

УДК 620.179.162

О. В. Муравьева, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет
С. А. Мурашов, Ижевский государственный технический университет

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРУТИЛЬНЫХ ВОЛН ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ НАСОСНЫХ ШТАНГ И НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ*

Разработана методика численного расчета скорости крутильной волны в линейно протяженных объектах с дефектами с использованием метода конечных элементов. Выполнен анализ влияния параметров конечно-элементной модели на точность вычислений скорости крутильной волны. Исследовано влияние геометрических параметров дефекта и объекта контроля на основные закономерности распространения крутильных волн. Обоснован новый браковочный критерий по скорости крутильной волны и разработана методика оценки глубины эксплуатационного дефекта типа протира при контроле насосных штанг и насосно-компрессорных труб.

Ключевые слова: скорость крутильной волны, акустический тест, метод конечных элементов, протяженные объекты, насосно-компрессорные трубы и штанги.

В настоящее время на 70 % нефтяных скважин эксплуатируются штанговые скважинные насосные установки. Одним из основных осложнений при эксплуатации является частый выход из строя насосных штанг (НШ) и насосно-компрессорных труб (НКТ). Значительные резервы экономии при эксплуатации скважин связаны с увеличением их межремонтного периода за счет снижения числа подземных ремонтов по причине обрывов НШ и НКТ. Наиболее простым и эффективным методом увеличения ресурса работы скважины является повышение надежности и долговечности НШ и НКТ за счет неразрушающего контроля при сервисном обслуживании в условиях цехов подземного и капитального ремонта и централизованных ремонтных баз.

Одной из причин выхода из строя НШ и НКТ является их механический износ. Протиры – один из наиболее распространенных и опасных типов механического износа НШ и НКТ, возникающих в процессе эксплуатации вследствие взаимного трения внутренней поверхности трубы и тела штанги, а также их трения о соединительные муфты (рис. 1). Протиры являются протяженными дефектами (ход насосной штанги внутри НКТ в процессе эксплуатации скважины может достигать 3 м). Наличие протиров НКТ и НШ ведет к более интенсивной коррозии, появлению сквозных дефектов НКТ и разгерметизации скважины, а также к усталостному разрушению и обрыву НШ в условиях циклических нагрузок.

Стандартами установлены значения предельных отклонений толщины стенки НКТ и диаметра НШ от номинальных. Так, согласно ГОСТ 633–80 предельное отклонение по толщине стенки НКТ составляет 12,5 %. Предельное отклонение диаметра тела штанги от номинального значения в соответствии с ГОСТ 13877–96 составляет 0,4–0,5 мм (или $\approx 2\%$).

Штатные методы неразрушающего контроля труб и штанг (вихретоковый, магнитный, ультразвуковой)

основаны на анализе локальных изменений свойств (магнитных, электрических, упругих) объекта, поэтому чувствительность указанных методов к протяженным дефектам типа протиров достаточно низкая. Кроме того, указанные методы требуют обязательного сканирования и, как следствие, существенно ограничивают производительность контроля. Невозможно также определение реальной глубины протира, являющейся основой для изъятия объекта из эксплуатации.



а



б

Рис. 1. Протир насосно-компрессорной трубы вследствие трения о муфту (а) и трения о штангу (б)

В [1] показано, что использование в качестве информативного параметра скорости крутильной волны может быть эффективным при выявлении и оценке глубины протяженных продольных трещин в трубах.

Для разработки методик выявления протяженных эксплуатационных дефектов НКТ и НШ типа протиров и оценки их глубины возникает необходимость исследования влияния геометрических параметров протира и объекта контроля на основные закономерности распространения крутильных волн.

Методика исследований

При исследованиях процессов распространения крутильных волн в НКТ и НШ с дефектами типа протиров использована методика, описанная в [1]. Методика основана на явлении уменьшения крутильной жесткости D и скорости крутильной волны C_T при наличии в протяженном объекте дефектов. Скорость нулевой моды крутильной волны C_T может быть найдена по формуле

$$C_T = \sqrt{\frac{D}{\rho I}} = \sqrt{\frac{\mu I_T}{\rho I}}, \quad (1)$$

где ρ – плотность среды; I – момент инерции сечения объекта относительно его центра инерции; $D = \mu I_T$; I_T – момент инерции при кручении (условный момент инерции); μ – модуль сдвига.

