

## РАСЧЕТ АКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА ДЛЯ ТРЕЩИНОПОДОБНОГО КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКОГО ДЕФЕКТА

© 2019 г. А.Д. Жуков<sup>1,\*</sup>, М.В. Григорьев<sup>2,\*\*</sup>, В.Н. Данилов<sup>3,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», Россия  
105005 Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1

<sup>2</sup>ФГАУ «Научно-учебный центр «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н.Э.Баумана», Россия  
105005 Москва, Госпитальный пер., 4/6

<sup>3</sup>ГНЦ АО «Научно-производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт  
технологии и машиностроения», Россия 115088 Москва,  
ул. Шарикоподшипниковская, 4

E-mail: \*adz2012@yandex.ru; \*\*grigoriev.mv@mail.ru; \*\*\*vadnicdan@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.03.2019; после доработки 24.05.2019

Принята к публикации 29.05.2019

Для предложенной ранее модели углового отражателя, в основании которого выпуклая цилиндрическая поверхность, предназначенного для имитации трещиноподобных коррозионно-механических дефектов, в приближении геометрической акустики получены формулы акустического внутритрубного инспекционного прибора (ВИП) высокого разрешения. По результатам моделирования показано влияние геометрических характеристик предложенной модели углового отражателя на амплитуду отраженных от его поверхности наклонно падающих поперечных волн в сравнении с регламентированной нормативно-технической документацией моделью углового отражателя, выходящего на плоскую поверхность.

*Ключевые слова:* магистральный нефтепровод, внутритрубный инспекционный прибор, комбинированный дефект, наклонный преобразователь, акустический тракт, угловой отражатель, ультразвуковой контроль.

**DOI:** 10.1134/S0130308219070017

Обеспечение надежной и безопасной эксплуатации магистральных нефтепроводов (МН) в значительной степени зависит от эффективности применяемых при их диагностике внутритрубных инспекционных приборов (ВИП) [1], основной задачей которых является выявление и идентификация дефектов, регламентированных в [1]. Одним из наиболее опасных дефектов по [1], выявляемых в ходе внутритрубной диагностики (ВТД), являются трещины, включающие трещиноподобный коррозионно-механический дефект [1]. Учитывая, что при использовании акустических ВИП основным информационным признаком при идентификации таких дефектов является амплитуда эхосигнала, представляет интерес рассмотреть акустический тракт ВИП для трещиноподобного коррозионно-механического дефекта. К сожалению, в настоящее время полноценное использование акустического тракта для такого дефекта изучено недостаточно подробно.

Целью настоящей работы было исследование акустического тракта трещиноподобного коррозионно-механического дефекта. В [2] при рассмотрении акустического тракта для такого дефекта предложено использовать модель, представляющую собой протяженный угловой отражатель с высотой вертикальной грани  $L_b$ , в основании которого — протяженная выпуклая цилиндрическая поверхность (рис.1), радиусом  $b$  ( $R$  в [2]), выступающая на  $\delta$  ( $h$  в [2]) относительно донной поверхности объекта контроля (ОК). Выпуклая цилиндрическая поверхность, исходя из размеров реальных дефектов по [3], имитирует общие коррозионные повреждения или вмятины по [1, 3], от которых развивается рассматриваемый трещиноподобный дефект [1].

Исходя из конфигурации предложенного углового отражателя, ниже в рамках геометрической акустики были рассмотрены процессы взаимодействия падающих на его поверхность поперечных волн вертикальной (SV) поляризации с целью определения теоретической модели акустического тракта ВИП. Решение рассмотрено для коротковолнового приближения, при котором  $L_b$  и  $b$  значительно превышают длину поперечных волн  $\lambda_c$ . Размеры самого отражателя, исходя из размеров реальных дефектов, приведенных в [3], определяются соотношением  $b \gg L_b$  и  $b \gg \delta$ .

