

Описанный механизм взаимодействия инструмента с поверхностью среза хорошо подтверждается (рис. 3) результатами измерения нормальных контактных нагрузок на фаске задней поверхности при резании хрупкой

латуни ЛМцА57-3-1, дающей элементную стружку. Наибольшие нагрузки, как и предполагалось, наблюдаются у режущей кромки.

## Литература

1. Козлов В.Н. Особенности обработки титановых сплавов // Прогрессивные технологические процессы в машиностроении. Кемерово, 1986. 6.

ДК 621.01

В.М. Мусалимов\*, Г.М. Исмаилов\*\*, Б.В. Соханев\*\*

## МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВЯЗКОГО ТРЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КАБЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

\*Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики

\*\*Томский государственный педагогический университет

При решении задачи повышения срока службы гибких кабелей, предназначенных для питания различных исполнительных устройств, – от электрических кранов до манипуляторов робототехнических систем, – принципиальное значение имеют вопросы изучения их механических свойств, поскольку в процессе эксплуатации кабели испытывают сложные механические деформации. Кабель представляет собой сложную составную конструкцию и вопросы прочности, износа его элементов доминируют при проектных расчетах [1]. В то же время без развития экспериментальной базы исследований механических свойств гибких кабелей [2 – 4] вряд ли можно серьезно говорить о достоверности оценок физико-механических и трибологических характеристик элементов кабельных конструкций.

Целью данной работы является экспериментально-теоретическое определение характеристик вязкого трения таких трибологических пар, какими являются элементы кабельных конструкций – электропроводящие жилы.

### 1. Экспериментальная база

Для исследований усилий взаимодействий между элементами кабельной конструкции было разработано «Устройство для испытания материалов на трение» [4] (рис. 1).

На основании 1 размещены две стойки 2, выполненные в форме направляющих для ползуна 3. К ползуну 3 прикреплен жестко держатель образца 4. Контрольный образец 6 прикрепляется к держателю образца 7. Стержень 8 с одной стороны прикреплен жестко к держателю образца 4, а стержень 9 шарнирно к держателю 7 для установления образца 5, 6. К тому же стержни жестко закреплены с упругими балками 10, 11. На упругих балках расположены датчики усилий и перемещений. Сами балки 10, 11 закреплены к стойке 14 через зажимы 15. Также на стойке 14 установлены ин-

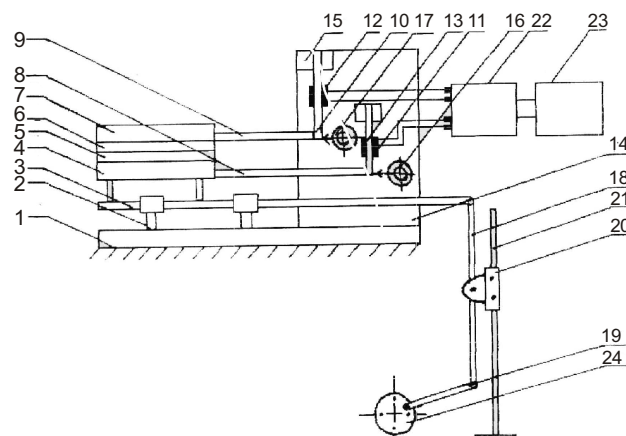


Рис. 1. Устройство для испытания материалов на трение

дикаторы перемещений 16, 17, соединенные с держателями 4, 7 через стержни 8, 9. Ползун связан с регулируемым рычагом 18, а рычаг с шатуном 19. Устройство содержит регулирующий элемент 20, соединенный шарнирно с ползуном 18 и закреплен на стойке 21 с возможностью перемещения и фиксации. Устройство также содержит регистрирующую аппаратуру, состоящую из усилителя 22 и осциллографа 23 и двигатель 24. Держатель 7 служит узлом нагружения. Держатели 4, 7 имеют продольные углубления, позволяющие осуществить укладку и закрепление любых пар трения элементов конструкции кабеля. Навизна держателя 4, как и держателя 7, состоит в создании условий для расположения исследуемых пар трения, максимально копирующих их положение в исследуемой конструкции кабеля.