В случае круглой формы сечения скорость крутильной волны C_{T0} равна скорости поперечной волны в неограниченной среде C_T . Для некоторых простых профилей геометрии сечения протяженного объекта (эллипс, равносторонний треугольник, тонкая прямоугольная полоса) скорость крутильной волны может быть описана с использованием известных аналитических формул [2, 3].

Для объектов с более сложной геометрией крутильная жесткость и момент инерции сечения могут быть найдены численно с использованием про-

граммных средств инженерного моделирования, основанных на методе конечных элементов по методике, описанной в [1].

Для оптимизации численного метода оценки скорости крутильной волны исследовано влияние количества и формы конечных элементов и длины объекта на точность определения скорости крутильной волны в сравнении с рассчитанным аналитическим значением для некоторых простых геометрий сечения.

На рис. 2 представлены зависимости рассчитанного значения скорости крутильной волны от количества конечных элементов $N_{КЭ}$ для протяженных объектов с различной формой поперечного сечения (пластина размерами $d = 85$ мм, $h = 2$ мм и равносторонний треугольник со стороной $a = 14$ мм). Видно, что для сечения в форме пластины высокая точность расчетов (погрешность не более 0,1 м/с) достигается уже при количестве конечных элементов, равном 64 (рис. 2, а). В случае пластины шириной $d = 680$ мм (512 конечных элементов) погрешность вычисления скорости не превышает 0,2 м/с по сравнению с аналитическим значением. Наличие острых углов в поперечном сечении может приводить к значительному увеличению погрешности расчета. Например, для сечения в виде равностороннего треугольника (рис. 2, б) скорость крутильной волны, рассчитанная численным методом, превышает теоретическую на 6 м/с, при этом изменение топологии сетки, формы конечных элементов и увеличение их количества в сечении с 64 до 400 практически не приводит к сокращению этой разницы. Следует отметить, что при расчете скорости крутильных волн в объектах с сечениями в форме круга и кольца количество конечных элементов может быть существенно уменьшено (до 4–8), при этом обеспечивается высокая точность результатов. На точность расчетов влияет также длина исследуемого объекта, значение которой должно в 200 и более раз превышать размеры поперечного сечения объекта.

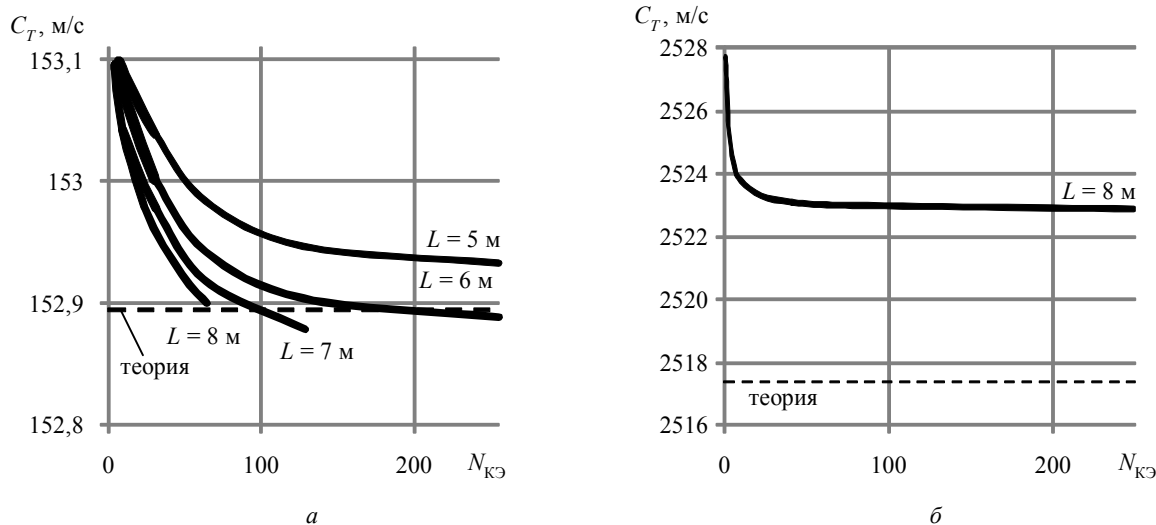


Рис. 2. Зависимость расчетного значения скорости крутильной волны C_T от количества конечных элементов $N_{КЭ}$ для стержня с сечением в виде пластины различной длины L (а); в виде равностороннего треугольника длиной $L = 8$ м (б)

