

УЧЕТ ЖЕСТКОСТИ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ ПРИ ОЦЕНКЕ СИЛЫ ИХ НАТЯЖЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

© 2023 г. К.Р. Муратов^{1,*}, **В.Ф. Новиков¹**, С.М. Кулак^{1,**}, Р.А. Соколов^{1,***},
Р.Ф. Сафаргалиев^{1,****}, С.А. Мусихин^{1,*****}, В.В. Проботюк^{1,*****}

¹Тюменский индустриальный университет, Россия 625000 Тюмень, ул. Володарского, 38
E-mail: *muratows@mail.ru; **kulaksm@tyuiu.ru; ***falcon.rs@mail.ru; ****ruslan.safargaliev@mail.ru;
*****musihinsa@tyuiu.ru; *****probotjukvv@tyuiu.ru

Поступила в редакцию 19.12.2022; после доработки 24.01.2023
Принята к публикации 27.01.2023

Рассмотрены результаты ранее выполненного обследования стальных канатов вантового перехода, где определяли силу натяжения по частотам их поперечных колебаний. Выявлены особенности методики выполнения измерений собственных частот колебаний каната, касающиеся способа возбуждения колебаний, их ориентации и объема информативной выборки регистрируемых частот. Физическая модель, лежащая в основе методики измерений, не учитывает упругой изгибной реакции каната и вязкого трения. Показано, что учет таких факторов позволяет не только повысить точность измерения силы натяжения, но и открывает возможность выявления дефектов в канате. Например, обрыв волокон каната, его утонение в результате коррозии или истирания приводит к убыванию изгибной жесткости. Изменение состояния канатной смазки или проникновение жидкости внутрь каната приводит к изменению коэффициента затухания его колебаний. Результаты исследования могут быть использованы для создания мониторинговых систем состояния стальных канатов.

Ключевые слова: вантовый мост, стальной канат, стальной трос, стоячие волны, сила натяжения каната, изгибная жесткость, затухание колебаний, мониторинг состояния.

DOI: 10.31857/S0130308223020021, EDN: BWKNPH

ВВЕДЕНИЕ

Интерес с точки зрения диагностирования технического состояния представляют конструкции, имеющие в своем составе систему удерживающих его канатов (тросов, вант) [1]. Наряду с выявлением в них дефектов различными методами и средствами [2—7] имеет важное значение оценка действующей силы натяжения. Это необходимо для определения несущей способности всей конструкции [8—11], а в случае периодического мониторинга силы натяжения возможно выявление зарождающихся неисправностей.

Для контроля напряженно-деформированного состояния конструкций применяют различные расчетные и эмпирические методы. Так, например, метод тензометрирования [12] имеет высокую чувствительность измерения деформации (напряжения), но при этом не позволяет определить их абсолютные значения, если монтаж тензодатчиков осуществлен в предварительно нагруженном состоянии (во время эксплуатации). Кроме того, тензометрический метод не может быть применен для объектов с большой кривизной поверхности, таких как волокна каната.



Рис. 1. Вантовый переход: слева — береговой участок; справа — надводная часть.

Простым и логичным является применение устройств контроля сил натяжения канатов (как, например, [13]). Использование самого объекта контроля в качестве информативного датчика позволит сэкономить на дополнительных устройствах. В частности, известен вибрационный способ определения натяжения вантового элемента моста, применяемый для контроля испытываемых им усилий [14]. В основе метода лежит модель поперечных колебаний нерастяжимой нити, где спектральный состав собственных колебаний зависит от силы натяжения. Ярким примером является гитарная струна. Стальной канат в первом приближении рассматривается как нерастяжимая нить. При этом его изгибная жесткость, внутреннее трение и другие факторы не учитываются. Это, несомненно, будет являться источником систематических погрешностей метода. Чтобы оценить их уровень были проанализированы результаты ранее выполненного обследования вантового перехода (рис. 1) на одной из рек ЯНАО [15] и проведены лабораторные исследования.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕНЕЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

