

Метод испытания лубяных волокон посредством скоростного изгиба

© 2023. Е. А. Пашин¹✉, А. В. Орлов²

¹ФГБОУ ВО «Костромская государственная сельскохозяйственная академия», г. Кострома, Российская Федерация,

²ФГБОУ ВО «Костромской государственный университет», г. Кострома, Российская Федерация

В статье представлены результаты исследований, связанных с разработкой метода оценки изгибной жесткости лубяных волокон в условиях скоростного изгиба, необходимого для решения задач по импортозамещению хлопка. В отличие от стандартных испытаний усовершенствованный метод должен обеспечивать имитацию реальных механических нагрузок, имеющих место при переработке волокон и эксплуатации получаемых материалов. Для оценки изгибной жесткости волокон при скоростном прогибе предложено применить схему нагружения (соответствующую положениям теории Эйлера-Бернулли) закрепленного консольным образом образца с последующим определением совершаемой при изгибе работы и деформации при взаимодействии с маятником копра. Величину деформации образца предложено определять на основе контроля моментов времени расхождения угловых скоростей, возникающих при рабочем (в процессе испытания) и холостом перемещении маятника. Особенностью определения времени расхождения явились уточненные расчеты: угловой скорости маятника с учетом сил сопротивления его движению на холостом ходу; периодов колебаний маятника на разных этапах его перемещения в условиях взаимодействия с образцом; момента времени начала и окончания взаимодействия при изгибе образца с использованием метода дихотомии при аппроксимации значений угловой скорости; изменения угловой скорости на разных этапах его перемещения в условиях взаимодействия с образцом. Указанные уточненные расчеты явились основой обобщенного алгоритма определения деформации изгиба при взаимодействии с маятником копра, реализуемого на ЭВМ. Созданный программно-аппаратный комплекс для испытания по предложенному методу обеспечивает возможность определения затрат энергии и возникающей деформации волокон при скоростном изгибе. Обеспечивается также визуализация угловой скорости маятника. Сравнительные испытания лубяных волокон разной природы выявили различия по их изгибной жесткости. Испытывая волокна льна, крапивы и пеньки, установлены значения их изгибной жесткости, соответственно, 1,42, 2,53, 6,45 н·мм². Полученные данные согласуются с общепризнанными представлениями о свойствах испытанных лубяных волокон.

Ключевые слова: испытание, лубяное волокно, изгибная жесткость, скоростной изгиб, копер, маятник, затрачиваемая энергия, деформация, программно-аппаратный комплекс

Благодарности: исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 23-26-00147). Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку данной работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Пашин Е. А., Орлов А. В. Метод испытания лубяных волокон посредством скоростного изгиба. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока.* 2023;24(6):1057-1066. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.6.1057-1066>

Поступила: 23.05.2023

Принята к публикации: 24.11.2023

Опубликована онлайн: 20.12.2023

Testing flax fibers using high-speed bending

© 2023. Evgenij L. Pashin¹✉, Alexander V. Orlov²

¹Kostroma State Agricultural Academy, Kostroma, Russian Federation

²Kostroma State University, Kostroma, Russian Federation

The article presents a method of measuring bending rigidity of flax fiber during high-speed bending. This method is an important part of the effort to reduce the dependency on imported cotton. Unlike the standardized testing methods, the suggested approach closer imitates the conditions present during fiber processing and exploitation of fiber products. For evaluation of bending rigidity of flax fiber during high-speed bending there was used the scheme of loading (meeting the factors of Euler – Bernoulli theory) of a sample fixed in a cantilevered way with the following determination of the work done by bending and deformation by interaction with impact pendulum. The value of sample deformation was determined on the basis of the control of moments of the time of angle velocities deformation which took place by operating movement (during the tests) and free movement of the pendulum. The specific feature of determining the time of deformation were more precise calculations: of angle velocity of the pendulum considering the force of resistance to its free movement; of pendulum motion periods at different stages of its movement during its interaction with the sample; of the time of starting and finishing the interaction by sample bending using the method of dichotomy by approximation of angle velocity values; of angle velocity variation at different stages of its movement during its interaction with the sample. These more precise calculations has become the basis of generalized algorithm for determining the bending deformation by interaction with impact pendulum, done by electronic calculator. A hardware-software complex has been created that employs this algorithm to measure and visualize both sample deformation and pendulum energy loss, as well as angular velocity of the pendulum. A comparison of different kinds of natural bast fibers

has been performed – specifically, flax, nettle and hemp. The bending rigidity of these samples has been determined to be 1.42, 2.53 and 6.45 newton-mm² accordingly. These differences match the well-known properties of those materials.

Keywords: testing, bast fiber, bending rigidity, high-speed bending, pendulum, energy loss, deformation, hardware-software complex

Acknowledgements: this research has been subsidized by Russian scientific foundation (project no. 23-26-00147).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors stated no conflict of interest.

For citations: Pashin E. L., Orlov A. V. Testing flax fibers using high-speed bending. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(6):1057-1066. (In Russ.). <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.6.1057-1066>

Received: 23.05.2023

Accepted for publication: 24.11.2023

Published online: 20.12.2023

Перспективным направлением использования лубяных волокон является получение из них короткоштапельного льняного волокна (КШЛВ) для решения задач импортозамещения хлопка, производство которого с учетом его качества на территории Российской Федерации затруднительно [1]. Поэтому ряд предприятий по переработке льна начали внедрять технологии получения КШЛВ, используя отечественное и зарубежное оборудование для механической модификации волокон льна и пеньки по длине и диаметру [2].

Важнейшей характеристикой лубяных волокон, которая в основном определяет прядильную способность КШЛВ, необходимую для текстильных производств, является изгибная жесткость¹ [3, 4].

Она связана со способностью сопротивляться изгибающим нагрузкам, возникающим при переработке и эксплуатации волокон, среди которых доминируют скоростные воздействия посредством изгиба^{2, 3, 4}. Однако существующие стандартные методы испытания лубяных волокон на изгиб реализуются в условиях статического нагружения⁵ и поэтому не соответствуют реальным взаимодействиям волокон с рабочими органами машин, применяемых на текстильных предприятиях. Это снижает прогнозирующую способность получаемых результатов. Указанное положение дел объясняет целесообразность проведения испытаний на основе скоростных воздействий, соответствующих характеру реального нагружения волокон.