На рис. 3 показано влияние количества узлов используемых конечных элементов (три, три и четыре) на точность определения скорости крутильной волны в прутке с модельным протиром. Видно, что при количестве элементов более 100 разница в результатах расчета скорости крутильной волны для разных типов конечных элементов не превышает 0,1 м/с. При построении сетки конечных элементов желательно обеспечить небольшие соотношения геометрических размеров (1–3) и отсутствие острых углов (менее 30°) для каждого из конечных элементов. Время расчета крутильной жесткости объекта с использованием процессора Intel Core 2 DUO 2 ГГц и выделением под задачу 1 Гб оперативной памяти при количестве конечных элементов $N_{КЭ} = 200$ составляет около 20 мин (при $N_{КЭ} = 400–60$ мин дополнительно требуется 5 Гб на жестком диске).

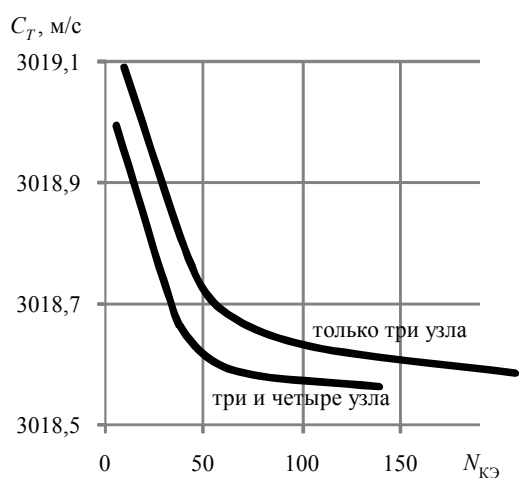


Рис. 3. Зависимости расчетного значения скорости крутильной волны C_T для прутка с протиром ($L = 8$ м) от количества конечных элементов $N_{КЭ}$ для конечных элементов с различным количеством узлов

На рис. 4 представлена геометрическая модель для численного расчета крутильной жесткости D сечения трубы и прутка с модельным дефектом в виде протира методом конечных элементов. Ввиду сложности создания искусственного протира на внутренней стенке трубы в качестве эквивалентного модельного дефекта рассматривается сегментный паз с наружной поверхности трубы (рис. 4, в). В работе [4] представлены сравнительные зависимости относительной скорости крутильной волны C_T/C_{T0} в стальной трубе для протира муфтой МШ19 (диаметр муфты 42 мм) и сегментного паза глубиной $h/t = 0...0,7$, подтверждающие правомерность такой замены.

Под действием крутящего момента M , приложенного к свободному концу объекта (второй конец закреплен), произвольное поперечное сечение объекта, расположенное на расстоянии δl от закрепленного конца, поворачивается на угол $\delta\varphi$:

$$D = \frac{M \cdot \delta l}{\delta\varphi} \quad (2)$$

Для расчета угла поворота сечения $\delta\varphi$ и момента инерции сечения I дополнительно задаются геометрические размеры объекта (диаметр d и толщина стенки t трубы, диаметр прутка d), глубина модельного дефекта h , плотность ρ , модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν материала. Количество конечных элементов, используемых при расчете, $N_{КЭ} = 200$, длина объекта $L = 10$ м, количество узлов в элементе – три.

Расчеты выполнены для насосно-компрессорной трубы по ГОСТ Р 52203 (диаметр трубы $d = 73$ мм, толщина стенки $t = 5,5$ мм) и для насосной штанги по ГОСТ 13877–96 (диаметр тела штанги $d = 2r = 22$ мм), материал – сталь углеродистая ($\rho = 7800$ кг/м³, $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па, $\nu = 0,277$), в диапазоне глубин протира $h = 0–4$ мм при $M = 1$ Н·м.