Для акустических ВИП высокого разрешения, предназначенных для выявления трещиноподобных дефектов [1, 4], как показано на рис.1, излучение и прием акустических волн, взаимодействующих с поверхностью отражателя (1), осуществляются расположенным под заданным углом к поверхности стенки трубопровода (2) пьезопреобразователем (ПЭП) (3), помещенным в иммерсионный слой жидкости толщиной  $h_{им}$  (4). Такая схема, согласно [5, 6], рассматривалась в первом приближении геометрической акустики как акустический тракт совмещенного наклонного преоб-

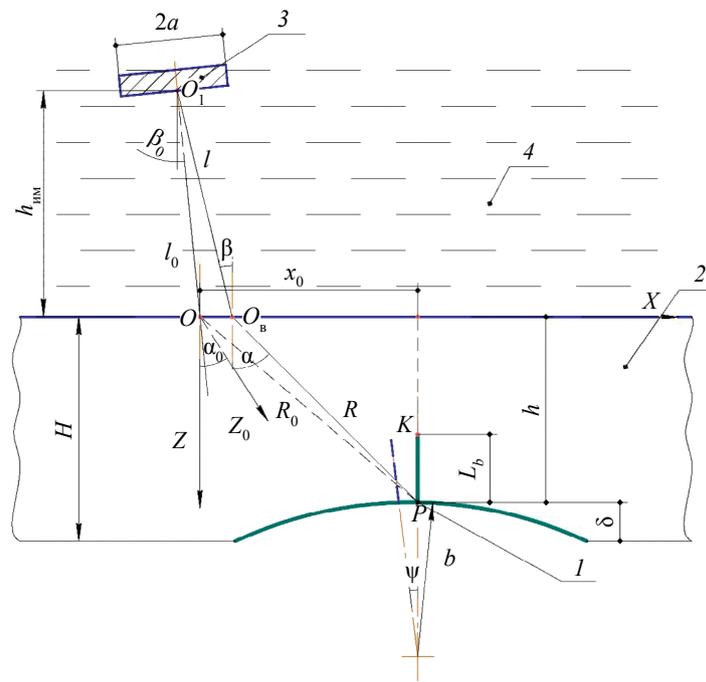


Рис. 1. Расчетная схема акустического тракта углового отражателя, в основании которого выпуклая цилиндрическая поверхность:

1 — протяженный угловой отражатель с выпуклым цилиндрическим основанием по [2] (для рассматриваемой модели  $b \gg \delta$  и  $b \gg L_b$ ); 2 — стенка магистрального трубопровода в продольном сечении с параллельными гранями (кривизна самого трубопровода не учитывается); 3 — излучающая поверхность преобразователя; 4 — иммерсионный слой.

разователя с величиной задержки призмы  $l_0$  по центральному лучу и  $l$  по текущему углу ввода, что соответствует пути УЗ лучей в иммерсионном слое  $h_{им}$  (см. рис. 1). Для приведенной на рис. 1 основной плоскости ( $XOZ$ ):  $H$  — толщина стенки магистрального трубопровода в продольном сечении с параллельными гранями (кривизна самого трубопровода ввиду его большого диаметра не учитывалась);  $h$  — глубина залегания торцевой (вертикальной) поверхности отражателя  $L_b$ , выходящей на поверхность основания, то есть в точку  $P$  вершины цилиндрической поверхности, расположенной на расстоянии  $x_0$  от точки  $O$  (начало координат) ввода центрального луча, падающего из центра  $O_1$  круглой пьезопластины радиусом  $a$ ; углы  $\beta_0$  и  $\alpha_0$  — углы падения продольной волны в призме ПЭП и преломления (для поперечной волны) вдоль акустической оси,  $\beta$  — угол падения продольной волны в точку ввода  $O_b$ ,  $\alpha$  — угол падения поперечной волны из точки  $O_b$  в точку  $P$  для которых  $R_0 = OP$  и  $R = O_bP$ .

Поле рассеивания падающих на поверхность углового отражателя волн в общем случае имеет достаточно сложную структуру, включающую по [7—10]: зеркально-отраженные волны, дифрагированные волны на вершине вертикальной грани  $K$ , а также волны, образованные в результате взаимодействия со свободной поверхностью, поле которых определяется совокупностью боковых волн, а также волн, смещенных в результате эффекта «незеркального» отражения.

