

УДК 677.017.2/.7

DOI 10.47367/0021-3497\_2022\_1\_103

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗРЫВНОГО УСИЛИЯ ВОЛОКНА  
ПРИ ИСПЫТАНИИ НА МАШИНЕ КОПРОВОГО ТИПА**

**IMPROVEMENT OF THE ALGORITHM  
FOR DETERMINING THE DISCONNECTIVE FIBER FORCES  
WHEN TESTED ON A COPPER TYPE MACHINE**

*А.В. ОРЛОВ, Е.Л. ПАШИН*

*A.V. ORLOV, E.L. PASHIN*

(Костромской государственный университет,  
Костромская государственная сельскохозяйственная академия)

(Kostroma State University,  
Kostroma State Agricultural Academy)

E-mail: aorlov@list.ru; evgpashin@yandex.ru

*В статье представлен усовершенствованный алгоритм расчета разрывного усилия волокна при испытании на машине копрового типа. Установлено, что пренебрежение влиянием сил сопротивления перемещению маятника, не связанных с разрывом волокна, приводит к ошибочным значениям разрывного усилия. Для определения момента сил трения требуется расчет момента инерции маятника с учетом изменения периода колебаний по мере потери им энергии. Необходимо также допущение постоянства величины силы трения при движении маятника и монотонности убывания его полной энергии. Расчет величины момента сил сопротивления возможен при условии знания массы маятника, расстояния от оси подвеса до центра масс, а также начального и конечного углов его подъема.*

*The article presents an improved algorithm for calculating the breaking force of a fiber when tested on a punching machine. It has been established that the neglect of the influence of the forces of resistance to the movement of the pendulum, which are not related to the rupture of the fiber, leads to erroneous values of the breaking force. To determine the moment of friction forces, it is required to calculate the moment of inertia of the pendulum, taking into account the change in the oscillation period as it loses energy. It is also necessary to assume the constancy of the value of the friction force during the motion of the pendulum and the monotonicity of the decrease in its total energy. The calculation of the value of the moment of resistance forces is possible provided that the mass of the pendulum, the distance from the axis of the suspension to the center of mass, as well as the initial and final angles of its rise are known.*

**Ключевые слова:** волокно, разрыв, машина копрового типа, маятник, моделирование, симуляция, момент сил сопротивления.

**Keywords:** fiber, discontinuity, punching machine, pendulum, modeling, simulation, resistive moment.

Развитие систем квалитетрии лубяных волокон требует совершенствования методов определения их свойств и, в частности разрывного усилия, на основе обеспечения сходства условий испытания с реальным – более динамичным характером нагружения волокон в процессе переработки и эксплуатации [1], [2].

С этой целью предложен вариант метода и инструментальной системы (ИС) по принципу работы копра посредством косвенного определения разрывного усилия волокон  $P_{\text{разр}}$  [3]. Используя известное уравнение динамики вращательного тела, предложено вычислять величину  $P_{\text{разр}}$  по формуле:

$$P_{\text{разр}} = (I\ddot{\varphi} - M_{\text{сопр}} - mgr \sin \varphi_0) / L_{\text{разр}}, \quad (1)$$

где  $\varphi_0$  – угол зарядки маятника;  $m$  – масса маятника;  $r$  – расстояние от оси вращения маятника до центра тяжести;  $(mgL_{\text{ц.т.}} \sin \varphi)$  – момент силы тяжести;  $M_{\text{сопр}}$  – момент иных сил сопротивления (в основном сил трения  $F_{\text{тр}}$ );  $I$  – момент инерции маятника;  $\ddot{\varphi}$  – угловое ускорение маятника;  $L_{\text{разр}}$  – расстояние от оси вращения маятника до центра активного зажима образца.