Индикатор 16, 17 используется для тарирования схемы измерения. Кроме того, индикатор 16 используется также при регулировании перемещения

образца в зависимости от марки кабеля и условий эксплуатации.

## 2. Подготовка кабелей к испытаниям

Для испытаний кабель разбирается и из него извлекаются его элементы. Образцом может быть любой элемент кабеля: токопроводящая жила, сердечник, оболочка и т.д. При разборке поверхности контакта должны быть сохранены в исходном состоянии. В гибком кабеле используют сыпучие материалы. Элементы надо очищать от этих материалов, используя мягкую ткань, чтобы не повредить поверхность элементов. Не допускается использование растворителей и жидкостей любого рода, которые могут войти в реакцию с полимерной изоляцией элементов конструкции кабеля.

Выбирается пара трения: жила–жила, сердечник–жила, жила–оболочка и т.п. Длина испытуемого образца выбирается таким образом, чтобы она обеспечивала устойчивость скольжения. Длина образца 5, устанавливаемого в держателе образца 4, больше, чем длина образца 6 в держателе образца 7. Подготовленные образцы устанавливаются в держателях образцов так, чтобы они представляли прямолинейный стержень (рис. 2).

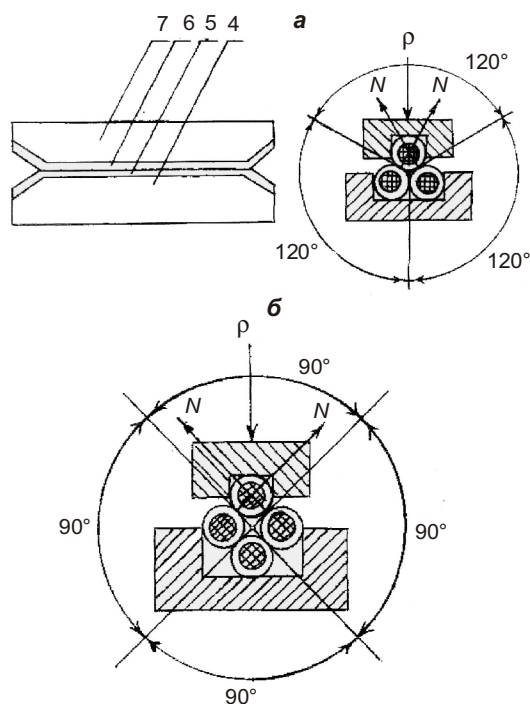


Рис. 2. Расположение пар трения в держателях образцов

После установки образцов надо обеспечить равномерное касание площадей по длине образцов. Это обеспечивается регулировкой дополнительных элементов устройства.

Реальная конструкция гибкого кабеля такова, что поверхность контакта не занимает всю поверхность токопроводящей жилы, сердечника, оболочки и т.д., а представляет ленточную поверхность. Площадки касаний располагаются под определенным углом друг к другу (рис. 2). Например, для трехжильного кабеля без сердечника площадки касания располагаются под определенным углом, равным  $120^\circ$  (рис. 2, а), а для четырехжильного кабеля этот угол будет  $90^\circ$  (рис. 2, б).

Держатели образцов устройства позволяют осуществить максимально приближенную картину расположения элементов кабеля. Данное расположение соответствует 3- и 4-жильному кабелю (рис. 2). При переходе от четырехжильного к трехжильному кабелю изменение угла с  $90^\circ$  на  $120^\circ$  достигается изменением ширины канавки для укладки двух токопроводящих жил (или любого элементарного).

При исследовании на трение оболочки по токопроводящей жиле (или наоборот) в одном держателе устанавливается выделенный из кабеля элемент оболочки, а в другом токопроводящая жила, так чтобы ширина площадки трения соответствовала реальной, аналогично можно расположить элементы кабелей с сердечником.

В данной работе представлены результаты исследований шахтного кабеля КППВ 5х1.5.

## 3. Вычисление трибологических характеристик

### 3.1. Окна свободных затухающих колебаний (ОСЗК)

Особенностью устройства является реализация возвратно-поступательного движения держателя образца, обеспечивающего циклическое взаимодействие элементов кабельных конструкций.