Чтобы описать вышеперечисленные процессы взаимодействия акустических волн с поверхностью углового отражателя в [7, 8], на основании метода Кирхгофа, было получено выражение, определяющее коэффициент пропорциональности эквивалентной площади плоскодонного отражателя  $S$  к площади вертикальной грани углового отражателя  $S_1$ :

$$\frac{S}{2S_1} = |R(\alpha)| |R(\pi/2 - \alpha)| \sin(\alpha), \quad (1)$$

$S$  — площадь плоскодонного отражателя;  $S_1$  — площадь углового отражателя.

Дальнейшие исследования, результаты которых приведены в [8, 9], показали, что для углов, близких к критическим, наблюдается значительное расхождение расчетных и экспериментальных данных [9] ввиду увеличения влияния образующихся боковых волн. Для их учета в [9] было получено обобщенное выражение (2), которое, как видно из приведенных в [9] результатов, достаточно

точно описывает отражательную способность угловых отражателей, однако его использование для инженерных расчетов может быть ограничено

$$A_{\Delta} = \frac{2S_1}{\lambda_t^2} \sin \varphi'_p \left( 1 + \frac{\bar{Q}(\pi/2 - \delta)}{Q(\pi/2 - \varphi'_p)} \left| \frac{\Psi_{\delta}}{\Psi} \right| \right) K |R(\varphi'_p) R(\pi/2 - \varphi'_p)|, \quad (2)$$

где, согласно [9]:  $\pi/2 - \varphi'_p$  — угол падения волны из реального источника на отражатель;  $|\Psi_{\delta}/\Psi|$  — отношение амплитуд боковой волны и зеркально отраженной от основания отражателя объемной волны [9];  $K$  — множитель, учитывающий ослабление поля при отражении волны от вертикальной грани при  $\varphi'_p \rightarrow \pi/2 - \delta$ , где  $\pi/2 - \delta$  — угол падения боковой волны  $\Psi_{\delta}$  на вертикальную грань;  $A_{\Delta}$  из [8] — коэффициент, характеризующий отражательную способность отражателя и связывающий амплитуду падающей  $|\Psi_{\delta}|$  и отраженной  $|\Psi'|$  волны,  $|\Psi'| = A_{\Delta} (\lambda_t / R) |\Psi_0|$  [9].

Ввиду сложности моделирования поля рассеивания, образованного в результате взаимодействия поперечных волн с поверхностью углового отражателя, на практике для описания трансформации акустических волн на поверхности отражателя, влияния дифрагированных волн и процессов, протекающих на свободной поверхности, используют полученный экспериментально [11—15] коэффициент отражения  $G(\alpha)$ , значение которого можно определить графически (рис. 2), либо аналитически путем интерполяции этого графика кусочно-заданной функцией, приведенной в [15].

Для предложенной на рис.1 модели углового отражателя положение вертикальной составляющей  $L_b$  совпадает с нормалью, проведенной к выпуклой поверхности основания через вершину  $P$  (см. рис.1). Тем самым, в области, бесконечно близкой к месту пересечения основания и вертикальной составляющей отражателя, ввиду того, что  $b > L_b$ , будет наблюдаться ситуация, при которой вертикальная грань  $L_b$  и касательная к выпуклому цилиндрическому основанию образуют прямой угол, что также позволяет использовать коэффициент  $G(\alpha)$  для предложенной модели углового отражателя (см. рис. 2).

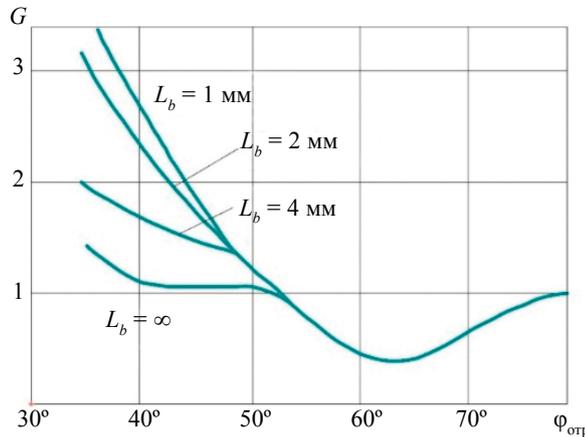


Рис. 2. Коэффициент  $G(\alpha)$  для угловых отражателей как функция от угла отражения  $\varphi_{отр} \rightarrow \alpha$  [13].