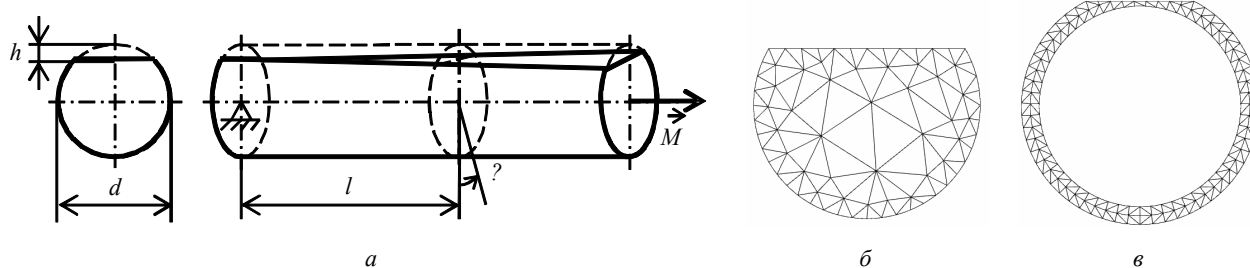


Рис. 4. Моделирование задачи расчета крутильной жесткости сечения линейно протяженного объекта: а – схема расчета; б – сечение прутка и его разбиение на 106 конечных элементов; в – сечение трубы и его разбиение 224 конечных элемента

Результаты теоретических исследований

Результаты теоретических исследований зависимости относительной скорости крутильной волны C_T/C_{T0} в НКТ и НШ от глубины протира h представлены в таблице и на рис. 5. С ростом глубины протира наблюдается уменьшение скорости крутильной волны, при этом характер зависимости становится более крутым. При равной глубине протира в области значений $h = 0–3$ мм крутильная волна в насосной штанге обладает более высокой чувствительностью к проти-

рам, при больших значениях h преобладает чувствительность крутильной волны к протирам в трубе. В диапазоне глубины протира $h = 0–1$ мм уменьшение скорости C_T незначительно ($\approx 0,3\%$ для НШ, $\approx 0,1\%$ для НКТ). С ростом глубины протира уменьшение скорости крутильной волны становится более существенным: при $h = 2$ мм – 1,15% для НШ и 0,55% для НКТ; при $h = 4$ мм – 4% для НШ и 5% для НКТ. При достижении глубины h значения 5 мм скорость волн уменьшается на 7% для НШ и на 15% для НКТ.

Результаты теоретических расчетов скорости крутильной волны для НШ и НКТ с дефектом в виде протира

h, мм	НШ			НКТ		
	h/r	C _T , м/с	C _T /C _{T0} , %	h/t	C _T , м/с	C _T /C _{T0} , %
0	0,00	3249,90	100,00	0,000	3249,87	100,00
0,5	0,05	3247,30	99,92	0,014	3249,40	99,98
1	0,09	3239,94	99,69	0,027	3247,03	99,91
1,5	0,14	3228,35	99,34	0,041	3242,25	99,76
2	0,18	3212,83	98,86	0,055	3232,00	99,45
2,5	0,23	3193,81	98,27	0,068	3215,19	98,93
3	0,27	3171,58	97,59	0,082	3190,61	98,18
3,5	0,32	3146,01	96,80	0,096	3151,49	96,97
4	0,36	3118,06	95,94	0,110	3087,90	95,02
4,5	0,41	3087,57	95,01	0,123	2978,72	91,66
5	0,45	3054,70	93,99	0,137	2750,26	84,63
5,5	0,50	3019,60	92,91	0,151	–	0,00

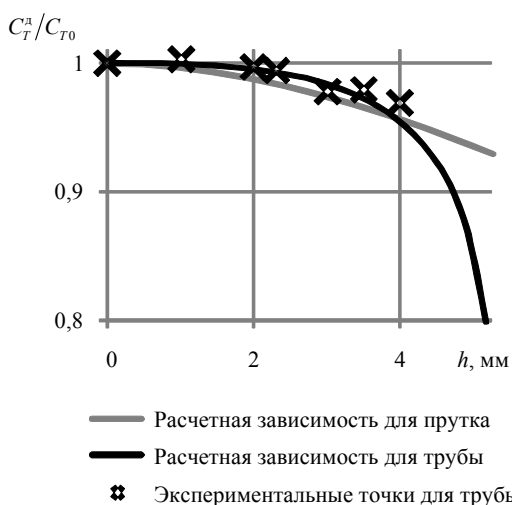


Рис. 5. Зависимость относительной скорости крутильной волны C_T^2/C_{T0} для прутка и трубы с протиром от глубины протира h