В работе [15] силу натяжения стального каната определяли по результатам измерения частот собственных колебаний виброанализатором СД-21. Канат одним своим концом закреплен за кожух перехода, перекинут через пилон (без зажатия) и вторым концом жестко закреплен на береговом якорь. На рис. 2 схематично показаны поперечные стоячие волны и примерное место установки вибродатчика прибора. Ударом деревянной киянки в вертикальном или горизонтальном направлении осуществлялось возбуждение поперечных колебаний соответствующей ориентации. Вибродатчик крепился к канату магнитным держателем в соответствии с направлением колебаний вертикально или горизонтально (рис. 3). Регистрацию спектра колебаний виброускорения выполняли с максимальным частотным разрешением 1600 линий и числом усреднений 8. Время регистрации спектра, примерно равное 30 с, было меньше времени релаксации колебаний каната в 3—5 раз.

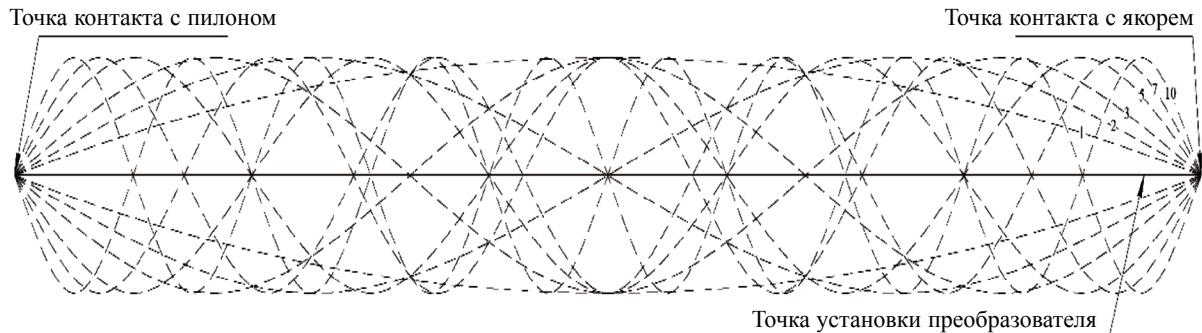


Рис. 2. Характер распределения стоячих волн по длине каната.



Рис. 3. Расположение вибродатчика на канате: слева — для регистрации горизонтальных колебаний; справа — для регистрации вертикальных колебаний.

Характер спектра виброускорения колебаний приведен на рис. 4а, где в большей степени проявляются гармоники высокого порядка. При этом первые гармоники имеют малую амплитуду, что ухудшает точность регистрации их частот. Причиной слабости первых гармоник является относительная удаленность точки возбуждения и регистрации (см. рис. 2) от пучностей низкочастотных колебаний.

Для увеличения амплитуды первых гармоник их возбуждение осуществляли ручной раскачкой каната, чтобы его средняя точка имела наибольшую амплитуду (контролировалось визуально). После раскачки проводили удар киянкой, чтобы параллельно создать высокие частоты. Характер спектрограммы такого гибридного возбуждения колебаний изображен на рис. 4б.