Ввиду наличия в основании выпуклой цилиндрической поверхности, как это было показано в [2, 6, 15—19], в основной плоскости будет происходить дополнительное расхождение отраженного акустического поля, связанное со смещением фазы образующих его лучей. В случае, если радиус цилиндрической поверхности  $b \rightarrow \infty$  неограниченно возрастает, то есть эта поверхность становится плоской, удаленной от поверхности ввода УЗ пучка на расстоянии  $H$ , то, согласно [14—19], формула акустического тракта для рассматриваемой модели акустического тракта для углового отражателя, регламентированного в [20, 21], имеет следующий вид:

$$\delta P = \frac{S_n L_b \cos \varepsilon}{\sqrt{2\lambda_t} \sqrt{\lambda_t}} \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} G(\alpha) \frac{|D_{it}(\alpha) D_{it}(\alpha)|}{\sqrt{lm + R} \left( lm \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta} + R \right)} |\Phi_n(t)|^2, \quad (3)$$

где  $S_{\text{н}}$  — площадь круглой пьезопластины радиусом  $a$  с диаграммой направленности в основной плоскости  $|\Phi_{\text{н}}(t)|$ ,  $t = k_{\text{л}} a \sin \varepsilon$ , где из рис. 1:  $\cos \varepsilon = \cos(\beta - \beta_0)$ ,  $m = C_{\text{л}} / C_{\text{т}}$ , где  $C_{\text{л}}$  — скорость продольной волны в призме;  $C_{\text{т}}$  — скорость поперечной волны в контролируемой среде;  $\lambda_{\text{т}}$  — длина поперечной волны в среде;  $t = k_{\text{л}} a \sin \varepsilon$ ,  $k_{\text{л}}$  — волновое число продольных волн в призме [19];  $|D_{\text{л}}(\alpha)D_{\text{т}}(\alpha)|$  — коэффициенты трансформации продольной волны в поперечную (в среде) для излучаемой волны и поперечной — в продольную (в призме преобразователя) для принимаемой [19]. В выражении (3) опущен множитель  $\exp(-2\delta_{\text{л}} R)\exp(-2\delta_{\text{т}} l)$ , учитывающий затухание сигнала, где  $\delta_{\text{л}}$  и  $\delta_{\text{т}}$  — коэффициенты затухания [14] в материале и призме соответственно. Величина текущего ввода  $\alpha$  в точке  $O_{\text{в}}$  по направлению к точке  $P$  определяется путем численного решения уравнения:

$$\sin \varphi - \operatorname{tg} \alpha \cos \varphi = \frac{l_0}{R_0} (\operatorname{tg} \beta \cos \beta_0 - \sin \beta_0), \quad (4)$$

где  $R_0 = \sqrt{x_0^2 + h^2}$ ,  $\sin \varphi = x_0 / R_0$ ,  $\cos \varphi = h / R_0$ ,  $\sin \beta_0 = m \sin \alpha_0$ .

Тем самым, путь УЗ пучка в призме —  $l$  и ОК —  $R$  определяются по формулам:

$$l = l_0 \cos \beta_0 / \cos \beta, \quad R = h / \cos \alpha.$$

Если радиус  $b$  — конечная величина, а направление нормали к цилиндрической поверхности составляет угол  $\psi$  (см. рис. 1), то в выражении коэффициента  $G(\alpha) \rightarrow G(\alpha - \psi)$ . Согласно результатам работ [16, 19, 22—24], дополнительное расхождение волнового фронта в основной плоскости (падения — отражения) при отражении от цилиндрической поверхности радиусом  $b$  описывается дополнительным коэффициентом

$$\sqrt{\frac{b \cos(\alpha - \psi)}{lm \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta} + R + b \cos(\alpha - \psi)}}. \quad (5)$$