Анализ использования скоростных испытаний посредством изгиба выявил методы испытания пластиков, основанных на низкоскоростном ударе^{6, 7}, а применительно к лубяным волокнам – оценку гибкости на основе взаимодействия качающегося маятника с волокнистым образцом [5]. Основным определяемым параметром в этих методах является либо энергия, затрачиваемая на деформацию образца, либо косвенно связанная с ней характеристика. Применительно к упругопластическим материалам, затрачиваемая на их деформацию энергия характеризует их ударную вязкость [6]. Для определения её величины используют маятниковый копр, с помощью которого реализуют изгибной удар по образцу, закрепленному в зажимах (рис. 1).

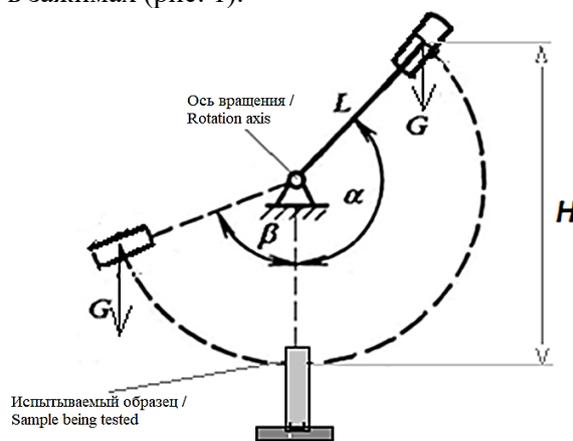


Рис. 1. Схема маятникового копра /

Fig. 1. The schematic of a pendulum-type testing machine

¹Лапшин В. В. Развитие методологических основ и автоматизированного измерительного комплекса для оценки свойств текстильных материалов: дис. ... д-ра техн. наук. Кострома: Костромской государственный технологический ун-т, 2020. 318 с.

²Ипатов А. М. Теоретические основы механической обработки стеблей лубяных культур. М.: Легпромбытиздат, 1989. 144 с.

³Смельская И. Ф., Ильин Л. С., Жуков В. И., Кротов В. Н. Прядение льна: учеб. для студентов вузов. Кострома: Костромской государственный технологический ун-т, 2007. 544 с.

⁴Бадалов К. И., Черников А. Н., Плеханов А. Ф. Проектирование технологии хлопкопрядения: учеб. для студентов вузов. М.: МГТУ им. А. Н. Косыгина, 2004. 601 с.

⁵ГОСТ Р 53484-2022. Лентрепаный: технические условия. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 15 с.

URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/779/77947.pdf>

⁶ГОСТ Р 57948-2017. Композиты полимерные. Метод определения ударной вязкости образцов без надреза. М.: Стандартинформ, 2017. 22 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293740/4293740814.pdf>

⁷ASTM D 4508-06 «Standard Test Method for Chip Impact Strength of Plastics». [Электронный ресурс].

URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/astm/10be8e1d-eb7c-4292-afe7-b2c2829b67d4/astm-d4508-06> (дата обращения: 26.10.2023).

Движение маятника копра осуществляется под действием силы тяжести G . Значение работы A определяется с учётом параметров маятника на основе разницы углов его отклонения от вертикали: при начальном положении α и после взаимодействия с образцом β . Зная вес маятника G , расстояние L от оси маятника до его центра тяжести, углы α и β , затраченная работа на деформацию (или разрушение) образца определяется по формуле:

$$A = G \cdot L \cdot (\cos \beta - \cos \alpha). \quad (1)$$

Скорость маятника V_M , м/с в момент удара по образцу зависит от высоты подъема H и рассчитывается следующим образом: $V_M = (2gH)^{0,5}$, где g – ускорение свободного падения.

Экспериментальному изучению особенностей деформирования упругопластических материалов с использованием метода скоростного изгиба с применением копров разных конструкций уделяется значительное внимание [7]. Предложены стандартные испытания при консольном (метод Изода) и двухопорном (метод Шарпи) закреплении образца⁸. При их сравнении с учетом минимизации влияния на результат сил трения образца относительно опор для нашей задачи более предпочтительным является испытание по первому варианту.

При применении этих методов отмечают неопределенность получаемой оценки в виде энергии, затрачиваемой на деформацию образца. Дело в том, что его нагружение протекает не всегда одномоментно. Формируемая при этом работа A определяется площадью диаграммы изгиба, величина которой зависит от силы, возникающей при деформировании P и величины деформации Δ . Отсутствие информации об этих составляющих величины работы не обеспечивает должную информативность результатов испытаний. Например, исключается возможность оценки коэффициента полноты диаграммы изгиба, а также важнейшей характеристики волокон – изгибной жесткости EI .

Для частичного разрешения этой проблемы на практике предложен модифицированный вариант определения ударной вязкости, получивший название инструментированного⁹. Его использование позволяет получать дополнительную информацию о свойствах испытываемого материала. Это обеспечивается изменением

конструкции бойка маятника. Он снабжается тензодатчиком для измерения нагрузки P . Адаптация датчика с ЭВМ позволяет исследовать характер изменения P в процессе деформирования.

Определение P в условиях высоких скоростей нагружения посредством тензометрии связано с формированием погрешностей. Особенно это проявляется при испытании жестких на изгиб материалов, когда время до разрушения очень мало. Эту проблему связывают с проявлением, так называемой податливостью механических элементов, к числу которых следует относить и тензодатчик, обладающий массой и закрепленный на упругой основе. В результате возникает динамическая погрешность, зависящая от массы, собственной частоты упругого силоизмерителя, его жесткости при деформировании и времени процесса деформирования¹⁰.

Таким образом, указанный инструментированный метод испытания на ударную вязкость при консольном закреплении образца требует совершенствования в части повышения точности получаемых результатов и возможности определения комплекса важнейших свойств волокон: изгибной жесткости, совершаемой работы при изгибе с учетом характера её формирования при нагружении.