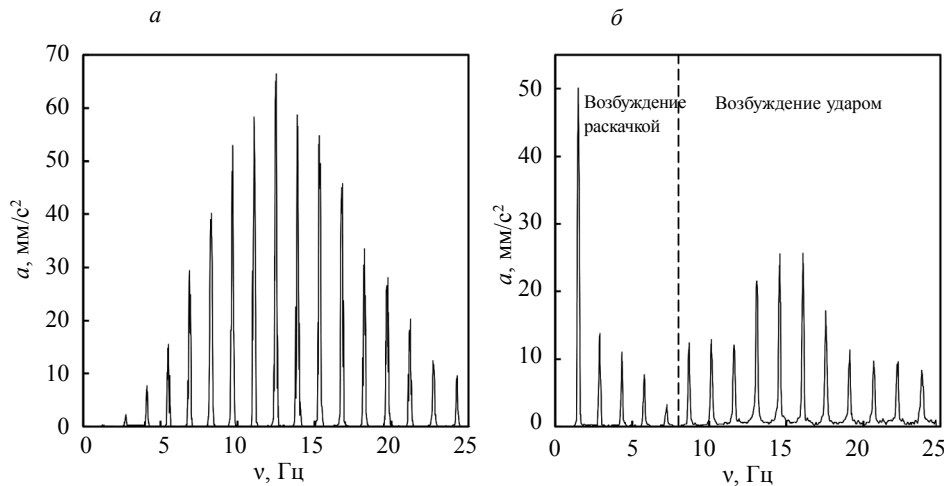


Рис. 4. Характер спектра виброускорения поперечных колебаний береговой части каната: при возбуждении колебаний ударом (а); гибридное возбуждение колебаний раскачкой и ударом (б).

Согласно [14], учитывали три первых тона (частоты, гармоники) спектра колебаний. Зависимость собственных частот поперечных колебаний каната от силы натяжения имеет вид:

$$\nu = \frac{n}{2L} \cdot \sqrt{\frac{F}{\tau}}, \quad (1)$$

где $n = 1$ — номер гармоники (тона) собственных колебаний каната; L — его длина; F — сила натяжения; τ — масса единичной длины (линейная плотность) каната. Вычисленные с помощью уравнения (1) силы натяжения в работе [15] соответствовали ожидаемым значениям и были учтены в оценке их влияния на напряженно-деформированное состояние [16].

Последующий анализ результатов обследования поставил ряд вопросов, связанных с методикой измерений и заложенной в нее физической модели, что в конечном итоге обуславливает точность определения силы натяжения. Например, было замечено что спектр колебаний надводного участка каната (рис. 5) был более сложным по сравнению с береговым (рис. 4). В спектре надводного участка ярко прослеживается отклонение частотного шага от наблюдаемого между низкочастотными (от первой до седьмой) и высокочастотными гармониками. Также можно видеть вблизи основных гармоник (отмечены красными стрелками на рис. 5) добавочные рефлексы, расстояния между которыми кратно частотному шагу основного спектра колебаний. Кроме того, на надводном участке наблюдается отличие частот при возбуждении колебаний в вертикальном и горизонтальном направлениях. Это отличие связано с вертикальной ориентацией плоскости петли каната в месте его крепления за кожух перехода (см. рис. 1, справа), т.е. такая петля сокращает примерно на 1 м эффективный участок колебаний каната в вертикальной плоскости по сравнению с колебаниями в горизонтальной. Изменение длины L , согласно уравнению (1), приведет к изменению частотного шага ν_1 на 2,5 %, что находится в согласии с наблюдениями (рис. 5).

В расчетном выражении (1) частота ν тона прямо пропорциональна его номеру n , угол наклона определяется значениями F , L , τ . На рис. 6 показаны зависимости $\nu(n)$ для одного из канатов на его

