ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 4, с. 138–144

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, ____ МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 550.834+681.787+628.517+681.7.068+ 656.618.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТОДА КРЕПЛЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ КОСЫ ПРИ БУКСИРОВКЕ НА ПАРАМЕТРЫ ЕЕ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА¹

© 2020 г. А. А. Власов^{а,*}, М. Ю. Плотников^а, В. С. Лавров^а, С. С. Киселев^а, А. С. Алейник^а

^а Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО) Россия, 197101, С.-Петербург, Кронверкский просп., 49

*e-mail: salusnetklim@yandex.ru Поступила в редакцию 03.03.2020 г. После доработки 13.03.2020 г. Принята к публикации 14.03.2020 г.

Исследуется зависимость плотности шума в сигнале волоконно-оптической буксируемой косы в полосе частот $10 \ \Gamma_{\rm U}-1 \ \kappa \Gamma_{\rm U}$ от скорости буксировки в диапазоне от 1 до 5 узлов, от коэффициента относительного удлинения ее эластичной секции, ее типа, а также от типа крепления эластичной секции к буксируемому телу. Кроме того, получена зависимость величины растягивающей нагрузки на исследуемую косу от скорости буксировки. Приведены полученные в ходе натурных испытаний экспериментальные данные по уровню шумов косы и их анализ. Достигнутое снижение уровня шумов буксировки при применении эластичной секции при креплении эластичной секции к силовому элементу буксируемого тела и до двух раз во всем исследуемом диапазоне частот.

DOI: 10.31857/S0032816220040369

введение

В настоящее время буксируемые сейсмические косы широко применяются в качестве приемников зондирующего акустического сигнала при геофизических исследованиях и сейсмической разведке полезных ископаемых в области континентального шельфа [1].

Буксировка сейсмической косы приводит к воздействию специфических для данного процесса шумовых факторов, следствием чего является повышение уровня шума в сигналах с гидрофонов сейсмической косы. Обзор тематики шумовых воздействий при буксировке и борьбы с ними представлен в работе [1].

Данная работа посвящена исследованию влияния метода крепления волоконно-оптической сейсмической косы к судну-буксиру при буксировке на параметры ее выходного сигнала. Одним из наиболее значительных шумовых факторов, действующих на сейсмическую косу, являются рывковые воздействия судна-буксира. Основной причиной возникновения данного вида шумовых воздействий является неравномерность скорости хода судна-буксира, особенно при движении по волнам с переменной ветровой нагрузкой. Проявляются данные воздействия в виде изменения величины натяжения при буксировке сейсмической косы, что приводит к соответствующему изменению скорости движения чувствительной части с гидрофонами, изменению ее длины, а также попутному увеличению шумов обтекания (так как их интенсивность зависит также и от скорости буксировки) [1–3].

Шумовые воздействия данного типа относительно низкочастотны (единицы и десятки герц), что обусловлено большой массой и инертностью судна, а также волновой обстановкой на море. Как правило, для снижения влияния данных воздействий буксируемое тело прикрепляется к судну через эластичную секцию, выполненную из упругого материала и расходующую энергию рывка на изменение длины (упругую деформацию растяжения) самой секции без передачи к чувствительной части.

В данной работе исследуется зависимость уровня шумов в сигнале волоконно-оптической сейсмической косы от относительного коэффициен-

¹ Результаты данного исследования были представлены и обсуждены на третьей международной конференции "Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2020" (http://or-2020.permsc.ru/, 22–24 сентября, Россия, Пермь).



Рис. 1. Схема проведения натурных испытаний. *1* – судно-буксир; *2* – бортовая часть оборудования волоконно-оптической косы; *3* – устройство постановки-выборки (кабельный барабан); *4* – эластичная секция; *5* – буксируемое тело; *6* – буй; *7* – груз-заглубитель; *8* – чувствительная часть (гидрофоны); *9* – концевое тело; *10* – дно.