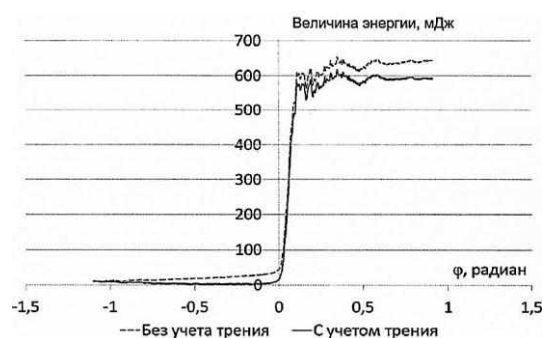


Рис. 1

На первых этапах исследования было принято допущение о несущественном влиянии величины  $M_{\text{сопр}}$  в выражении (1). По-

этому во внимание ее не принимали, что значительно упрощало расчеты. Однако последующая апробация созданной ИС выявила значительную ошибку в расчете  $P_{\text{разр}}$  при определенном соотношении слагаемых  $M_T$  и  $(P_{\text{разр}} L_{\text{разр}})$ , без учета суммарных сил сопротивления  $M_{\text{сопр}}$ . Этот вывод подтверждается различиями энергий, затрачиваемых на перемещение активного рабочего органа (маятника) ИС с учетом  $M_{\text{сопр}}$  и без него (рис. 1 – поглощение энергии образцом в ходе разрыва с учетом  $M_{\text{сопр}}$  и без него).

Данное обстоятельство потребовало разработки метода учета формируемого  $M_{\text{сопр}}$  на основе решения задач, одна из которых связана с более точным определением момента инерции маятника, а другая – с расчетом сил сопротивления, препятствующих его перемещению.

Для решения первой задачи использовали известные зависимости, связывающие момент инерции  $I$  и период колебаний  $T$  для математического либо физического маятника [4]. Однако при измерении периода колебаний возникли сложности, поскольку в реальных системах не всегда можно пренебречь изменением периода колебаний маятника по мере потери им энергии. Как следствие, рассчитанное значение момента инерции  $I$  будет отличаться от истинного. Это окажет влияние на точность оценки энергии маятника  $E$ . Полная энергия маятника может быть выражена следующим образом [4]:

$$E = (m, \dot{\varphi}) = mgr(1 - \cos \varphi) + \frac{1}{2} \dot{\varphi}^2, \quad (2)$$

где  $\varphi, \dot{\varphi}$  – угловая координата и угловая скорость маятника.

Применительно к создаваемой схеме конструкции ИС [3], здесь и далее за начало отсчета координаты  $\varphi = 0$  принимали низ-

шую точку траектории маятника, а его положительным направлением считалось направление движения в ходе разрыва образца.

Таким образом, зная изменение величин  $\varphi, \dot{\varphi}$  во времени, можно на основании формулы (2) определить энергию  $E_{\text{п}}$ , потерянную маятником на момент достижения указанной точки траектории:

$$E_{\text{п}}(\varphi, \dot{\varphi}) = E(\varphi_0, 0) - E(\varphi, \dot{\varphi}), \quad (3)$$

где  $\varphi_0 < 0$  – начальная координата маятника.

Учтем следующее обстоятельство. Поскольку в начальной и конечной точках траектории маятника вся его энергия преобразована в потенциальную, погрешности в определении момента инерции  $I$  не будут сказываться на величине  $E_{\text{п}}$  для этих точек. В таких условиях потери энергии за один мах маятника  $E_{\text{п}}(\varphi_{\text{max}}, 0)$  могут быть определены достаточно точно.

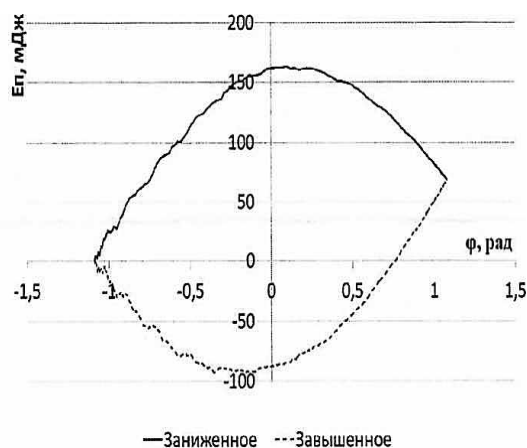


Рис. 2

Тогда влияние погрешности при определении  $I$  будет наибольшим в окрестности точки  $\varphi = 0$ , где вся потенциальная энергия маятника преобразуется в кинетическую. Примерное представление зависимости (3) для разных значений  $I$  указано на рис. 2 (расчетная потеря энергии маятником для

разных значений  $I$ ). Данные получены в результате регистрации хода маятника экспериментальной разрывной машины ИС с погрешностью при определении величины момента инерции  $I$ .