На рис. 3 представлены совмещенные циклограммы перемещений, скоростей и трибологических усилий сопротивления: нулевому значению скоростей  $V$  (рис. 3, а) соответствует максимальное значение перемещения держателя  $\Delta$  (рис. 3, б); гребешки на синусоиде трибологических усилий сопротивления (рис. 3, в) соответствует некоторой окрестности  $\Delta T$  точки нулевого значения скорости  $V$ . Эту окрестность назовем окном свободных затухающих колебаний (ОСЗК). На рис. 3, г в локальной системе координат изображены локальные колебательные процессы, возникающие в ОСЗК.

Введем обозначения (рис. 3, г):  $T^*$  – длительность одного колебательного процесса в ОСЗК;  $A_i$ ,  $A_{i+1}$  – пиковые значения последовательного колебательного процесса.

Определим коэффициент демпфирования  $n^*$ , характеризующий вязкость системы, с помощью логарифмического декремента затухания [5]:

$$\delta = \ln \frac{A_i}{A_{i+1}}, \quad (1)$$

тогда

$$n^* = \frac{\delta}{T^*}. \quad (2)$$

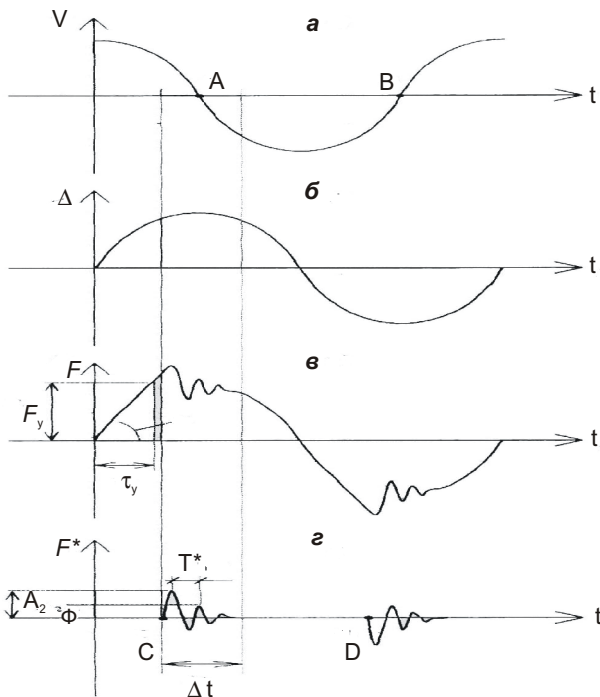


Рис. 3. Совмещенные циклограммы скоростей, перемещений и усилий

Приведем пример вычислений. Для пар трения жила-жила гибкого кабеля КПГВ 5х1.5 получаем следующие значения (строка 1 табл. 2):

$$T^* = 0.0278\text{с}, A_1 = 15 \text{ мм}, A_{n+1} = 2 \text{ мм}, \delta = 2.01, n^* = 72.5365\text{с}^{-1}.$$

Частота свободных затухающих колебаний в ОСЗК

$$k_1^* = \frac{2\pi}{T^*} = 226.195 \text{ с}^{-1}.$$

В основу вычисления характеристик было положено модельное дифференциальное уравнение [5]

$$\ddot{x} + 2n^* \dot{x} + k^{*2}x = 0, \quad (3)$$

которое описывает затухающие колебания в ОСЗК. В этом уравнении  $k^*$  – частота свободных колебаний, которая связана с частотой затухающих колебаний  $k_1^*$  по формуле

$$k_1^* = \sqrt{k^{*2} - n^{*2}},$$

что сразу дает

$$k^* = \sqrt{k_1^{*2} + n^{*2}},$$

а подстановка вычисленных значений и  $n^*$  позволяет вычислить частоту свободных колебаний:

$$k^* = 237.54 \text{ с}^{-1}.$$

Запишем общее решение дифференциального уравнения (3):

$$x = A_1 \exp(-n^*t) \cos(k_1^*t) = 15 \exp(-72.53t) \cos(226.19t).$$

Этот закон движения описывает затухающий колебательный процесс в ОСЗК (рис. 3, а).