Цель исследования – повышение точности и информативности метода испытания посредством изгиба при низкоскоростном ударе по закрепленному консольным образом образцу волокон за счет определения совершаемой при нагружении работы A и деформации Δ для последующей оценки изгибной жесткости волокон EI .

Задачи исследования:

- разработка теоретических основ определения изгибной жесткости волокон посредством скоростного изгиба, определение величины деформаций при нагружении образца в процессе испытания с использованием маятникового копра;
- разработка варианта конструкции копра для определения затраченной энергии и деформации;
- экспериментальное исследование изгибных характеристик разных лубяных волокон с использованием созданного программно-аппаратного комплекса для их испытания посредством скоростного изгиба.

⁸Белевитин В. А. Измерение ударной вязкости металлов и сплавов: методические рекомендации. Челябинск: Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический ун-т, 2022. 36 с.

⁹Хотинов В. А., Фарбер В. М., Селиванова О. В., Морозова А. Н. Современные инструментальные методы исследования механических свойств. Екатеринбург: Урал. ун-т, 2017. 96 с.

¹⁰Голубков В. С., Пирогов К. М., Смушкович Б. Л. Испытательные машины в текстильном материаловедении. М.: Легпромбытиздат, 1988. 208 с.

Научная новизна – установление причин, вызывающих необходимость оценки изгибной жесткости лубяных волокон на основе скоростного изгиба с использованием маятникового копра; обоснование метода определения линейной деформации (прогиба) испытываемого образца волокон посредством сопоставления угловых скоростей маятника на разных этапах его перемещения в процессе испытания; создание инструментального метода оценки изгибной жесткости лубяных волокон на основе контроля затрачиваемой при изгибе энергии и формируемой деформации.

Материал и методы. Для решения задачи по совершенствованию существующих способов испытания с применением копра предложено использовать положения теории механики деформируемого тела. В частности, «грузовую» схему с приложением силы P на свободном конце консольно закрепленной балки длиной L , положения теории Эйлера-Бернулли, теоремы Кастильяно для определения деформации упругой системы, метод нулевой фиктивной силы, а также общее уравнение для определения удельной потенциальной энергии при изгибе при условии пренебрежения энергией сдвига.

Экспериментальные сравнительные исследования проводили в период 2021-2023 гг. с использованием макетного образца копра, обеспечивающего оценку совершаемой при скоростном изгибе работы, и возникающей деформации для определения изгибной жесткости лубяных волокон разной структуры.

Результаты и их обсуждение. Рассмотрим «грузовую» схему с приложением силы P в точке, отдаленной от места заделки балки на расстоянии L , на её концевом участке (рис. 2).

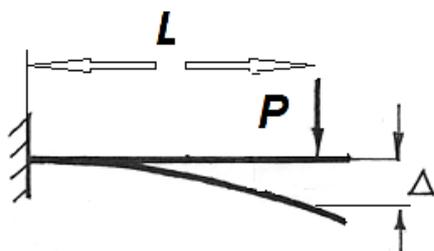


Рис. 2. «Грузовая» схема испытания волокон / Fig. 2. A cantilever-based fiber testing scheme

Применительно к этой схеме величина прогиба участка балки Δ в месте приложения силы P определяется по формуле:

$$\Delta = (P \cdot L^2) / 3 \cdot EI. \quad (3)$$

Совершаемая работа A при прогибе балки вычисляется по выражению:

$$A = (P \cdot \Delta) / 2. \quad (4)$$

Преобразуя совместно (3) и (4) и выражая EI , получим зависимость:

$$EI = (2A \cdot L^3) / (3 \cdot \Delta^2). \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что при определении изгибной жесткости волокон EI необходимо знание формируемой при испытании работы A и деформации Δ . Применительно к определению работы A возможно использование упомянутого выше метода с применением выражения (1). Однако определение деформации Δ является нетривиальной задачей, требующей соответствующего решения.

Рассмотрим особенности взаимодействия анализируемого образца с маятником копра. Очевидно, что с момента их соприкосновения угловая скорость маятника становится меньшей по сравнению со скоростью до момента соприкосновения. Это объясняется наличием силы реакции образца на маятник. Время действия этой силы с учётом скорости перемещения маятника определяет величину деформации образца при его нагружении, поэтому важным условием является оценка угловой скорости маятника ω .

Это возможно посредством контроля угловых координат φ при вращении оси с закрепленным маятником во времени t с применением, например, цифрового датчика угловых перемещений – энкодера¹¹. Получив массив угловых координат $\varphi(t)$ и путем их дифференцирования по времени, возможно определение зависимости угловой скорости $\omega(t)$.

При таком рассмотрении процесса, величину деформации образца Δ можно оценить по моментам расхождения угловых скоростей, сформированных при рабочем (в процессе испытания) и холостом перемещениях маятника.

При холостом ходе примерные графические зависимости изменения угловых координат, скорости и ускорения будут иметь вид, представленный на рисунке 3, а. При наличии образца в условиях его взаимодействия с маятником характер изменения этих же характеристик будет иной (рис. 3, б).

Оценивая особенности изменения угловой скорости $\omega(t)$, отметим, что до момента соприкосновения с образцом характер изменения угловой скорости подобен варианту при холостом

¹¹Бушуев Д. А., Рубанов В. Г. Технические измерения и приборы. Измерение угловых перемещений и скоростей вращательного движения: методические указания. Белгород: изд-во БГТУ, 2012. 64 с.

ходе маятника. Однако после соприкосновения в момент времени τ_1 , вследствие сопротивления из-за возникающих в образце деформаций, угловая скорость снижается по определённому, зависящему от свойств образца, закону. Это происходит до потери контакта маятника с

образцом, определяемого моментом времени τ_3 . Далее маятник без сопротивления перемещается до полной остановки в момент времени τ_4 . Очевидно, что величину деформации образца возможно определять на основе знания величин τ_1 и τ_3 .