Исследование процессов распространения крутильной волны с дефектом в виде протира подтверждено экспериментально на НКТ длиной $L = 1,5$ м, диаметром $d = 73$ мм с использованием метода многократных отражений. Блок-схема установки, реализующей данный метод, представлена на рис. 6. Генератор зондирующих импульсов блока ГПУ возбуждает электромагнитно-акустический преобразователь (ЭАП), установленный со стороны одного из концов НКТ. Короткие акустические импульсы крутильной волны, излучаемые ЭАП, после многократных перетражений от противоположных концов трубы регистрируются тем же ЭАП, преобразующим акустические колебания в электрические импульсы, поступающие на предварительный усилитель блока ГПУ. Программируемый усилитель блока УКП осуществляет дальнейшее усиление сигналов. Усиленный электрический сигнал поступает на вход АЦП (разрядность 14 бит, частота дискретизации 10 МГц) и далее в память ПК. Специализированное программное обеспечение позволяет наблюдать регистрируемый сигнал, измерять его основные параметры.

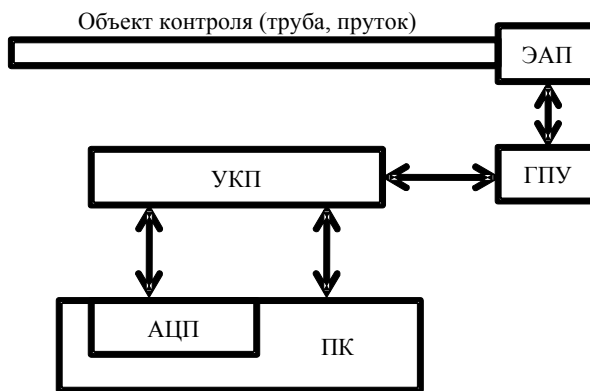


Рис. 6. Структурная схема экспериментальной установки: ЭАП – блок электро-акустических преобразователей (совмещенный); ГПУ – блок генератора и предварительного усилителя; УКП – блок программируемого усилителя, коммутации и питания; АЦП – плата аналого-цифрового преобразования; ПК – персональный компьютер

Крутильная волна в трубе возбуждается ЭМА-излучателем за счет эффекта Видемана. Регистрация импульсов крутильной волны ЭМА-приемником происходит за счет обратимости эффекта. Ввиду того, что ЭМА-излучатель и ЭМА-приемник практически не демпфируют колебания, а затухание крутильной волны невелико, на экране осциллографа наблюдаются импульсы, многократно (десятки раз) переотраженные от торцов трубы. Модельный дефект НКТ типа протира нанесен вдоль всей ее длины, что позволяет использовать метод многократных отражений для определения скорости крутильной волны с высокой точностью (± 1 м/с, или 0,02 %).

На рис. 7 изображены типичные серии эхо-импульсов крутильной волны в трубе при различной глубине модельного дефекта типа протира. Экспериментальные значения относительной скорости крутильной волны C_T/C_{T0} для исследованных глубин протира показаны на рис. 5. Полученные экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с рассчитанными значениями скорости крутильной волны в НКТ с протиром. Из пред-

ставленных осциллограмм следует, что наличие протира наряду с уменьшением скорости крутильной волны ведет к увеличению коэффициента затухания,

что является дополнительным информативным признаком при выявлении протяженного дефекта.