В результате с учетом (3) и (5), формула акустического тракта для протяженного углового отражателя, приведенного на рис. 1, записывается как

$$\delta P = \frac{S_{\text{н}} L_b \cos \varepsilon \cos \alpha}{\sqrt{2} \lambda_{\text{т}} \sqrt{\lambda_{\text{л}}}} \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \frac{G(\alpha - \psi) |D_{\text{л}}(\alpha) D_{\text{т}}(\alpha)|}{\sqrt{lm + R} \left( lm \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta} + R \right)} \sqrt{\frac{b \cos(\alpha - \psi)}{lm \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta} + R + b \cos(\alpha - \psi)}} |\Phi_{\text{н}}(t)|^2. \quad (6)$$

Для компактного углового отражателя («зарубки»), в основании которого также выпуклая цилиндрическая поверхность, в дополнительной плоскости будет происходить рассеивание на отражающих гранях ограниченной ширины  $l_{b2}$ , тем самым, согласно [6, 8, 9, 19], выражение (6) примет вид:

$$\delta P = \frac{S_{\text{н}} S_{\text{зар}} \cos \varepsilon \cos \alpha}{\lambda_{\text{л}}^2 \cos \beta} \frac{G(\alpha - \psi) |D_{\text{л}}(\alpha) D_{\text{т}}(\alpha)|}{(lm + R) \left( lm \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta} + R \right)} \sqrt{\frac{b \cos(\alpha - \psi)}{lm \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta} + R + b \cos(\alpha - \psi)}} |\Phi_{\text{н}}(t)|^2. \quad (7)$$

На основании полученного выражения (6) было смоделировано изменение амплитуды сигнала, отраженного от предложенной модели углового отражателя  $|\delta P_{\text{отр}}^{\text{к}}|$ , в сравнении с регламентируемым НТД (то есть с плоским основанием)  $|\delta P_{\text{отр}}^{\text{п}}|$ , по формуле (3), расположенных на одинаковой глубине  $h = 10,0$  мм (см. рис. 1) и нормированных на величину  $|\delta P_{\text{отр}}^{\text{макс}}| = \max(\delta P_{\text{отр}}^{\text{п}}, \delta P_{\text{отр}}^{\text{к}})$ . При проведении расчета рабочая частота пьезопластины радиусом  $a = 3,0$  мм составляла  $f = 4,0$  МГц, значение задержки призмы  $l_0$  определялось исходя из величины иммерсионного слоя  $h_{\text{им}} = 20,0$  мм [4]. При проведении ВТД для ввода УЗ пучка непосредственно в стенку трубопровода используют углы ввода до  $50^\circ$  [4]. Однако, чтобы оценить влияние кривизны углового отражателя на изменение амплитуды эхосигнала при различных углах ввода при проведении моделирования, их диапазон был расширен до  $70^\circ$ . Параметры излучателя при этом принимались одинаковыми.

Высота вертикальной грани при  $\psi = 0$  для рассматриваемых моделей принималась равной  $L_b = 2,0$  мм. Повреждения стенки трубопровода ввиду общей коррозии или вмятин, как следует из размеров реальных дефектов по [4] и возможностей ВИП, могут быть имитированы выпуклым цилиндром с размерами  $b \gg \delta$ . Стоит отметить, что из рассматриваемого соотношения элементов поверхности основания данного отражателя использование полученных выражений (6), (7) для случая язвенной коррозии, при которой  $b \approx \delta$ , ограничено.

Для моделирования рассмотренных соотношений были выбраны следующие размеры выпуклой цилиндрической поверхности. При имитации плоского случая основания ( $b \rightarrow \infty$ ) использовался радиус  $b = 500$  мм. Дальнейшее уменьшение величины  $b$  выбиралось в результате увеличения разницы амплитуд эхосигналов от моделей с плоским и криволинейным основанием более 2 дБ. Таким образом, для моделирования влияния кривизны выпуклой поверхности в основании углового отражателя рассматривались радиусы  $b$  от 500 до 5 мм при величине  $\delta = 1$  мм.