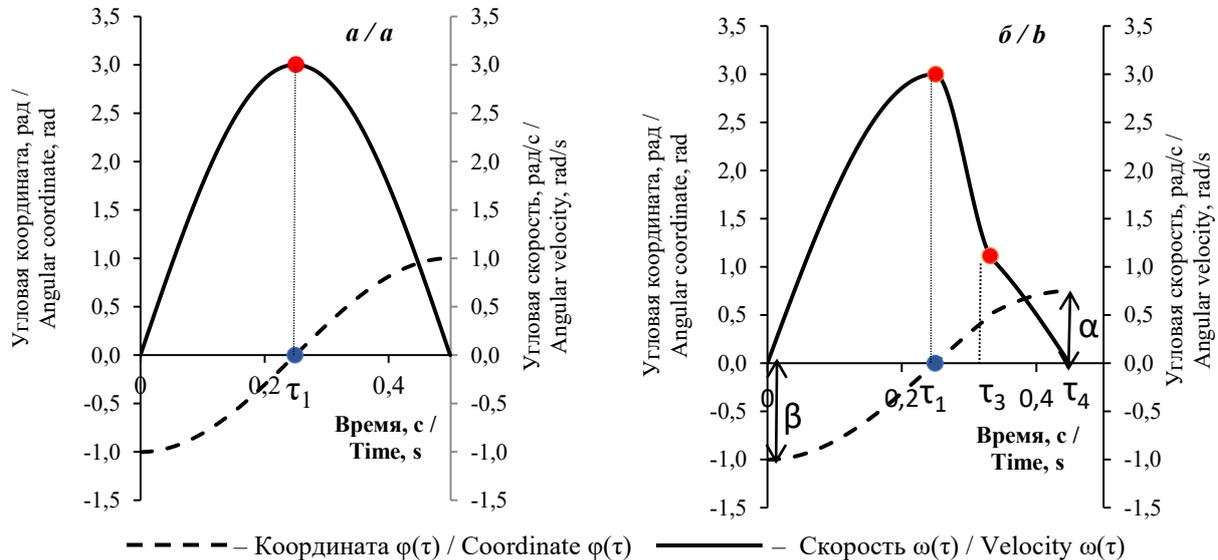


Рис. 3. Примерный характер изменения угловых координат $\varphi(\tau)$ и скорости $\omega(\tau)$ маятника копра при отсутствии (а) и наличии (б) образца /

Fig. 3. Approximate pattern of change for angular coordinate $\varphi(\tau)$ and angular velocity $\omega(\tau)$ of the pendulum without the sample (a) and with the sample (b)

Определение момента начала деформации τ_1 можно осуществлять по начальному моменту формирования разности угловой $\Delta\omega(\tau)$ между рабочим $\omega_{\text{раб}}(\tau)$ и холостым $\omega_{\text{хол}}(\tau)$ ходом маятника. Задача выявления момента времени τ_3 осложняется тем, что необходимо знать закон, по которому будет изменяться угловая скорость маятника на этапе после разрушения образца.

Примем допущение об отсутствии сопротивления от действия образца на маятник в период от τ_3 , в который угловая скорость маятника будет изменяться по гармоническому закону синуса:

$$\omega_{\text{раб}}(\tau) = V \cdot \sin\left(2\pi \frac{\tau + \phi}{T}\right), \quad (6)$$

где V – амплитуда колебаний, T – период колебаний, ϕ – фаза.

Используя (6), как основу, расчёт величины амплитуды V возможен с применением методики, основанной на определении полной энергии маятника после совершенной деформации образца¹². К сожалению, точное определение момента трения маятника является нетривиальной задачей, так как его величина опреде-

ляется совокупностью целого ряда сил, имеющих различную природу, как описано в [8]. Хотя существуют методы идентификации характера сил трения по установившимся автоколебаниям маятника [9], они допускают заранее известные инерционные свойства маятника, что не всегда возможно точно установить для лабораторных приборов, так как форма маятника реального копра необязательно сводится к геометрическим примитивам. Как следствие, зачастую практичнее упростить решаемую задачу допущением, что момент известен $M_{\text{копр}}$ и постоянен. Это делает возможным внесение поправки на потерю энергии маятником по известной методике [10].

Тогда выражение для определения величины V примет следующий вид:

$$V = \sqrt{\frac{2(E_k + A_{\text{мп}})}{I}} = \sqrt{\frac{2(mg \cdot L \cdot (1 - \cos \varphi_\beta) + M_{\text{копр}} \cdot \varphi_\beta)}{I}}, \quad (7)$$

где m – масса маятника, g – ускорение свободного падения, L – расстояние от оси до центра масс маятника, I – момент инерции маятника, φ_β – угол подъема маятника после разрыва,

¹²ГОСТ 34373-2017. Пластмассы. Верификация маятникового копра для испытания на удар. Испытание на ударную вязкость по Шарпи, Изоду и при ударном растяжении. М.: Стандартинформ, 2018. 33 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293740/4293740781.pdf>

$M_{\text{сопр}}$ – момент сил сопротивления, не связанных с реакцией со стороны образца.

Используя выражение (6), фазу колебаний ϕ можно определить, зная период колебаний T с учетом того, что $\omega_{\text{раб}}(\tau_4) = 0$. При таких условиях основной задачей становится определение периода колебаний T . Заметим, что в условиях, когда размах колебаний маятника составляет порядка 2 рад, недопустимо применять при расчётах модель математического маятника, так как она верна только при малом размахе колебаний¹³. Поэтому целесообразно период колебаний определять путем аппроксимации значений $\omega_{\text{раб}}(\tau)$ для интервала $\tau \in [\tau_3; \tau_4]$. Применяя (6) в качестве аппроксимирующей функции $\hat{\omega}$, можно определить такое значение T , при котором ошибка аппроксимации δ данного участка будет минимальна. В качестве метрики ошибки δ предложили использовать сумму квадратов разностей между значениями данных ω и $\hat{\omega}$.