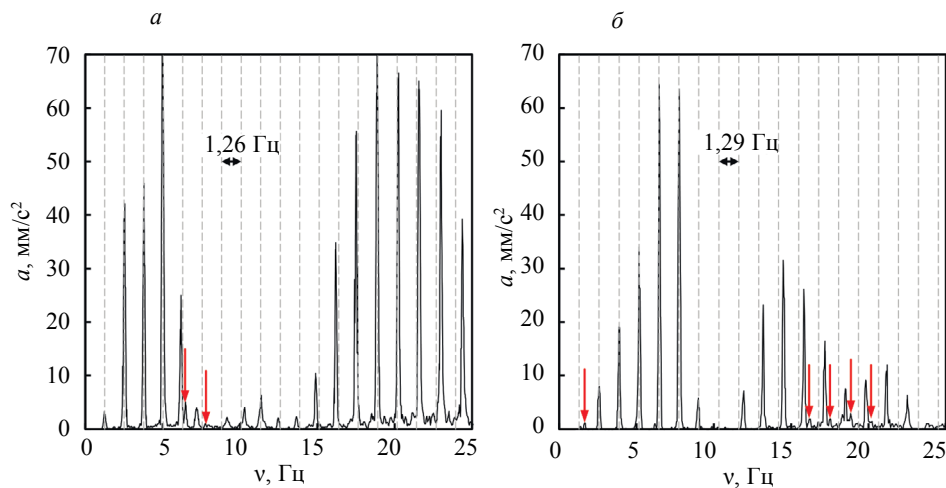


Рис. 5. Характер спектра поперечных колебаний каната на его речном участке: *a* — колебания в горизонтальном направлении; *b* — колебания в вертикальном направлении.

береговом (*a*) и надводном (*b*) участках. Ожидаемо, что для берегового участка (рис. 6*a*) экспериментальные значения лучше укладываются на прямую, чем для надводного участка. Также можем видеть, что угол наклона прямых, построенных по первым трем гармоникам и по всей их совокупности, отличается, причем в большей степени для надводной части каната. Поскольку угол наклона связан с силой натяжения F , разброс ее значения, определяемой согласно методике [14], достигал 16 % для некоторых канатов на их надводной части. Таким образом, для определения силы натяжения каната по спектру его колебаний большей достоверностью обладают результаты измерения берегового участка.

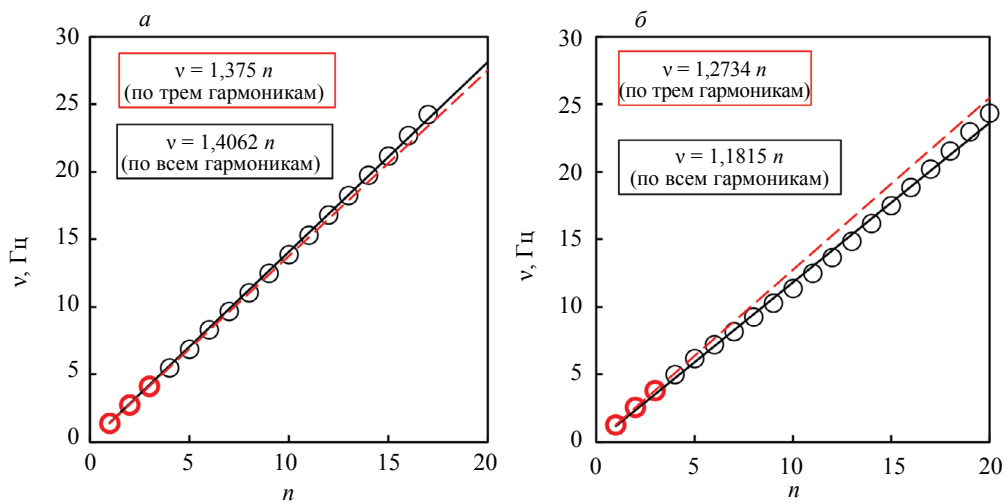


Рис. 6. Зависимость частоты гармоники от ее номера: *a* — береговой участок; *b* — надводный участок. Красная штриховая линия — аппроксимация по первым трем точкам, черная сплошная — аппроксимация по всей совокупности точек.

Согласно уравнению (1), отношение ν/n не зависит от номера гармоники n . На рис. 7 можно видеть, что с ростом номера гармоники это отношение монотонно растет. Учет приборной погрешности (штриховыми линиями обозначены границы коридора погрешностей) объяснить это не смог. Такое отклонение от закономерности (1) наблюдалось на всех канатах при обследовании, причем на ослабленных в большей степени, т.е. отклонение экспериментальной зависимости от теорети-