Очевидно, что при заниженном и завышенном значениях момента инерции  $I$  наблюдается аномальное поведение величины  $E_{\text{п}}$ . В определенный момент времени она начинает уменьшаться, словно маятник начинает получать энергию из внешнего источника. При близком к истинному значению  $I$  такое поведение не должно наблюдаться, так как величина  $E_{\text{п}}$  должна монотонно возрастать. Для определения значения  $I$ , удовлетворяющего этому условию, рассмотрим следующую упрощенную модель потери энергии на трение.

Потери энергии  $E_{\text{п}}$  представляют собой работу, совершенную силой трения. Примем допущение, что сила трения постоянна и не зависит от скорости движения маятника. В этом случае величина  $E_{\text{п}}$  будет определяться классическим уравнением работы:  $E_{\text{п}} = F_{\text{тр}} r_{\text{тр}} (\varphi - \varphi_0)$ , где  $F_{\text{тр}}$  – сила трения,  $r_{\text{тр}}$  – плечо, к которому она прилагается, а  $r_{\text{тр}}(\varphi - \varphi_0)$  – длина дуги, на которой совершается работа. Поскольку момент сил трения  $M_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} r_{\text{тр}}$ , исходя из (3), можно получить величину потерь энергии в нижней точке траектории маятника ( $\varphi = 0, \dot{\varphi} = \dot{\varphi}_{\text{max}}$ ):

$$E(\varphi_0, 0) - E(0, \dot{\varphi}_{\text{max}}) = M_{\text{тр}} (0 - \varphi_0). \quad (4)$$

При постоянной величине сил трения значение потерь энергии на трение возрастает пропорционально углу, пройденному маятником. Соответственно величину  $E_{\text{п}}$  можно будет определить:  $E_{\text{п}}(\varphi) = E_{\text{п}}(\varphi_{\text{max}}, 0) \frac{\varphi - \varphi_0}{\varphi_{\text{max}} - \varphi_0}$ .

Тогда при подстановке в (4) выражения (2) для нижней точки траектории маятника получим:

$$mgr(1 - \cos \varphi_0) - \frac{1}{2} I \dot{\varphi}_{\text{max}}^2 = mgr(\cos \varphi_0 - \cos \varphi_{0\text{max}}) \frac{0 - \varphi_0}{\varphi_{\text{max}} - \varphi_0}.$$

Из данного выражения можно выразить

значение момента инерции  $I$ :

$$I = \frac{2mgr}{\dot{\varphi}_{\max}^2} (1 + \cos \varphi_{\max}) \frac{0 - \varphi_0}{\varphi_{\max} - \varphi_0}. \quad (5)$$

Полученное выражение позволяет определить  $I$  при следующих допущениях: известны масса маятника  $m$  и расстояние от оси до центра масс  $r$ , угол зарядки маятника  $\varphi_0 < 0$ , максимально достигнутый угол  $\varphi_{\max}$ , наибольшая угловая скорость ( $\dot{\varphi}_{\max}$ ).

График изменения потерь энергии  $E_{\Pi}$  для величины  $I$ , определенной по (5), указан на рис. 3 (расчетная потеря энергии маятником для значения  $I$ , вычисленного согласно (5)). Он сформирован при условиях построения графиков, представленных на рис. 2. Имеющий место линейный тренд изменения  $E_{\Pi}$  свидетельствует о правомерности допущения постоянства величины момента сопротивления. В противном случае наблюдалось бы значительное отклонение  $E_{\Pi}$  от тренда по мере приближения угловой координаты к нулю и роста угловой скорости.