При этом важной задачей является выявление участка, подлежащего аппроксимации в условиях неизвестности границы, соответствующей моменту τ_3 . В этих целях предложено использовать более грубую оценку величины τ_3 (здесь и далее грубую оценку обозначим τ'_3). Пока оценка τ'_3 завышена, т. е. $\tau'_3 > \tau_3$, это не оказывает значительного влияния на ошибку аппроксимации δ . В то же время заниженное значение оценки τ'_3 значительно увеличивает ошибку δ , так как точки, принадлежащие участку графика $[\tau_2; \tau_3]$, не будут ложиться на аппроксимирующую кривую. Факт возникновения значительного роста ошибки аппроксимации δ предлагается использовать для определения τ'_3 .

Используя указанные исходные положения, следует выбрать начальное значение τ'_3 , а именно (с учетом результатов предварительного исследования) значение $\tau'_3 = \tau_4 - 1$ мс, которое последовательно уменьшается на 1 мс, и на каждой итерации производится аппроксимация значений $\omega_{\text{раб}}$ в интервале $[\tau'_3; \tau_4]$. После этого следует проводить сравнение текущего значения ошибки аппроксимации $\delta_{\text{тек}}$, полученное при выбранном значении τ'_3 , с предыдущим значением $\delta_{\text{пред}}$. В результате серии расчетных экспериментов было определено, что рост

значения δ на 50 % по сравнению с предыдущим отмечает выход значения τ'_3 за допустимый диапазон. Это служит сигналом для остановки процесса выявления τ_3 .

Далее, чтобы произвести аппроксимацию, достаточно определить значение периода T , так как V определяется заранее согласно (7), а значение ϕ может быть вычислено по известной величине периода колебаний T . Для этого предложено использовать метод дихотомии. Его применение обеспечивает расчет истинного значения T для аппроксимируемого участка $[\tau'_3; \tau_4]$ функции $\omega_{\text{раб}}(t)$.

Таким образом, определив оценочное значение τ'_3 , и зная значения параметров V , T , ϕ , появляется возможность для определения закона изменения $\omega_{\text{раб}}(t)$ после деформации образца. Для более точного определения момента τ_3 применяется ранее указанное условие схождения кривых. Сравнивая закон изменения скорости $\omega_{\text{раб}}(t)$ на этапе от τ_2 до τ_3 с полученной моделью (6), находим истинное значение τ_3 как момент окончания процесса взаимодействия маятника с образцом.

Алгоритм поиска и определения истинного значения τ_3 на основе использования зависимости (6) представлен в виде блок-схемы на рисунке 4.

Для экспериментальной проверки предложенного метода испытания посредством скоростного изгиба был разработан макетный образец программно-аппаратного комплекса (ПАК-Г) (рис. 5).

Конструкция включает основание 1, стойку 2 с закрепленной верхней платформой 3. На ней закреплен узел 4 для вращения оси 5 с маятником 6, на свободном конце которого имеется боёк в виде иглы 7. На маятнике также расположен зацеп 8 для фиксации положения маятника при угле зарядки α . Ось 5 скреплена с датчиком углов поворота (энкодером) 9¹⁴. На платформе 3 расположен блок 10 обработки сигналов, поступающих от датчика 9. Обработанные сигналы поступают от блока 10 посредством USB-кабеля к ЭВМ. В ней сигналы обрабатываются с конечным расчётом затраченной на деформацию образца энергии A (мДж), а также величины деформации Δ (мм), определяемой по формуле: $\Delta = L \cdot [\varphi(\tau_3) - \varphi(\tau_1)]$.

¹³Монахов В. В., Огинец О. В. Исследование колебаний маятника в поле силы тяжести: учебно-методическое пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2006. 24 с.

¹⁴Точность угловых энкодеров: техническая статья. [Электронный ресурс].

URL: <https://www.servotechnica.ru/files/doc/documents/file-933.pdf> (дата обращения: 26.10.2023).