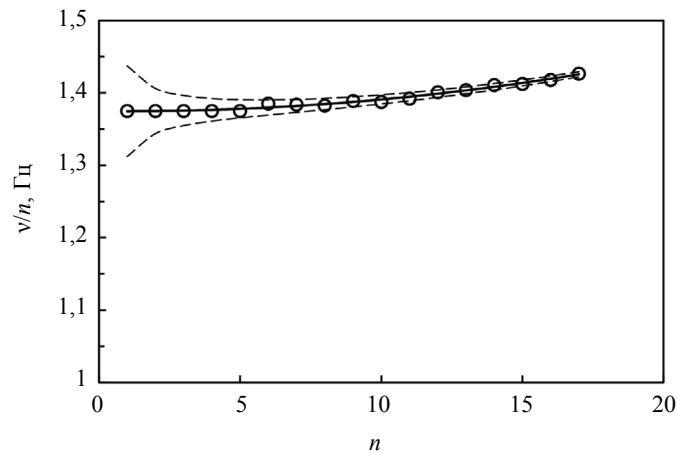


Рис. 7. Характер зависимости отношения v/n от номера гармоники для одного из канатов на его береговом участке.

ческой является объективной реальностью. Следовательно, закономерность (1) отражает не все процессы, сопровождающие поперечные колебания каната. Поэтому возникает естественный вопрос о точности методики [14] и границах ее применимости.

МОДЕЛЬ КОЛЕБАНИЙ КАНАТА С УЧЕТОМ ЕГО РЕАКЦИИ НА ИЗГИБ И ВЯЗКОГО ТРЕНИЯ

Уравнение (1) представляет собой решение дифференциального уравнения поперечных колебаний нерастяжимой нити для случая стоячей волны без учета затухания:

$$F \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \tau \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (2)$$

где u — поперечное смещение материальных точек; x — продольная координата; t — время.

Уравнение (2) представляет собой второй закон Ньютона, где в левой части стоит поперечная сила, действующая на малый элемент нити и являющаяся поперечной компонентой силы натяжения. Такая модель не учитывает реакции изгиба каната, который является линейным объектом (нитью) только в первом приближении. Если учесть реакцию каната при изгибе, то его можно уподобить однородному стержню, дифференциальное уравнение свободных поперечных колебаний которого [17] имеет вид:

$$-EI \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = \tau \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (3)$$

где E — модуль упругости; I — момент инерции поперечного сечения, их произведение EI — изгибная жесткость.

Можно также учесть влияние затухания, при котором в первом линейном приближении добавится поперечная сила, пропорциональная скорости смещения малого элемента $-r \frac{\partial u}{\partial t}$, где r — коэффициент сопротивления.

Тогда для натянутого каната, обладающего изгибной жесткостью и испытывающего вязкое трение, уравнение будет выглядеть так:

$$F \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - EI \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} - r \frac{\partial u}{\partial t} = \tau \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}. \quad (4)$$

В случае стоячей гармонической волны (с экспоненциальным затуханием) решение дифференциального уравнения (4) для частоты колебаний примет вид:

$$v^2 = \frac{F}{4\tau L^2} n^2 + \left(\frac{\pi^2 EI}{4\tau L^4} n^4 - \frac{\beta^2}{4\pi^2} \right). \quad (5)$$

Здесь n — номер тона (гармоники); $\beta = r/2\tau$ — коэффициент затухания. Согласно выражению (5), изгибная реакция каната и фактор затухания приводят к нелинейности зависимости $v(n)$, причем в большей степени у канатов, имеющих меньшую силу натяжения F . Также эта нелинейность отражает дисперсию поперечных волн на канате.

Чтобы убедиться в наших вычислениях были выполнены лабораторные исследования на канате малого сечения и проволоке.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Стальной канат диаметром 8 мм, длиной 0,91 м крепился в разрывной машине ИР-50. Вблизи каната располагался электромагнит, который за счет пондеромоторного действия заставлял канат совершать колебания. Переменный ток в электромагните создавался генератором ГЗ-117. Регулируя частоту переменного тока генератора, добивались устойчивой картины резонансных колебаний при различном механическом усилии, прикладываемом вдоль оси каната. Контроль амплитуды колебаний для определения первой резонансной частоты v_1 осуществляли тактильно и визуально. Систематическая погрешность измерения силы минимизировалась обнулением силоизмерительной системы разрывной машины перед каждым натяжением. После разгрузки машины смещение «нуля» усилия не наблюдалось. На рис. 8 можем видеть линейный характер зависимости $v_1^2(F)$, которая находится в согласии с уравнением (5). Коэффициент достоверности линейной аппроксимации R^2 составил 0,9995. Экстраполяция в область $F = 0$ Н (ненатянутое состояние) дает значение собственной частоты колебаний каната порядка 15 Гц, что обусловлено его сопротивлением изгибу (EI) и затуханием колебаний (β), согласно уравнению (5).