та удлинения эластичной секции, а также от способа соединения эластичной секции с телом буксируемой косы — закрепления к внешней оболочке и закрепления к силовому элементу волоконно-оптического кабеля при помощи специально разработанной врезной секции. Представлено техническое решение, обеспечивающее приемлемые параметры.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование влияния метода крепления волоконно-оптической сейсмической косы при буксировке на параметры ее выходного сигнала проводилось в ходе натурных испытаний опытного образца, разработанного НИЦ Световодной фотоники Университета ИТМО. Состав бортового оборудования, структура чувствительной части и особенности обработки сигналов разработанной волоконно-оптической косы подробно рассматриваются в работах [4—6].

В ходе данной работы проводилась оценка уровня шумов в выходном сигнале сейсмической косы при различных значениях скоростей буксировки в зависимости от значения коэффициента относительного удлинения эластичной секции, а также от способа прикрепления эластичной секции к буксируемому телу. Схема осуществления буксировки представлена на рис. 1.

Для экспериментальной проверки было изготовлено четыре образца эластичных секций, отличающихся значением относительного коэффициента удлинения. Первый образец представляет собой участок стального троса с защитным слоем из ПВХ 6/8 PVC, соответствующий варианту буксировки без эластичной секции ввиду пренебрежимо малого коэффициента относительного удлинения стального троса при нагрузках, не превышающих 20% его прочности на разрыв. Второй образец представляет собой веревку из полиамидных нитей "Коломна" с внешним диаметром 11 мм производства АО "Канат", третий образец — веревку из свитых синтетических волокон с внешним диаметром 9 мм, четвертый — веревку из полиамидных нитей Beal Booster III с внешним диаметром 9.8 мм. Длина эластичных секций при буксировке составляла ~10 м.

Схемы прикрепления эластичных секций к судну-буксиру и к буксируемому телу представлены на рис. 2. Контроль натяжения буксируемого тела осуществлялся при помощи включенного в разрыв эластичной секции металлорезистивного тензометрического датчика сжатия-растяжения 00STC-001T-G0-00F, прием и обработка сигналов которого осуществлялась блоком OBEH MB110-224.1TД. В ходе данной работы закрепление эластичной секции к буксируемому телу осуществлялось двумя вариантами — при помощи самозатягивающейся накладной петли (так называемый "китайский палец") и разработанной врезной секции, обеспечивающей жесткую связь с силовым элементом волоконно-оптического кабеля.

В ходе эксперимента проводилась оценка уровня шума в выходном сигнале волоконно-оптической сейсмической косы во время ее буксировки со скоростями 1–5 узлов. Оценка усред-

Таблица 1. Зависимость коэффициента жесткости k [H/м] изготовленных эластичных секций от прилагаемой растягивающей нагрузки

Варианты эластичной секции	Скорость буксировки, узлов				
	1	2	3	4	5
№ 1 (стальной трос 6/8 PVC)	>10 ⁵	>10 ⁵	>10 ⁵	>10 ⁵	>10 ⁵
№ 2 (веревка "Коломна")	397	929	1312	1615	1994
№ 3 (витая веревка)	397	877	1117	1468	1671
№ 4 (веревка Beal Booster III)	397	526	656	807	824



Рис. 2. Схемы крепления эластичной секции: **a** – к судну-буксиру, **б** – к буксируемому телу при помощи врезной крепежной секции, **b** – к буксируемому телу при помощи накладной самозатягивающейся петли. 1 – крепление тензодатчика к балке на корме судна; 2 – балка на корме судна; 3 – тензодатчик; 4 – крепление эластичной секции к тензодатчику; 5 – эластичная секция; 6 – буксируемое тело волоконно-оптической сейсмической косы; 7 – силовой элемент внутри волоконно-оптического буксируемого кабеля; 8 – самозатягивающаяся накладная петля.

ненного по 16 каналам буксируемой косы уровня шума проводилась в диапазоне частот от 10 Гц до 1 кГц. Данный частотный диапазон обусловлен особенностями проведения геофизических исследований в инженерной сейсморазведке.