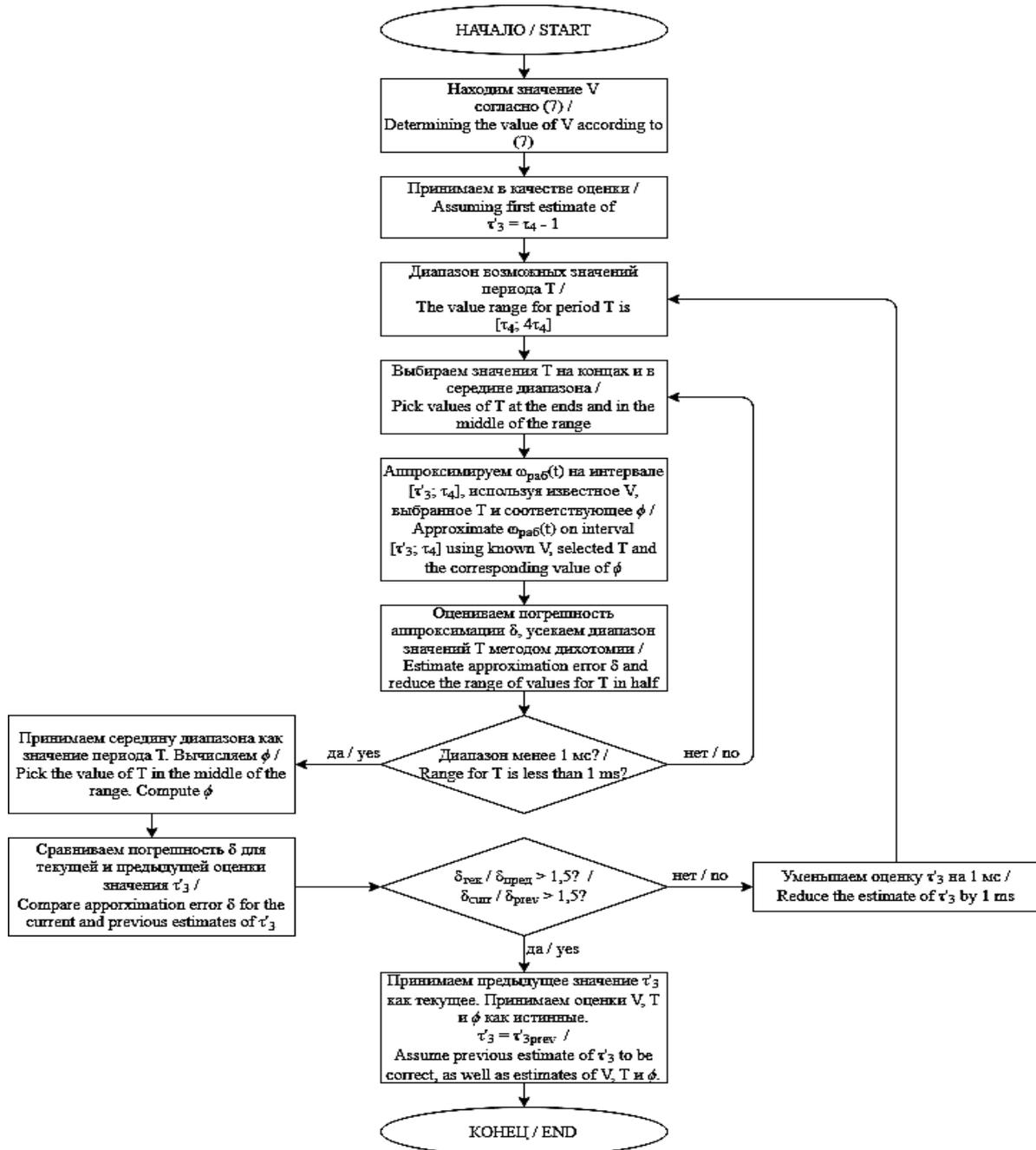


Рис. 4. Блок-схема реализации алгоритма определения времени начала и окончания деформирования / Fig. 4. The algorithm that determines the moment when the sample begins and stops deforming

Процесс испытания реализуется следующим образом. Основание 1 устанавливают горизонтально на неподвижном столе. Образец волокна 11 закрепляют в виде консоли в зажиме 12. Длина консоли образца должна быть больше расстояния между краем губок зажима и плоскостью перемещения иглы 7. После зажима образца маятник отводят на угол зарядки α и в этом положении его фиксируют зацепом 8. Далее включают ЭВМ, а маятник освобождают из зацепления, который опускаясь при прохождении вертикального положения,

деформирует образец 11 посредством соприкосновения с ним иглы 7. В процессе деформации происходит фиксация во времени угловых координат положения оси с маятником. Это обеспечивается посредством использования датчика 9. Полученные сигналы от датчика поступают в блок обработки 10, а затем в ЭВМ. В конечном итоге на мониторе ЭВМ появляются значения затрачиваемой на деформацию образца энергии A (мДж), а также величины деформации образца при его прогибе Δ (мм). Кроме этого, созданный ПАК-Г позволяет

визуализировать процесс изменения угловой скорости при испытании образца. Получаемые графические зависимости при сравнительных

анализах позволяют объяснить формируемые различия затрат энергии, идущей на деформацию образцов.

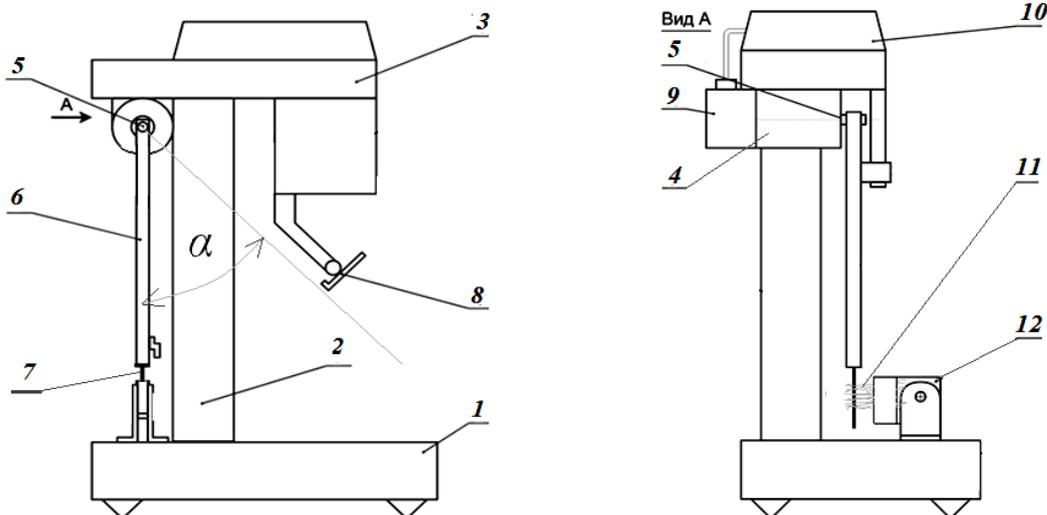


Рис. 5. Схема стенда для испытания волокон посредством скоростного изгиба: 1 – основание; 2 – стойка; 3 – платформа; 4 – узел; 5 – ось; 6 – маятник; 7 – боёк; 8 – зацеп; 9 – энкодер; 10 – блок обработки сигналов; 11 – образец волокна; 12 – зажим /

Fig. 5. The schematic of the stand for testing the fibers via high-speed bending: 1 – base; 2 – stand; 3 – platform; 4 – node; 5 – axis; 6 – pendulum; 7 – cheek; 8 – hook; 9 – encoder; 10 – signal processing block; 11 – fiber sample; 12 – clamp

При экспериментальной проверке использовали три вида лубяных волокон, выделенных из стеблей тресты льна, конопли и крапивы. Для испытания готовили образцы длиной 50 мм и массой 0,12 г. Каждый образец консольным образом закрепляли в зажим. Длина консоли составляла 12 мм, ширина образца в месте закрепления – 4 мм. Точку приложения нагрузки со стороны бойка располагали на расстоянии 10 мм от места закрепления образца в зажиме. В результате испытаний определяли указанные выше параметры: A и Δ . Полагая, что изгиб образца будет протекать согласно теории Эйлера-Бернулли, по результатам испытания получали оценку изгибной жесткости образца EI , определяемую по формуле (5). Результаты

испытаний представлены в таблице, а также в виде графических зависимостей угловых скоростей маятника (рис. 6).