На рис. 3—8 для различных номинальных углов ввода  $\alpha_0$  приведены зависимости  $|\delta P_{\text{отр}}|^N = |\delta P_{\text{отр}}^k, \delta P_{\text{отр}}^p| / |\delta P_{\text{отр}}^{\text{max}}|$  от величины смещения точки ввода луча  $O_v$  относительно центра  $O$ , нормированного на глубину  $h$  при различной кривизне основания протяженного углового отражателя. Из-за снижения скорости изменения амплитуды при увеличении угла ввода диапазон значений относительного смещения  $\delta x = [-x_1; x_1]$  также увеличивался, при этом положительное значение  $\delta x$  соответствовало увеличению расстояния  $x_0$ , а отрицательное — уменьшению.

Как видно из рис. 3—8, смещение положения максимума сигнала относительно  $\delta x = 0$  как при наличии кривизны основания углового отражателя, так и при ее отсутствии — одинаково, то есть кривизна основания не влияет на положение максимума сигнала относительно начала координат в точке  $O$ . Тем самым, отклонение максимума сигнала относительно точки  $O$  ( $\delta x = 0$ ) аналогично случаю с плоским основанием, обуславливается изменением фактического угла ввода относительно номинального  $\alpha_0$ , что соответственно приводит к изменению величины  $G(\alpha)$  и пути, который волна проходит в упругой среде до точки  $P$ .

В то же время, величина амплитуды сигнала снижается с увеличением кривизны  $1/b$  пропорционально множителю  $\sqrt{b \cos \alpha / (lm(\cos^2 \alpha / \cos^2 \beta) + R + b \cos \alpha)}$ , который характеризует расширение направленности ультразвукового пучка, формируемого в результате взаимодействия с выпуклой цилиндрической поверхностью.

На основании приведенных на рис. 3—8 зависимостей были получены максимальные значения амплитуд эхосигналов при различных углах ввода  $\alpha_0$  и различной кривизне  $1/b$  основания. Исходя из этих значений, на рис. 9 была определена зависимость изменения максимумов амплитуды отраженного сигнала для модели углового отражателя с выпуклым цилиндрическим основанием раз-

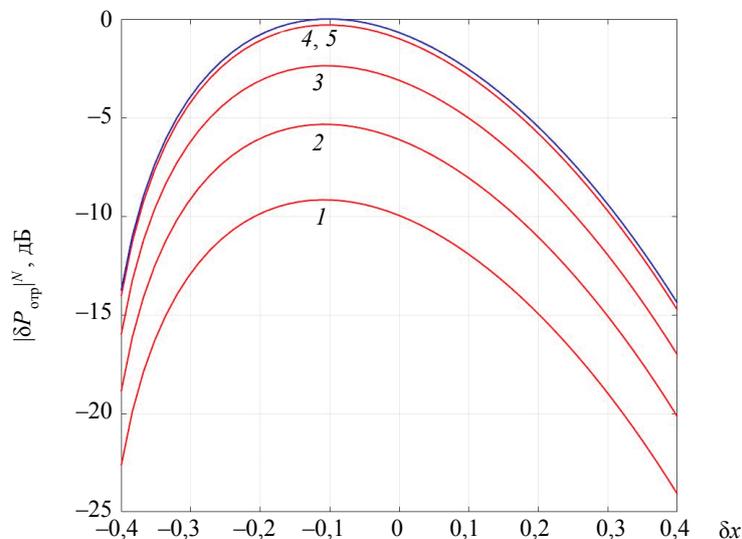


Рис. 3. Нормированные зависимости  $|\delta P_{\text{отр}}^k|^N$  (1—4) и  $|\delta P_{\text{отр}}^p|^N$  (5) от относительного смещения  $\delta x$  для номинального угла ввода  $40^\circ$  при радиусах основания углового отражателя: 1 —  $b = 5,0$  мм; 2 —  $b = 15,0$  мм; 3 —  $b = 50,0$  мм; 4 —  $b = 500,0$  мм по [2]; 5 — плоская поверхность (угловой отражатель, регламентируемый по [20, 21]).