На первом этапе эксперимента буксировка осуществлялась с применением эластичной секции по варианту № 1 с креплением к буксируемому кабелю при помощи накладной самозатягивающейся петли ("китайский палец", рис. 2в) в диапазоне скоростей буксировки от 1 до 5 узлов. На втором этапе эксперимента буксировка осуществлялась при постоянной скорости 4 узла с применением эластичных секций по вариантам № 1-№ 4 с креплением к буксируемому кабелю при помощи накладной самозатягивающейся петли. На третьем этапе эксперимента буксировка осуществлялась при постоянной скорости 4 узла с применением эластичных секций по вариантам № 1-№ 4 прикреплением к буксируемому кабелю при помощи врезной крепежной секции для обеспечения связи с силовым элементом кабеля (рис. 2б). Скорость 4 узла была выбрана как наиболее оптимальная по временному разрешению сканирования при изысканиях, ввиду чего она наиболее часто применяется в инженерной сейсморазведке.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Перед проведением натурных испытаний по буксировке волоконно-оптической сейсмической косы было проведено исследование зависимости величин удельных коэффициентов относительного удлинения изготовленных эластичных секций от приложенной растягивающей нагрузки. Результаты данного исследования представлены на рис. 3. Исследование проводилось в соответствии с ГОСТ-Р ЕН1891-2012 (ISO EN1891).

Далее, с помощью опроса тензометрического датчика была получена экспериментальная зависимость растягивающей нагрузки [кг] от скорости буксировки ϑ [узл.], она может быть описана следующим выражением (при достоверности аппроксимации $R^2 = 0.9984$):

$$F_{\rm T} = 5.9988\vartheta^{1.4821}.$$
 (1)

Сопоставляя данные графиков на рис. 3 и формулы (1), можно оценить коэффициент жесткости эластичных секций при различных скоростях буксировки [7]:

$$k = \frac{F_{\rm T}}{\Delta l} = \frac{F_{\rm T}}{\varepsilon l},\tag{2}$$

где k, Н/м — коэффициент жесткости; $F_{\rm T}$, Н — сила приложенной растягивающей нагрузки; Δl , м — изменение длины эластичной секции под воздействием растягивающей нагрузки; ε , отн. ед. — коэффициент относительного удлинения эластичной секции; l, м — длина эластичной секции.

Экспериментальные данные, полученные на первом этапе эксперимента (буксировка с секцией по варианту № 1 при разных скоростях, крепление при помощи накладной петли (рис. 2в)), представлены на рис. 4. Видно, что уровень шумов в области нижних частот до 200 Гц растет с

Коэффициент удлинения, отн. ед.



Рис. 3. Исследование зависимости удельного коэффициента изготовленных эластичных секций от значения приложенной растягивающей нагрузки: 1 – веревка "Коломна", 2 – веревка из свитых синтетических волокон, 3 – веревка Beal Booster III.



Рис. 4. Зависимость уровня шума волоконно-оптической буксируемой косы от скорости буксировки. Цифры у кривых соответствуют значениям скорости буксировки (в узлах).

повышением скорости буксировки от 2 до 20 раз. в то время как в диапазоне частот от 200 до 1000 Гц увеличение скорости буксировки ведет к снижению уровня шума от 2 до 10 раз. Данный эффект можно объяснить тем, что при увеличении скорости буксировки растет уровень приложенной растягивающей нагрузки, приводя к натяжению буксируемой косы и снижая ее провисание и связанные с этим изгибные колебания. Рост уровня шумов в области частот до 200 Гц объясняется ростом интенсивности рывков судна-буксира при увеличении скорости его движения. Результаты данного этапа эксперимента с вариантом эластичной секции № 1 при креплении через накидную петлю является опорным при сравнении данных, полученных на дальнейших этапах.

Экспериментальные данные, полученные на втором этапе эксперимента (буксировка при скорости 4 узла с эластичными секциями по вариантам № 1–№ 4 при их креплении к буксируемому телу при помощи самозатягивающейся накладной петли (рис. 2в)), представлены на рис. 5. Видно, что уровень шумов снижается в диапазоне частот от 180 до 600 Гц до 3 раз при использовании варианта эластичной секции № 3 (витая веревка из синтетических нитей). В низкочастотной области до 100 Гц уровень шумов при всех вариантах эластичных секций примерно одинаков. Использование варианта эластичной секции № 4 привело к появлению в спектре шумов паразитных гармонических составляющих на частотах около 366 и 727 Гц. По всей видимости, причиной колебаний на данных частотах являются возникшие при буксировке автоколебания эластичной секции [8]:

$$f = m \frac{1}{ld} \sqrt{\frac{F_{\rm T}[{\rm H}]}{\pi \rho}},\tag{3}$$

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА № 4 2020

где *m* — номер гармоники; *d*, м — диаметр поперечного сечения эластичной секции; ρ , кг/м³ плотность материала эластичной секции. Согласно техническим данным плотность материала ρ веревки Beal Booster III составляет ~825 кг/м³.