Из анализа полученных данных следуют различия изгибных характеристик при нагружении волокон разных видов. При изгибе льняного волокна, как наиболее гибкого из сравниваемых, затрачивается наименьшее количество энергии. При сходных величинах деформации Δ у всех волокон из-за различий формируемой при изгибе работы изгибная жесткость льняного волокна наименьшая ($EI = 1,42 \text{ н}\cdot\text{мм}^2$). Наиболее жесткой на изгиб оказалась пенька ($EI = 6,45 \text{ н}\cdot\text{мм}^2$). Это хорошо согласуется с общеизвестными представлениями о свойствах лубяных волокон¹⁵.

Таблица – Сравнительные испытания лубяных волокон посредством скоростного изгиба / Table – Comparison tests of bast fibers by high-speed bending

Вид образца / Sample type	Определяемые параметры / Parameters		
	работа, затрачиваемая на деформацию образца A , мДж / energy spent for deforming the sample A , mj	величина прогиба образца в месте приложения нагрузки Δ , мм / deformation value at the force application point Δ , mm	величина изгибной жесткости EI , Н·мм ² / bending rigidity value EI , N·mm ²
Лен / Flax	0,15	8,4	1,42
Пенька / Hemp	0,90	9,5	6,45
Крапива / Nettle	0,41	10,4	2,53

¹⁵Крагельский И. В. Физические свойства лубяного сырья. М.-Л.: Гизлегпром, 1939. 470 с.
URL: https://ttp.ivgpu.com/wp-content/uploads/2023/10/406_1.pdf

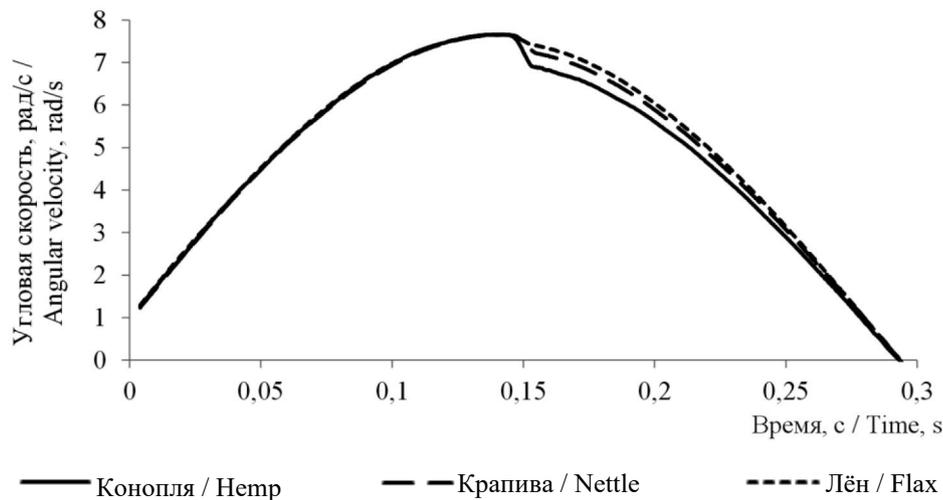


Рис. 6. Значения угловой скорости маятника для разных типов природных волокон / Fig. 6. Angular velocity values of the pendulum for different kinds of natural fibers

Различия в затратах энергии и изгибной жесткости объясняются разным характером изменения угловой скорости маятника в период взаимодействия с образцами волокон (рис. 6). Наибольшее снижение скорости происходит при испытании пеньки, а наименьшее – у льняного волокна. Точки перегиба кривых характеризуют начало и окончание деформации образцов.

Выводы. 1. Для решения задач, связанных с импортозамещением хлопка лубяными волокнами, необходимо оценку их изгибной жесткости осуществлять посредством скоростного изгиба, как доминирующего механического воздействия при переработке волокон и эксплуатации получаемых материалов.

2. Оценка изгибной жесткости волокон при скоростном их прогибе с применением копра возможна на основе нагружения консольно закрепленного образца с последующим определением совершаемой при изгибе работы A и деформации Δ . Для расчета деформации Δ необходимо определение моментов времени, когда угловая скорость маятника перестает соответствовать: в момент начала деформации – скорости маятника при холостом ходе; в момент завершения деформации – гармоническому закону колебаний, выявленному посред-

ством аппроксимации участка траектории угловой скорости маятника гармонической функцией с тремя параметрами – периодом, амплитудой и фазой колебаний.

3. Для определения периода колебаний предложен метод дихотомии с последующей оценкой качества аппроксимации по метрике суммы квадратов ошибок аппроксимации. Определение амплитуды проводят по величине измеренной потенциальной энергии маятника копра в конечной точке его траектории, а фазы при известном периоде колебаний – по времени достижения маятником конечной точки траектории.

4. Созданный программно-аппаратный комплекс для испытания по предложенному методу обеспечивает возможность определения затрат энергии и возникающей деформации волокон при скоростном изгибе. Также возможна визуализация изменения угловой скорости маятника. Сравнительные испытания лубяных волокон разной природы подтвердили корректное определение их изгибной жесткости, а именно у волокна льна, крапивы и пеньки её значение соответственно равно 1,42, 2,53, 6,45 н·мм². Полученные данные согласуются с общепризнанными представлениями о свойствах этих волокон.

Список литературы

1. Гукежева М. Х. Перспективы импортозамещения хлопка в текстильной промышленности страны. Вестник Евразийской науки. 2020;12(1):36. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42809624> EDN: MSCWTQ
2. Лаврентьева Е. П., Дьяченко В. В. Опыт хлопчатобумажной промышленности по переработке льняного волокна. Вестник текстильлепрома. 2019:48-51. Режим доступа: https://textileexpo.ru/images/vestnik/vestnik_2019_osen.pdf
3. Новосад Т. Н., Гойс Т. О., Сташева М. А., Ломакина И. А., Лысова М. А., Грузинцева Н. А., Гусев Б. Н. Анализ состояния и направления совершенствования оценки качества текстильных материалов и изделий. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2023;(4):5-24. Режим доступа: https://tp.ivgpu.com/wp-content/uploads/2023/10/406_1.pdf
4. Разин С. Н., Пашин Е. Л., Орлов А. В. Метод определения изгибной жесткости льняного волокна для его квалитрии: обоснование алгоритма испытания. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2023;(3):81-87. DOI: https://doi.org/10.47367/0021-3497_2023_3_81 EDN: GVMSOP