В таблице 1 приведены значения трибологических и механических характеристик пар трения, полученные с помощью ОСЗК. Отметим, что данный метод в своей основе определяется критическими режимами эксперимента, когда особые точки А и В (рис. 3, а) определяют формирование критических точек С и D (рис. 3, д), которые являются точками бифуркации рождения циклов [6].

### 3.2. Вынужденные колебания

Рассмотрим теперь движение держателя образца под действием возмущающей силы

$$F = F_0 \sin \omega t,$$

где  $\omega$  – частота колебаний;  $F_0$  – амплитуда возмущающей силы.

Запишем модельное дифференциальное уравнение

Таблица 1

Трибологические и механические характеристики в ОСЗК

№ $\alpha$ П/П	$A_*$ , мм	$A_{n+1}$ , мм	$T^*$ , с	$A_n/A_{n+1}$	$\delta$	$n^*$ , $\text{с}^{-1}$	$k_1^*$ , $\text{с}^{-1}$	$k_1^{*2}$ , $\text{с}^{-2}$	$k_1^{*2}$ , $\text{с}^{-2}$	$c^*$ Н/мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	15.0	2.0	0.02	7.50	2.01	72.23	226.19	51 164.03	56 425.57	28.21
2	15.0	2.0	0.03	7.50	2.01	60.44	188.49	35 530.58	39 184.43	23.51
3	17.0	2.5	0.04	6.80	1.91	41.53	136.13	18 532.92	20 257.94	14.18
4	14.0	3.0	0.04	4.66	1.54	33.37	136.13	18 532.92	19 646.90	15.71
5	20.5	8.0	0.04	2.56	0.94	20.38	136.13	18 532.92	18 948.59	17.05
6	12.0	2.0	0.04	6.00	1.79	38.82	136.13	18 532.92	20 040.03	10.02
7	16.0	2.0	0.05	8.00	2.07	41.58	125.66	15 791.37	17 521.00	12.26
8	9.0	3.5	0.04	2.57	0.94	20.46	136.13	18 532.92	18 951.67	17.05
9	13.0	2.0	0.04	6.50	1.87	44.56	149.59	22 380.06	24 366.25	24.36

$m\ddot{x} + \beta\dot{x} + cx = F_0 \sin \omega t$   
или в каноническом виде:

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + k^2x = \frac{F_0}{m} \sin \omega t,$$

где  $m$  – суммарная масса движущегося верхнего держателя и его пригрузки;  $\beta$  – коэффициент сопротивления трибологических пар;  $n$  – коэффициент демпфирования системы трибологические пары плюс экспериментальная установка (ШЭ);  $k$  – частота свободных колебаний системы ШЭ.

Коэффициенты  $k$  и  $n$  отличаются от  $k^*$  и  $n^*$ . Для определения значений  $n, k$  воспользуемся полной циклограммой  $F-t$ . Коэффициент упругого сопротивления  $c$  определяется отношением предела упругого значения силы  $F_y$  к соответствующему перемещению  $\Delta_y$  – значения снимаются с осциллограмм в соответствии с пересчетными масштабами  $\mu_F$  и  $\mu_\Delta$ :

$$c = \text{tg}\alpha = \frac{F_y \mu_F}{\Delta_y \mu_\Delta} \Rightarrow k^2 = \frac{c}{m}.$$

Для тех же экспериментальных данных, что и в разделе 3.1, получаем

$$k^2 = 3884.9 \text{ c}^{-2} \Rightarrow k = 197.08 \text{ c}^{-1}.$$

На рис. 4 представлена диаграмма  $F-\Delta$ ; площадь  $S$  на рисунке определяет работу  $A$  сил вязкого сопротивления и сил упругого сопротивления