Экспериментальные данные, полученные на третьем этапе эксперимента (буксировка при скорости 4 узла с эластичными секциями по вариантам № 1—№ 4 при их креплении к силовому элементу буксируемого тела при помощи врезной крепежной секции (рис. 26)), представлены на рис. 6. Видно, что уровень шумов снижается при использовании варианта эластичной секции № 3 в 1.5 раза в диапазоне частот от 300 до 400 Гц по сравнению с другими вариантами эластичных секций. Использование варианта № 2 дает снижение уровня шумов буксировки в 1.5 раза в диапазоне частот от 700 до 1000 Гц и в области нижних частот до 20 Гц.

Сравнительный анализ экспериментальных данных для варианта эластичной секции № 3 при креплении с помощью накладной самозатягивающейся петли (рис. 2в) и при креплении к силовому элементу буксируемого тела с помощью врезной крепежной секции (рис. 26) представлен на рис. 7. Видно, что использование этого варианта позволяет добиться снижения уровня шумов в области нижних частот до 170 Гц в 1.5–2 раза. В диапазоне частот от 200 до 400 Гц использование подобного варианта крепления приводит к увеличению уровня шумов в 1–5 раз. В диапазоне частот от 700 до 900 Гц достигается снижение уровня шумов на величину до 2 раз.

Помимо усредненного уровня собственных шумов на этом этапе измерений была также проведена оценка разброса по уровню шумов между каналами волоконно-оптической буксируемой



Рис. 5. Зависимость уровня шума волоконно-оптической буксируемой косы от типа эластичной секции при креплении с помощью накладной самозатягивающейся петли. Цифры у кривых соответствуют номеру варианта применяемой эластичной секции.



Рис. 6. Зависимость уровня шума волоконно-оптической буксируемой косы от типа эластичной секции при креплении с помощью врезной крепежной секции. Цифры у кривых соответствуют номеру варианта применяемой эластичной секции.

сейсмической косы в зависимости от частоты. Расчет производился по следующей формуле [9]:

$$STD(f) = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} (S_i(f) - \overline{S(f)})^2}}{\overline{S(f)}} \times 100\%, \quad (4)$$

где *STD*(*f*), % — разброс уровня шумов между каналами косы в зависимости от частоты *f*; *N* — число волоконно-оптических гидрофонов в косе (16 шт.); $S_i(f)$, рад/ $\sqrt{\Gamma_{II}}$ — уровень шумов *i*-го канала косы на частоте *f*; $\overline{S(f)}$, рад/ $\sqrt{\Gamma_{II}}$ — средний уровень шумов каналов косы на частоте *f*. Результаты представлены на рис. 8 для варианта эластичной секции № 3.

Видно, что использование варианта крепления за силовой элемент при помощи врезной крепежной секции (рис. 26) позволяет добиться снижения среднеквадратичного отклонения (с.к.о.) уровня шумов по каналам волоконно-оптической косы при ее буксировке в 2 раза. Аналогичная картина снижения с.к.о. шумов буксировки по каналам косы наблюдается для остальных вариантов эластичных секций.

По всей видимости, данные эффекты обусловлены тем, что при креплении эластичной секции к внешней оболочке буксируемого тела при помощи накладной самозатягивающейся петли под воздействием растягивающей нагрузки при буксировке внешняя оболочка и силовой элемент имеют возможность движения друг относительно



Рис. 7. Сравнительный анализ экспериментальных данных при различных вариантах крепления эластичной секции (вариант № 3) к буксируемому телу: 1 – при креплении при помощи врезной крепежной секции (за силовой элемент), 2 – при креплении при помощи накладной самозатягивающейся петли.