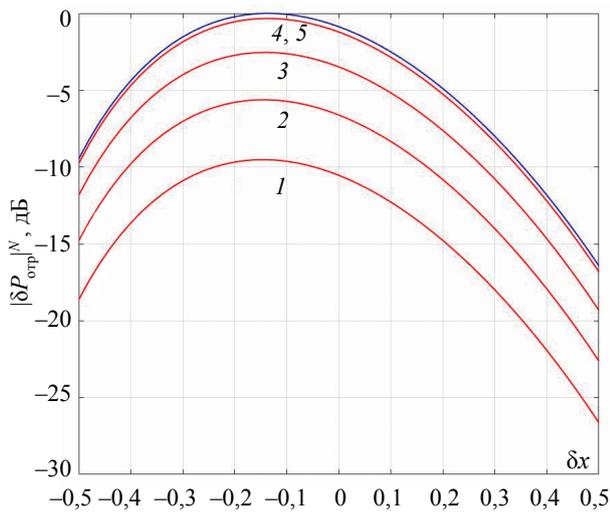


Рис. 4. Нормированные зависимости  $|\delta P_{отр}^к|^N$  (1—4) и  $|\delta P_{отр}^п|^N$  (5) от относительного смещения  $\delta x$  для номинального угла ввода  $45^\circ$  при радиусах основания углового отражателя:

1 —  $b = 5,0$  мм; 2 —  $b = 15,0$  мм; 3 —  $b = 50,0$  мм; 4 —  $b = 500,0$  мм по [2]; 5 — плоская поверхность (угловой отражатель, регламентированный по [20, 21]).

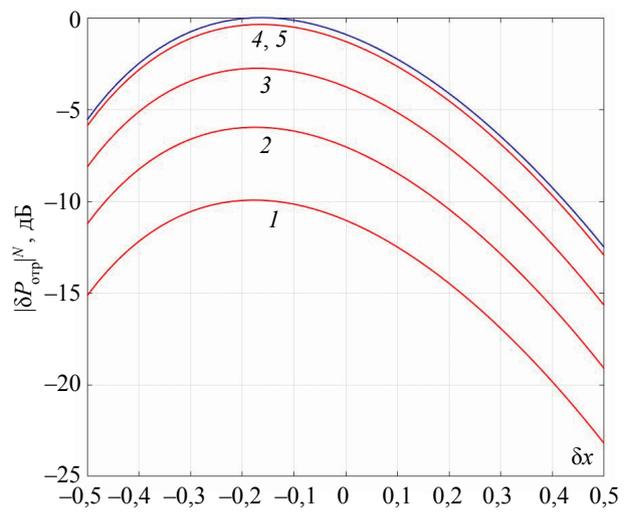


Рис. 5. Нормированные зависимости  $|\delta P_{отр}^к|^N$  (1—4) и  $|\delta P_{отр}^п|^N$  (5) от относительного смещения  $\delta x$  для номинального угла ввода  $50^\circ$  при радиусах основания углового отражателя:

1 —  $b = 5,0$  мм; 2 —  $b = 15,0$  мм; 3 —  $b = 50,0$  мм; 4 —  $b = 500,0$  мм по [2]; 5 — плоская поверхность (угловой отражатель, регламентированный по [20, 21]).

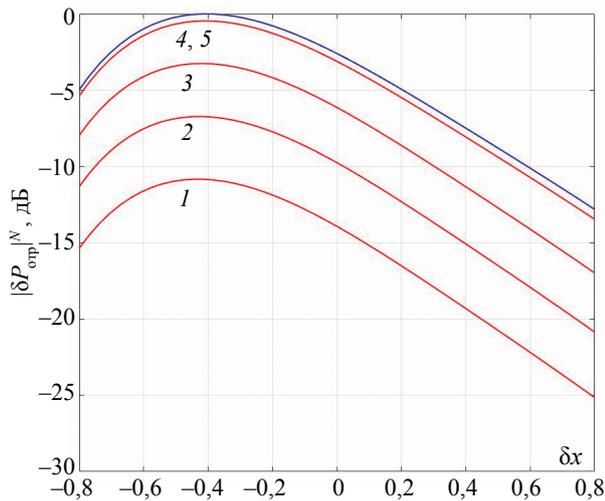


Рис. 6. Нормированные зависимости  $|\delta P_{отр}^к|^N$  (1—4) и  $|\delta P_{отр}^п|^N$  (5) от относительного смещения  $\delta x$  для номинального угла ввода  $60^\circ$  при радиусах основания углового отражателя:

1 —  $b = 5,0$  мм; 2 —  $b = 15,0$  мм; 3 —  $b = 50,0$  мм; 4 —  $b = 500,0$  мм по [2]; 5 — плоская поверхность (угловой отражатель, регламентированный по [20, 21]).