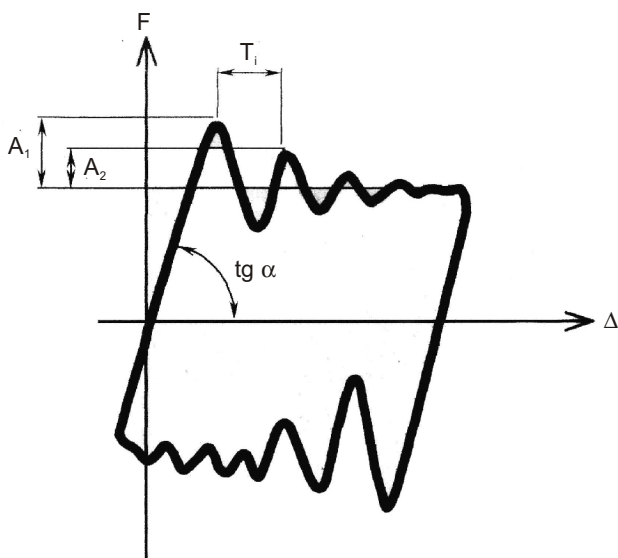


Рис. 4. Диаграмма усилие – перемещение

$$S^* = A = F_{mp} \Delta + \frac{1}{2} F_y \Delta_y = \beta x \Delta + \frac{1}{2} F_y \Delta_y.$$

Площадь  $S$  с учетом масштаба (рис. 4) равна

$$S^* = S \mu_F \mu_\Delta = 7.6 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Учитывая, что работа сил вязкого сопротивления и работа сил упругого сопротивления дают примерно равный вклад в общую работу, коэффициент

$$2n = \frac{\beta}{m} \approx \frac{S^*}{2\Delta x m},$$

так как  $\Delta_m = 2.4 \text{ мм}$ ,  $x_m = v_m = 4 \text{ мм/с}$ , то  $n = 398.15 \text{ c}^{-1}$ .

Величины  $n = 398.15 \text{ c}^{-1}$  и  $k = 197.08 \text{ c}^{-1}$  являются интегральными характеристиками системы: трибологические пары плюс испытательная машина. Приведем отношения вычисленных характеристик:

$$\frac{n}{n^*} = \frac{398.15}{72.53} = 5.49, \quad \frac{k}{k^*} = \frac{197.08}{237.54} = 0.83.$$

В табл. 2 представлены результаты вычислений относительных трибологических и механических характеристик пар трения.

#### 4. Анализ полученных результатов

Эксперименты были проведены в соответствии со схемами закрепления образцов (рис. 5).

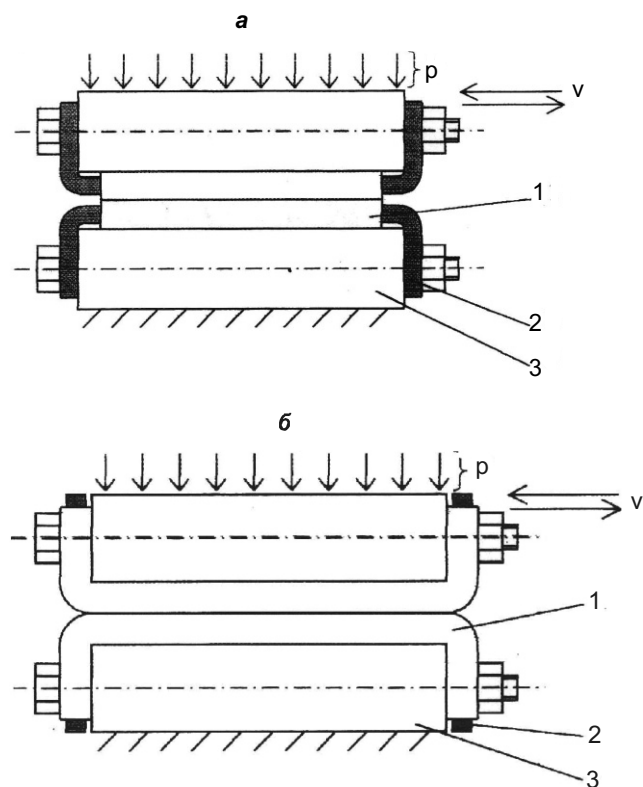


Рис. 5. Схема закрепления образцов:  
а) схема пунктов 1–5; б) схема пунктов 6–9

На рис. 5 обозначено:  $P$  – нагрузка, 1 – жила кабеля с неметаллической оболочкой, 2 – металлическая жила кабеля, 3 – держатель образца.