друга, что увеличивает помеховые воздействия на чувствительные элементы, причем неравномерно по длине буксируемой косы. При креплении же к силовому элементу при помощи врезной крепежной секции возможность такого движения блокируется, что благоприятно сказывается на общем уровне шумов в выходном сигнале волоконнооптической буксируемой сейсмической косы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы было проведено исследование влияния метода крепления волоконнооптической сейсмической косы при буксировке на параметры ее выходного сигнала. Во время натурных испытаний косы были получены экспериментальные зависимости уровня растягивающей нагрузки от скорости буксировки, уровня шумов в сигнале косы от скорости буксировки, от типа и коэффициента относительного удлинения эластичной секции, а также от типа крепления эластичной секции к буксируемому телу.

Показано, что использование различных вариантов эластичных секций для буксировки сейсмической косы дает снижение уровня шумов в ее сигнале, но этот эффект существенно зависит от частоты и от параметров эластичной секции. Так, уровень шумов снижается в диапазоне частот от 180 до 600 Гц при использовании эластичной секции из витых синтетических нитей (вариант № 3) до 3 раз. В области нижних частот до 100 Гц уровень шумов для всех вариантов эластичных секций примерно одинаков. Таким образом, для более выраженного эффекта снижения уровня шумов необходимы детальный расчет и подбор параметров эластичной секции. Разброс уровня шумов между каналами, %



Рис. 8. Сравнительный анализ с.к.о. уровня шумов по каналам при различных вариантах крепления эластичной секции (вариант № 3) к буксируемому телу: 1 - при креплении при помощи накладной самозатягивающейся петли (рис. 2в), 2 - при креплении при помощи врезной крепежной секции (за силовой элемент, рис. 2б).

Использование варианта крепления эластичной секции к буксируемому телу за силовой элемент при помощи врезной крепежной секции позволяет добиться снижения уровня шумов в области нижних частот до 170 Гц на величину порядка 1.5—2 раз. В диапазоне частот от 200 до 400 Гц использование подобного варианта закрепления приводит либо к увеличению уровня шумов в 1.5— 3 раза (для эластичной секции из витых синтетических нитей), либо к снижению в 1.5—2 раза для остальных вариантов эластичных секций. В диапазоне частот от 700 до 900 Гц достигается снижение уровня шумов на величину порядка 2 раз.

Кроме того, использование варианта крепления за силовой элемент позволяет добиться снижения с.к.о. уровня шумов по каналам волоконно-оптической сейсмической буксируемой косы в 2 раза. Таким образом, закрепление за силовой элемент оптического кабеля при буксировке позволяет добиться снижения общего уровня шумов и с.к.о. по каналам, однако такой подход также требует детального расчета и подбора параметров эластичной секции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Vlasov A.A., Aleynik A.S., Plotnikov M.Yu., Dmitriev A.A., Varzhel S.V. // Scientific and Technical J. Information Technologies, Mechanics and Optics. 2019. V. 19. № 4. P. 574 (in Russian). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-4-574-585
- 2. Andrews Jr D.E. Pat. 5062085 USA. 1991.
- Макаренков А.П., Воскобойник В.А. Гидродинамические шумы и вибрации гибкой протяженной буксируемой антенны // Актуальные аспекты физико-механических исследований. Акустика и

волны / Под ред. В.В. Мелешко, В.Н. Олейник. Киев: Наукова думка, 2007. С. 208–217.

- Plotnikov M.Y., Lavrov V.S., Dmitraschenko P.Y., Kulikov A.V., Meshkovsky I.K // IEEE Sensors J. 2019. V. 19. № 9. P. 3376. https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2894323
- Plotnikov M.J., Kulikov A.V., Strigalev V.E., Meshkovsky I.K. // Advances in Optical Technologies. 2014. V. 2014. https://doi.org/10.1155/2014/815108
- 6. Nikitenko A.N., Plotnikov M.Y., Volkov A.V., Mekhrengin M.V., Kireenkov A.Y. // IEEE Sensors J. 2018.

V. 18. № 5. P. 1985.

https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2792540

- Ляв А. Математическая теория упругости. М.: Рипол Классик, 2013.
- Ларин А.А. Зарождение математической физики и теории колебаний континуальных систем в "Споре о струне" // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". История науки и техники. 2008. Т. 8. С. 89–97.
- 9. Ивченко Г.И., Медведев Ю.И. Введение в математическую статистику. М.: ЛКИ, 2010.