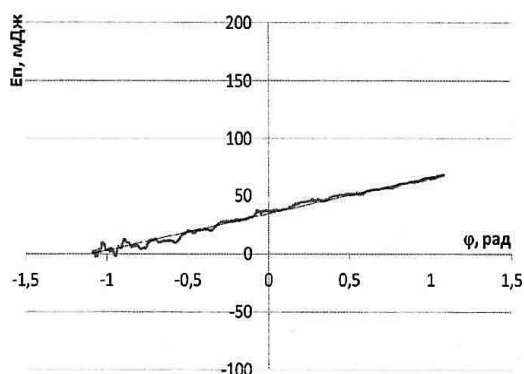


Рис. 3

С учетом полученного решения реализация второй указанной задачи оказалась возможной на основе выявленной прямолинейной зависимости изменения потерь энергии от сил сопротивления перемещению маятника на холостом ходу. Это обеспечит определение величины момента сил сопротивления  $M_{\text{сопр}}$ , обусловленного силами трения, то есть  $M_{\text{сопр}} = M_{\text{тр}}$ . Для этого необходимо знать массу маятника  $m$ , расстояние от оси его подвеса до центра масс  $r$ , а также начальный и конечный углы подъема  $\varphi_0$  и  $\varphi_{\max}$ . Тогда искомое значение

$M_{\text{сопр}} = M_{\text{тр}}$  будет определяться из выражения:

$$M_{\text{тр}} = \frac{E_{\Pi}(\varphi_{\max}, 0)}{\varphi_{\max} - \varphi_0} = mgr \frac{\cos(\varphi_{\max}) - \cos(\varphi_0)}{\varphi_{\max} - \varphi_0}. \quad (6)$$

Таким образом, в результате исследования разработаны варианты более точного определения момента инерции маятника и сил сопротивления, препятствующих перемещению маятника разрывной машины (при отсутствии анализируемого образца). Это позволило усовершенствовать общий алгоритм расчета разрывного усилия волокна (нитей), реализуемого в созданном ИК. В настоящее время он рекомендован для практического использования при реализации новых национальных стандартов на лубоволокнистое сырье.

## ВЫВОДЫ

1. При испытании волокна на машине копрового типа [3] пренебрежение влиянием сил сопротивления перемещению маятника  $M_{\text{сопр}}$  может приводить к ошибкам определения величины разрывного усилия.
2. Расчет момента инерции маятника должен учитывать изменение периода колебаний маятника по мере потери им энергии. Также требуется допущение о постоянстве сил трения в процессе движения маятника.
3. Определение момента инерции маятника возможно при известной его массе, расстоянии от оси подвеса до центра масс, угле зарядки маятника, максимальном угле отклонения после прохождения вертикального положения, а также наибольшей угловой скорости.
4. Для определения величины  $M_{\text{сопр}}$  необходимо знать массу маятника, расстояние от оси его подвеса до центра масс, а также начальный и конечный углы его подъема.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кудряшова Н. И., Кудряшов А.Б. Высокоскоростное растяжение текстильных материалов. – М.: Легкая индустрия, 1974. –

2. *Перепелкин К.Е.* Структура и свойства волокон. – М.: Химия, 1985.

3. *Пашин Е.Л., Орлов А.В.* Инструментальная система контроля разрывных характеристик льняного волокна // *Материалы и технологии.* – 2018, № 2. С. 18...21.

4. *Константинов М.Ю.* Математический маятник. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016.

#### REFERENCES

1. Kudryashova N.I., Kudryashov A.B. High-speed stretching of textile materials. – М.: Light industry, 1974. -

2. Perepelkin K.E. Structure and properties of fibers. – М.: Chemistry, 1985.

3. Pashin E.L., Orlov A.V. Instrumental system for monitoring the discontinuous characteristics of flax fiber // *Materials and technologies.* – 2018, № 2. P.18...21.

4. Konstantinov M.Yu. Mathematical pendulum. – М.: Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman, 2016.

Рекомендована кафедрой технических систем в АПК Костромской ГСХА. Поступила 31.05.21.

---