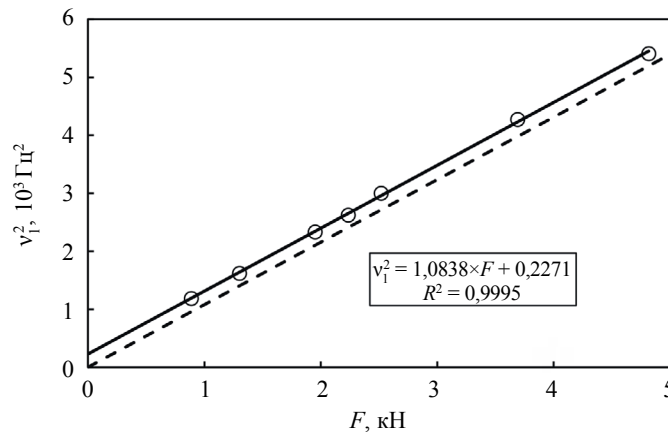


Рис. 8. Зависимость квадрата частоты колебаний основного тона от силы натяжения каната.

Проведенные лабораторные измерения с канатом дали качественное подтверждение правильности уравнения (5), однако количественную оценку здесь выполнить сложно, так как изгибная жесткость каната и тем более коэффициент затухания не были известны. Поэтому в качестве простой модели каната взяли стальную проволоку диаметром 1,57 мм, длиной 0,72 м. В этом случае изгибная жесткость EI легко вычисляется, а из-за отсутствия внутреннего трения (как у каната) ожидается пренебрежимо малый коэффициент затухания β . Подвешиванием грузов осуществляли натяжение проволоки силой 40 и 80 Н. Возбуждение колебаний осуществлялось электромагнитом.

Приведем уравнение (5) к следующему виду:

$$f = \frac{v^2}{n^2} 4\tau L^2 = F + n^2 \cdot \frac{\pi^2 EI}{L^2} - \frac{\beta^2 \tau L^2}{\pi^2 n^2} = F + n^2 \cdot k - \frac{m}{n^2}. \quad (6)$$

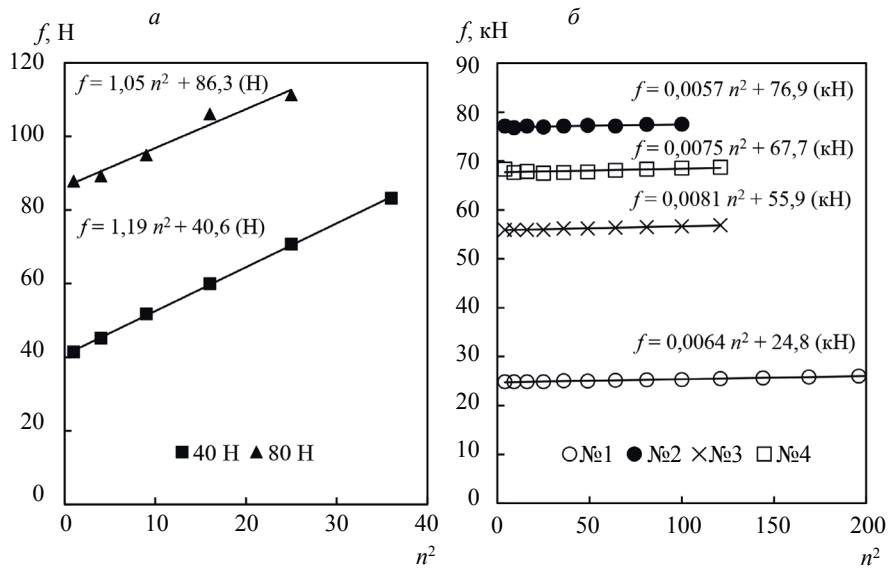


Рис. 9. Зависимость $f(n^2)$ для стальной проволоки (а) и четырех обследованных канатов вантового перехода (б).