Из таблицы 2 столбца 7 видно, что с увеличением нагрузки  $P$  снижается коэффициент  $n^*$  (схема 5, а, номера 1–5); в то же время схема закрепления 5, б (номера 6–9) показывает на отклонения вокруг среднего значения

$$n^* = 36.6 \text{ c}^{-1}, \quad (6-9).$$

Ак же обстоит дело и с частотой  $k_i^*$   
 $k_i^* = 141.92 \text{ c}^{-1}, \quad (6-9).$

В таблице 2 представлены значения трибологических характеристик и их отношения: видно, что характеристика вязкости системы  $n$  на порядок выше характеристики вязкости  $n^*$ , получаемой в критическом режиме. Результаты не являются курьезом. Описанные методики разделов 3.1 и 3.2 не являются новыми [5]. В разделе 3.1 мы использовали однородное дифференциальное уравнение (ДУ), в разделе 3.2 – неоднородное. Возможность перехода к методике раздела 3.1 была обеспечена появлением ОСЗК, что, в свою очередь, было обеспечено определенным (критическим) режимом эксперимента. Можно сказать, что именно критические режимы порождают определенную автоколебательную систему, которая, подобно «вибратору» [5], изменяет скачкообразно коэффициент демпфирования и позволяет селективным образом выдавать информацию о локальном взаимодействии. Обычные режимы эксперимента в соответствии с методикой раздела 3.2 не предусматривают режимов автоколебаний, и расчетная ориентация только на коэффициент демпфирования  $n$  может привести к серьезным последствиям,

потому что изменение скачком трибологической характеристики мгновенно переводит всю механическую систему в неустойчивое состояние и далее приводит ее к катастрофе [6]. Отметим также, что эксперименты в соответствии с условиями эксплуатации кабелей проводились не с короткими образцами, а с длинномерными, длина которых определялась шагом скрутки жил – с шаговыми образцами [3].

Созданная экспериментальная база для испытания трибологических пар элементов кабельных конструкций позволяет создавать окна свободных затухающих колебаний (ОСЗК) и соответственно получать экспериментальные данные для вычисления характеристик упругости и вязкости трибологических пар. Обнаружено явление скачкообразного уменьшения коэффициента демпфирования. Учет этого явления имеет практические приложения и может предотвратить серьезные аварии.

Критический режим испытаний позволил с повышенной точностью оценить трибологические характеристики.

Таблица 2

Сопоставление трибологических и механических характеристик в ОСЗК и для системы трибологическая пара плюс установка

№ п/п	Нагрузка $P$ , кг	$n$ , $c^{-1}$	$c$ , н/мм	$k$ , $c^{-1}$	$n$ , $c^{-1}$	$c^*$ , н/мм	$k^*$ , $c^{-1}$	$k/k^*$	$n/n^*$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.50	398.15	19.42	197.08	72.53	28.21	237.54	0.82	5.48
2	0.60	385.21	23.58	198.25	60.44	23.51	197.95	1.00	6.37
3	0.70	409.92	26.11	193.13	41.53	14.18	142.33	1.35	9.86
4	0.80	381.68	20.43	159.82	33.37	15.71	140.16	1.14	11.43
5	0.90	351.88	23.49	161.58	20.38	17.05	137.65	1.17	17.25
6	0.50	400.89	22.70	213.11	38.82	10.02	141.56	1.50	10.32
7	0.70	385.45	19.72	167.84	41.58	12.26	132.36	1.26	9.26
8	0.90	190.00	12.22	116.56	20.46	17.05	137.66	0.84	9.28
9	1.00	169.54	10.54	102.67	44.56	24.36	156.09	0.65	3.80

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мусалимов В.М. и др. Элементы механики кабельных конструкций. Томск, 1981.
2. Мусалимов В.М., Соханев Б.В. Механические испытания гибких кабелей. Томск, 1984.
3. Исмаилов Г.М. Исследование циклического износа элементов кабельных конструкций: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, 1993.
4. А. с. № 1821689. Устройство для испытаний материалов на трение / Г.М. Исмаилов, Б.В. Соханев, В.М. Мусалимов. – опубл. в Б.И., 1993, № 22.
5. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. Л., 1976.
6. Неймарк Ю.И. Динамические системы и управляемые процессы. М., 1978.