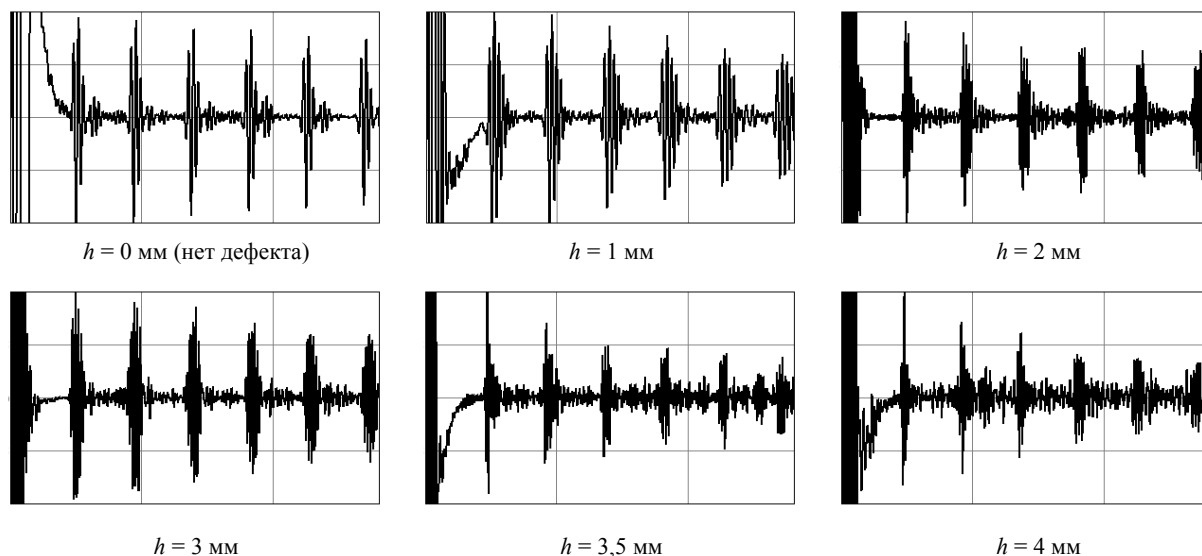


Рис. 7. Эхограммы крутильной волны в насосно-компрессорной трубе с протиром различной глубины h

Согласно исследованным выше закономерностям при наличии в объекте контроля протяженного дефекта (протира) длиной l суммарное время распространения крутильной волны уменьшается в сравнении с объектом той же длины без дефекта. При известной длине объекта L можно ввести понятие обобщенной скорости крутильной волны $C_{T\Sigma}$, учитывающее в своем значении скорости крутильных волн в бездефектной области C_T и в области с протяженным дефектом C_T^d :

$$C_{T\Sigma} = \frac{C_T C_T^d}{C_T^d (1 - l/L) + C_T l/L} \quad (3)$$

На рис. 8 представлены рассчитанные зависимости обобщенной скорости крутильной волны в НШ (а)

и НКТ (б) от протяженности протира при его фиксированной глубине. Согласно рис. 8 значение обобщенной скорости существенно (на ≈ 8 м/с) уменьшается как при наличии глубоких протиров ($h = 3$ мм) при небольшой относительной протяженности дефекта $l/L = 1/8$, так и при наличии протиров малой глубины при существенной относительной протяженности. Представленные номограммы показывают принципиальную возможность оценки глубины протира по значению обобщенной скорости крутильной волны, если известна протяженность объекта L и протяженность протира l . Последняя может быть оценена по положению эхо-импульсов от начала и конца протира на дефектограмме объекта, либо по предварительным данным о величине хода насосной штанги в скважине.

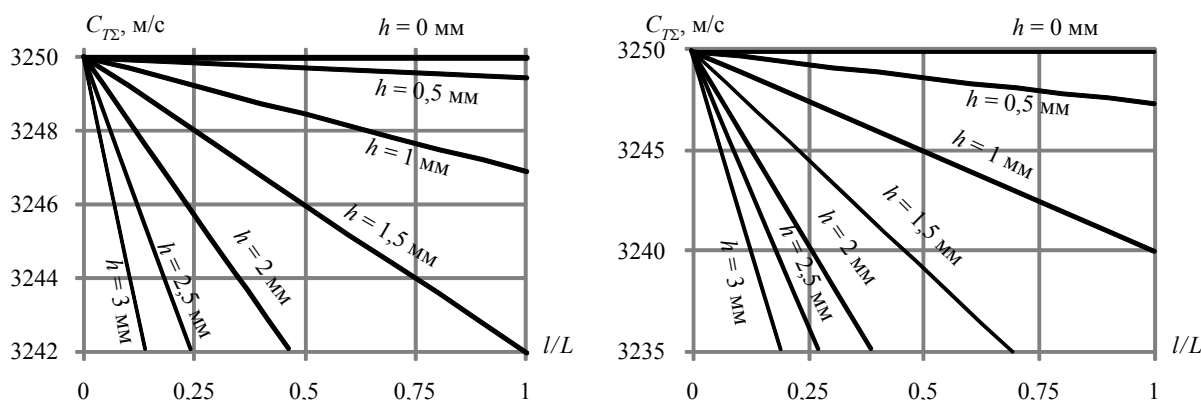


Рис. 8. Номограммы для оценки глубины протира в насосно-компрессорной трубе (а) и в прутке (б)

