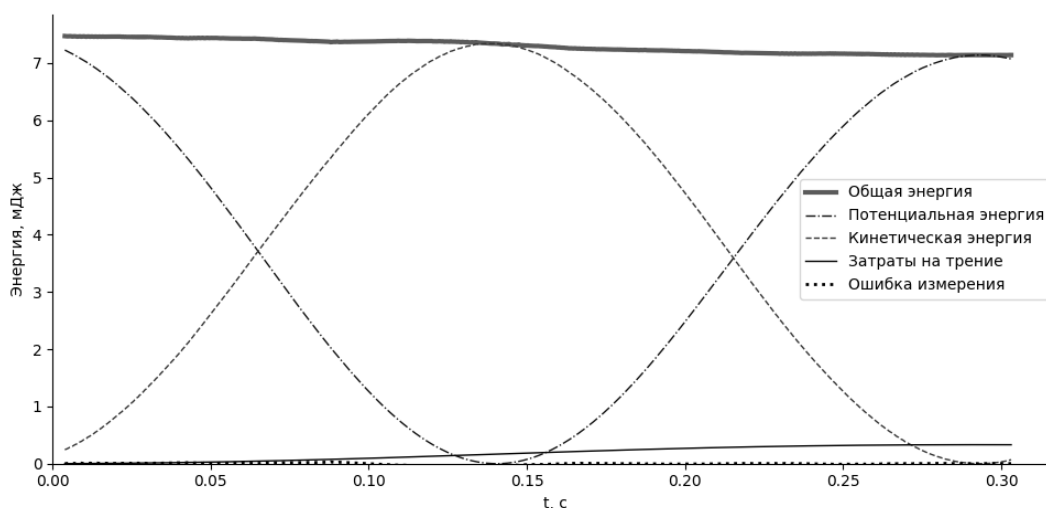


Рис. 3. Составляющие полной энергии маятника

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Орлов А. В., Пашин Е. Л. Испытательная система контроля разрывных характеристик волокон и нитей при скоростном растяжении // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. № 2. С. 60–64.
2. ГОСТ 10708–82. Копры маятниковые. Технические условия. Введ. 1983-07-01. М. : Изд-во стандартов, 1998. 8 с.

3. ГОСТ 34373–2017. Пластмассы. Верификация маятникового копра для испытания на удар. Испытание на ударную вязкость по Шарпи, Изоду и при ударном растяжении. Введ. 2018-06-01. М. : Стандартинформ, 2018. 33 с.
4. Патент РФ на изобретение № 2368902. Способ оценки гибкости волокна или луба лубяных культур : опубл. 27.09.2009, Бюл. № 27 / Пашина Л. В., Пашин Е. Л. ; Всероссийский научно-исследовательский институт по переработке лубяных культур Российской академии сельскохозяйственных культур.
5. Артюнин А. И. Учет сил сопротивления в опорах маятников при исследовании процесса автоматической балансировки роторов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. Т. 63, № 3. С. 53–58.
6. Орлов А. В., Пашин Е. Л. Совершенствование алгоритма определения разрывного усилия волокна при испытании на машине копрового типа // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2022. № 1. С. 103–107.
7. ЛИР-158Б. Инкрементный угловой энкодер // СКБ ИС : офиц. сайт. URL: <https://skbis.ru/catalog/rotary/incremental-rotary-encoders/lir-158b> (дата обращения: 4.06.2023).
8. Орлов А. В., Пашин Е. Л. Совершенствование контроля разрывных характеристик волокон (нитей) при использовании разрывной машины копрового типа // Дизайн и технологии. 2020. № 80. С. 81–89.
9. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. М. : Физматгиз, 1962. 349 с.
10. Vapnik V. N. Statistical learning theory. New York : John Wiley, 1998. 736 с.
11. Орлов А. В., Пашин Е. Л. Совершенствование методики расчета углового ускорения активного зажима для определения усилия разрыва волокна на машине копрового типа // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2022. № 4. С. 37–42.

REFERENCES

1. Orlov A. V., Pashin E. L. Measurement and testing system for tensile properties of fibers and threads undergoing high-speed stretching. *Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov* [Factory laboratory. Material diagnostics]. 2019;2:60–64. (In Russ.)
2. *GOST 10708–82. Koprj mayatnikovyje. Tekhnicheskie usloviya* [State Standart 10708–82. Pendulum impactors. Technical specifications]. Moscow, Publishing House of Standards, 1998. 8 p. (In Russ.)
3. *GOST 34373–2017. Plastmassy. Verifikaciya mayatnikovogo kopra dlya ispytaniya na udar. Ispytanie na udarnuyu vyazkost' po SHarpi, Izodu i pri udarnom rastyazhenii* [State Standart 34373–2017. Plastics Pendulum inspection for shock test. Charpy, Izod and impact tensile impact test]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 33 p. (In Russ.)
4. Pashina L. V., Pashin E. L. Method of estimating flexibility of fibers or bast of bast plant strains. Russia patent no 2368902, published 27.09.2009, bulletin no 27. (In Russ.)
5. Artunin A. I. Taking into account friction forces in pendulum supports during research into the process of rotor autobalancing. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modelling]. 2019;63,3:53–58. (In Russ.)
6. Orlov A. V., Pashin E. L. Improving algorithm of measuring tensile strength of textile fibers using pendulum-based testing machine. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Series Textile Industry Technology]. 2022;1:103–107. (In Russ.)
7. LIR-158B. Incremental rotary encoder. SKB IS : website. URL: <https://skbis.ru/catalog/rotary/incremental-rotary-encoders/lir-158b> (accessed 4.06.2023).
8. Orlov A. V., Pashin E. L. Modernization of measurement method of tensile properties of fibers using pendulum-based tensile strength testing machine. *Dizajn i tehnologii* [Design and technologies]. 2020;80:81–89. (In Russ.)
9. Linnik Yu. V. Least squares method and the basics of mathematical and statistical theory of observation processing. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1962, 349 p. (In Russ.)
10. Vapnik V. N. Statistical learning theory. New York, John Wiley, 1998. 736 p.
11. Orlov A. V., Pashin E. L. Improving the method of calculating angular acceleration of active clamp on pendulum-based testing machine when measuring tensile strength of textile fibers. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Series Textile Industry Technology]. 2022;4:37–42. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 23.06.2023
Принята к публикации 8.09.2023