Здесь параметр f имеет размерность силы, свободный член F является силой натяжения каната, изгибную жесткость каната учитывает коэффициент $k = \pi^2 EI/L^2$, коэффициент $m = \beta^2 \tau L^2/\pi^2$ отражает затухание колебаний.

На рис. 9а для исследованной проволоки показана зависимость $f(n^2)$. Ее линейный характер говорит о пренебрежимо малом влиянии коэффициента затухания, т.е. в уравнении (6) можно принять $m \cong 0$ и в этом случае зависимость $f(n^2)$ становится линейной, где коэффициент k является угловым коэффициентом прямой. Расчетный момент инерции проволоки $I = \pi d^4/64 = 0,298 \text{ мм}^4$, эмпирические $0,298$ и $0,263 \text{ мм}^4$ при нагрузках 40 и 80 Н соответственно. Расчетные силы натяжения составили 40,6 и 86,3 Н.

По результатам обследования стальных канатов на рис. 9б представлена зависимость $f(n^2)$, которая как в эксперименте с проволокой демонстрирует линейный характер. Значения усилий оказались на 1-2 % меньше результатов, полученных по методике [14]. Изгибные жесткости канатов были в диапазоне 670—960 Па·м⁴. Чтобы определить корректность этих значений на консольно закрепленном образце обследованного каната измерен прогиб при подвешивании грузов от 100 до 500 г. По известным уравнениям теории сопротивления материалов изгибная жесткость составила 120—210 Па·м⁴. Образец был в ненапрянутом состоянии, поэтому меньшие в пять раз значения изгибной жесткости ожидаемы [18, стр. 83]. Таким образом, полученные согласно зависимости (6), изгибные жесткости обследованных канатов корректны и не являются случайными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для более точной оценки силы натяжения стальных канатов по спектру их собственных колебаний необходимо выполнять ряд методических рекомендаций: использовать весь возможный набор частот колебаний; возбуждение колебаний выполнять в широком диапазоне частот, а также обращать внимание на ориентацию колебаний (горизонтальные или вертикальные).

Учет изгибных сопротивлений каната при определении силы его натяжения по спектру собственных колебаний дает более корректные значения по отношению к результатам, полученным без учета изгибной жесткости. Такое незначительное отличие в большинстве случаев меньше требуемой погрешности определения силы натяжения. Однако ценность здесь не в более точном измерении натяжения, а в возможности определения его изгибной жесткости EI . Изгибная жесткость является интегральной характеристикой упругих сопротивлений и сопротивлений типа сухого трения скольжения в канате [18], т.е. интегрально отражает состояние каната. Следовательно, открывается возможность мониторинга его состояния. Например, повреждение внешних волокон каната приведет к относительно большей убыли изгибной жесткости, чем линейности плотности τ и, согласно выражению (5), должно повлиять на частотный спектр.

Наряду с изгибной жесткостью каната теоретически показано влияние коэффициента затухания β , обусловленного вязким трением. Инструментальное измерение этого параметра позволило бы отслеживать состояние канатной смазки или определять проникновение жидкости внутрь каната.