5. Пашина Л. В., Пашин Е. Л. Способ оценки гибкости волокна или луба лубяных культур: пат № 2368902 Российская Федерация. № 2008128627/12: заяв. 14.07.2008; опубл. 27.09.2009. Бюл. № 27.4 с.
Режим доступа: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&TypeFile=html&DocNumber=2368902
6. Хапёрских С. А., Ананьева Е. С. Влияние компонентного состава на ударную вязкость отвержденного полиматричного связующего. Ползуновский вестник. 2022;2(4-2):184-192. DOI: <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.023> EDN: NIYNWI
7. Беклемышева К. А., Петров И. Б. Моделирование разрушения гибридных композитов под действием низкоскоростного удара. Математическое моделирование. 2018;30(11):27-43.
Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36455472> EDN: VMLDMT
8. Артюнин А. И., Суменков О. Ю. Учет сил сопротивления в опорах маятников при исследовании процесса автоматической балансировки роторов. Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019;(3):53-58.
DOI: [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2019.3\(63\).53-58](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2019.3(63).53-58) EDN: YEJEXH
9. Васюкова О. Э., Климина Л. А. Моделирование автоколебаний управляемого физического маятника с учетом зависимости момента трения от нормальной реакции в шарнире. Нелинейная динамика. 2018;14(1):33-44.
DOI: <https://doi.org/10.20537/nd1801003> EDN: YVLVKL
10. Орлов А. В., Пашин Е. Л. Совершенствование алгоритма определения разрывного усилия волокна на разрывной машине копрового типа. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022;(1):103-107.
DOI: https://doi.org/10.47367/0021-3497_2022_1_103 EDN: NDZQPI

References

1. Gukezheva M. Kh. Prospects of cotton import substitution in the national textile industry. *Vestnik Evraziyskoy nauki = The Eurasian Scientific Journal*. 2020;12(1):36. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42809624>
2. Lavrenteva E. P., Dyachenko V. V. Experience of the cotton industry in processing flax fiber. *Vestnik tekstil'legproma*. 2019:48-51. (In Russ.). URL: https://textileexpo.ru/images/vestnik/vestnik_2019_osen.pdf
3. Novosad T. N., Goys T. O., Stasheva M. A., Lomakina I. A., Lysova M. A., Gruzintseva N. A., Gusev B. N. Analysis of state and directions of quality assessment improvement of textile materials and products. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti = Proceedings of Higher Educational Institutions. Textile Industry Technology*. 2023;(4):5-24. (In Russ.). URL: https://tp.ivgpu.com/wp-content/uploads/2023/10/406_1.pdf
4. Razin S. N., Pashin E. L., Orlov A. V. A method of measuring bending rigidity of flax fiber during its qualimetry: determining properties of a testing algorithm. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti = Proceedings of Higher Educational Institutions. Textile Industry Technology*. 2023;(3):81-87. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.47367/0021-3497_2023_3_81
5. Pashina L. V., Pashin E. L. Method for assessing the flexibility of fiber or bast of bast crops: Patent RF, no. 2368902, 2009. (In Russ.). URL: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&TypeFile=html&DocNumber=2368902
6. Khaperskikh S. A., Anan'eva E. S. Effect of the component composition on the impact strength of the cured polymatrix binder. *Polzunovskiy vestnik*. 2022;2(4-2):184-192. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.023>
7. Beklemysheva K. A., Petrov I. B. Numerical modeling of low-velocity impact on hybrid composite. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2018;30(11):27-43. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36455472>
8. Artyunin A. I., Sumenkov O. Yu. Taking consideration of resistance forces in the pendulum supports when studying the process of automatic balancing of the rotors. *Sovremnyetekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie = Modern technologies System analysis Modeling*. 2019;(3):53-58. (In Russ.). DOI: [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2019.3\(63\).53-58](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2019.3(63).53-58)
9. Vasyukova O. E., Klimina L. A. Modelling of self-oscillations of a controlled pendulum with respect to a friction torque depending on a normal reaction in a joint. *Nelineynayadinamika = Russian Journal of Nonlinear Dynamics*. 2018;14(1):33-44. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.20537/nd1801003>
10. Orlov A. V., Pashin E. L. Improvement of the algorithm for determining the disconnective fiber forces when tested on a copper type machine. *Izvestiyavysshikhuchebnykhzavedeniy. Tekhnologiyatekstil'noypromyshlennosti = Proceedings of Higher Educational Institutions. Textile Industry Technology*. 2022;(1):103-107. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.47367/0021-3497_2022_1_103

Сведения об авторах

✉ Пашин Евгений Львович, доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры «Технические системы в АПК», ФГБОУ ВО «Костромская государственная сельскохозяйственная академия», Учебный городок, д. 34, пос. Караваяво, Костромской р-н, Костромская обл., Российская Федерация, 156530, e-mail: van@ksaa.edu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5871-874X>, e-mail: evgpashin@yandex.ru

Орлов Александр Валерьевич, кандидат техн. наук, доцент кафедры «Информационные системы и технологии», ФГБОУ ВО «Костромской государственный университет», ул. Дзержинского, д. 17, г. Кострома, Костромская область, Российская Федерация, 156005, e-mail: info@ksu.edu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4995-3393>

Information about the authors

✉ Evgenij L. Pashin, DSc in Engineering, professor, professor at the Department of Technical Systems in Argo-Industrial complex, Kostroma State Agricultural Academy, Uchebnyy Gorodok, 34, Karavaevo, Kostroma Oblast, Russian Federation, 156530, e-mail: van@ksaa.edu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5871-874X>, e-mail: evgpashin@yandex.ru

Alexander V. Orlov, PhD in Engineering, associate professor at the Department of Information Systems and Technologies, Kostroma State University, Str. Dzerzhinsky, 17, Kostroma, Kostroma Oblast, Russian Federation, 156005, e-mail: info@ksu.edu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4995-3393>

✉ – Для контактов / Corresponding author