Предлагаемая в статье методика использована при разработке акустического дефектоскопа насосно-компрессорных труб АДНКТ. В дефектоскопе

АДНКТ реализованы два взаимодополняющих метода – эхо-импульсный метод и метод многократных отражений.

Эхо-импульсный метод базируется на регистрации эхо-импульсов, отраженных от наружных и внутренних дефектов и от противоположного торца НКТ и позволяет обнаруживать локальные дефекты (вмятины, коррозионные повреждения, закаты, плены, свищи).

Метод многократных отражений базируется на определении скорости распространения и коэффициента затухания крутильной волны, а также регистрации эхо-импульсов, многократно переотраженных от дефектов трубы и от противоположных торцов НКТ. Метод многократных отражений позволяет выявлять как локализованные, так и протяженные дефекты. При этом улучшается чувствительность к дефектам малых размеров, уменьшается неконтролируемая мертвая зона со стороны ввода акустического сигнала, присущая эхо-импульсному методу [5]. Опыт эксплуатации дефектоскопа АДНКТ на участке ремонта НШ и НКТ ОАО «Белкамнефть» (с. Каракулино, Удмуртия) показывает, что процент забракованных НКТ по критерию «скорость крутильной волны» составляет 6 %, при этом, как правило, одновременно работает браковочный критерий по затуханию, что соответствует основным признакам протяженных объектов.

Выводы

Разработанная методика численного расчета скорости крутильной волны в линейно протяженных объектах с дефектами с использованием метода конечных элементов обеспечивает достаточно высокую точность $\pm 0,2$ м/с.

Исследованные закономерности распространения крутильных волн в насосных штангах и насосно-компрессорных трубах с протяженными эксплуатационными дефектами позволили обосновать новый браковочный критерий по скорости крутильной волны и разработать методику оценки глубины протирки в условиях постоянства марки стали.

Разработанная методика и полученные результаты могут служить основой для разработки эффективных методов и средств акустического неразрушающего контроля других линейно протяженных объектов из трубного и пруткового проката с использованием крутильных волн.

Список литературы

1. Взаимодействие крутильных волн с продольными трещинами труб / Г. А. Буденко [и др.] // Дефектоскопия. – 2006. – № 6. – С. 58–66.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. – М.: Наука, 1965. – 204 с.
3. Мурашов С. А., Коробейникова О. В. Основные параметры акустического контроля протяженных объектов различного профиля с использованием крутильных волн // Вестник ИжГТУ. – 2010. – № 2(45). – С. 84–88.
4. Взаимодействие крутильных волн с дефектами насосно-компрессорных труб, обусловленными протирками и разностенностью / Г. А. Буденко [и др.] // Тр. III науч.-техн. конф. «Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства». – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2007. – С. 81–89.
5. Акустическая дефектоскопия прутков с использованием многократных отражений / Г. А. Буденко [и др.] // Дефектоскопия. – 2004. – № 8. – С. 52–58.

O. V. Muravyova, Doctor of Technical Sciences, Professor, Izhevsk State Technical University
S. A. Murashov, Izhevsk State Technical University

Use of Torsional Waves for Detection of Operational Defects in Pump Rods and Tubing

A technique of numeric computation of torsional waves velocity in defective rectilinear lengthy objects with use of the finite element method is developed. The influence of the finite-element model parameters on the velocity computation accuracy is studied. The influence of defect and unit under test geometrical parameters on the wave propagation trends is examined. The proposed rejection criterion based on the torsional wave velocity is substantiated. A method of estimation of galling-type in-service defect depth during pump rods and tubing inspection is developed.

Key words: torsional wave velocity, acoustic testing, finite element method, extended objects, pump rods and tubing.