Авторы благодарят за поддержку данного исследования национальный проект «Наука и университеты» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FEWN-2021-0012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бугаев В.Я. Исследование вопросов проектирования вантово-балочных мостовых систем / Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1975. 26 с.
2. Сивирюк В.Л., Грамотник В.К., Безруков А.Н., Штейгер А.Г. О дефектоскопии стальных канатов магнитным методом с применением структуроскопа КРМ-ЦК-2М // Дефектоскопия. 2006. № 6. С. 17—25.
3. Семенов А.В., Слесарев Д.А. Неразрушающий контроль стрендовых канатов больших диаметров // Контроль. Диагностика. 2019. № 4. С. 20—27. DOI 10.14489/td.2019.04.pp.020-027
4. Mazurek P., Roskosz M., Kwaśniewski J. Influence of the Size of Damage to the Steel Wire Rope on the Magnetic Signature // Sensors. 2022. V. 22. Is. 21. Paper № 8162. DOI: 10.3390/s22218162
5. Zhang D., Zhang E., Yan X. Quantitative method for detecting internal and surface defects in wire rope // NDT and E International. 2021. № 119. Paper № 102405. DOI: 10.1016/j.ndteint.2021.102405
6. Осипов С.П., Чахлов С.В., Батракин А.В., Жумабекова Ш.Т., Ядренкин И.Г. Выбор оптимальных энергий рентгеновского излучения в системах цифровой радиографии стальных канатов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2016. № 5. С. 37—45.
7. Peng P.-C., Wang C.-Y. Use of gamma rays in the inspection of steel wire ropes in suspension bridges // NDT and E International. 2015. № 75. P. 80—86. DOI: 10.1016/j.ndteint.2015.06.006
8. Ахмедов А.Д. К расчету опорного контура радиально-вантовой двухпоясной системы // Альманах современной науки и образования. 2014. № 5—6 (84). С. 27—35.
9. Воронцов А.Н., Слесарев Д.А., Волоховский В. Ю., Шпаков И. И. Диагностические показатели стальных канатов как исходные данные прогноза остаточного ресурса // Контроль. Диагностика. 2010. № 5. С. 30—34.
10. Слесарев Д.А., Воронцов А.Н. Вероятностные характеристики оценки прочности и ресурса стальных канатов по результатам дефектоскопии // Дефектоскопия. 2016. № 2. С. 55—62.
11. Ахмедов А.Д. Методы определения напряженно-деформированного состояния радиально-вантовой системы на стадии предварительного натяжения / Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии: Сборник статей 78-й всероссийской научно-технической конференции, Самара, 19—23 апреля 2021 года. Под редакцией М.В. Шувалова, А.А. Пищулева, А.К. Стрелкова. Самара: Самарский государственный технический университет, 2021. С. 945—956.
12. Мехеда В.А. Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. пособие. Самара: изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. 56 с.
13. Таштанбаева В.О. Устройство контроля натяжения каната шахтных подъемных установок // Горная промышленность. 2020. № 4. С. 125—128. DOI 10.30686/1609-9192-2020-4-125-128
14. Яшинов А.Н., Чаплин И.В., Поляков С.Ю., Снежков И.И. Пат. 2613484. Российская Федерация, МПК G01L 1/10 G01L 5/04. Способ определения усилия натяжения вантового элемента моста: заявл. 17.08.15; опубл. 16.03.17. Патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный ун-т путей сообщения» (СГУПС).
15. Научные исследования и диагностика технического состояния стальных конструкций вантового перехода промышленного газопровода через реку Пурпе на территории Губкинского газового месторождения: Отчет о НИР (итоговый) / Тюменский индустриальный университет (ТИУ); Руководитель В.Ф. Новиков. По договору № 101 от 20.04.2018. Тюмень, 2018. 61 с.
16. Муратов К.Р., Соколов Р.А., Сафаргалиев Р.Ф., Мамадалиев Р.А. Моделирование распределения нагрузки металлоконструкций вантового перехода при разбалансировке усилий тросовой системы // Инженерный вестник Дона. 2022. № 12 (96).
17. Работнов Ю.Н. Соппротивление материалов. М.: Физматгиз, 1962. 456 с.
18. Малиновский В.А. Стальные канаты: аналитический справочник Одесса: Астропринт, 2016. 252 с.