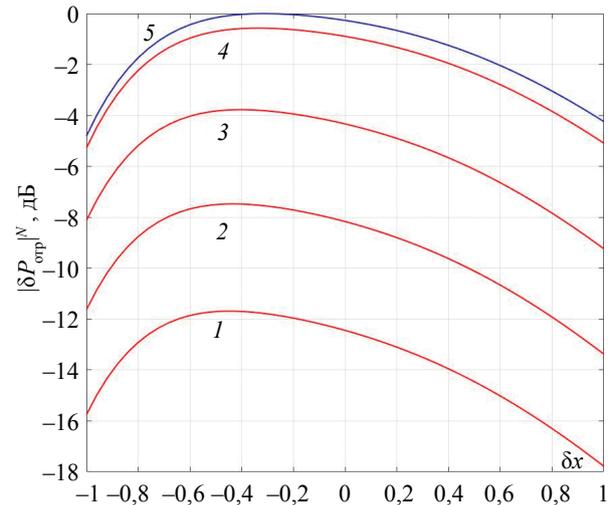


Рис. 7. Нормированные зависимости  $|\delta P_{отр}^к|^N$  (1—4) и  $|\delta P_{отр}^п|^N$  (5) от относительного смещения  $\delta x$  для номинального угла ввода  $65^\circ$  при радиусах основания углового отражателя:

1 —  $b = 5,0$  мм; 2 —  $b = 15,0$  мм; 3 —  $b = 50,0$  мм; 4 —  $b = 500,0$  мм по [2]; 5 — плоская поверхность (угловой отражатель, регламентированный по [20, 21]).

личного радиуса  $b$  (зависимости 1—4 на рис. 9) на основании полученной формулы (6) и с плоским основанием при  $b \rightarrow \infty$  (зависимость 5 на рис. 9) по формуле (3) при различных номинальных углах ввода  $|\delta P_{отр}(\alpha_0)|$ .

Как видно из рис. 9, амплитуда эхосигнала от предложенной в [2] модели углового отражателя с выпуклым цилиндрическим основанием не превышает эхосигнал от углового отражателя, регламентированного [20, 21] с плоским основанием, при этом качественный характер изменения амплитуды эхосигнала от этих моделей одинаков вне зависимости от кривизны основания углового отражателя и при различных номинальных углах ввода определяется изменением коэффициен-

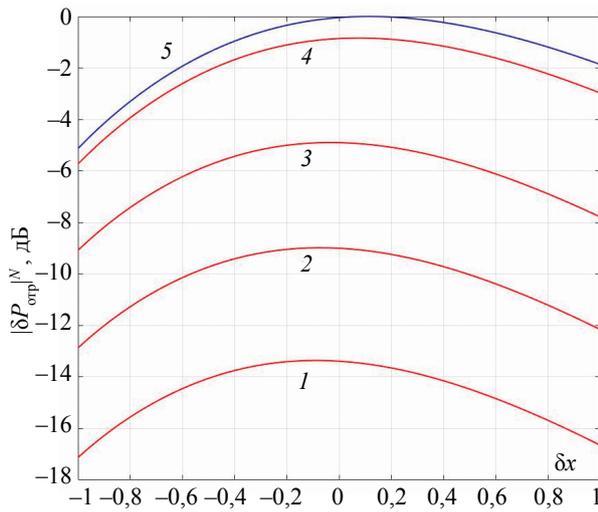


Рис. 8. Нормированные зависимости  $|\delta P_{отр}^k|^N$  (1—4) и  $|\delta P_{отр}^N|^N$  (5) от относительного смещения  $\delta x$  для номинального угла ввода  $70^\circ$  при радиусах основания углового отражателя:  
 1 —  $b = 5,0$  мм; 2 —  $b = 15,0$  мм; 3 —  $b = 50,0$  мм; 4 —  $b = 500,0$  мм по [2]; 5 — плоская поверхность (угловой отражатель, регламентируемый по [20, 21]).

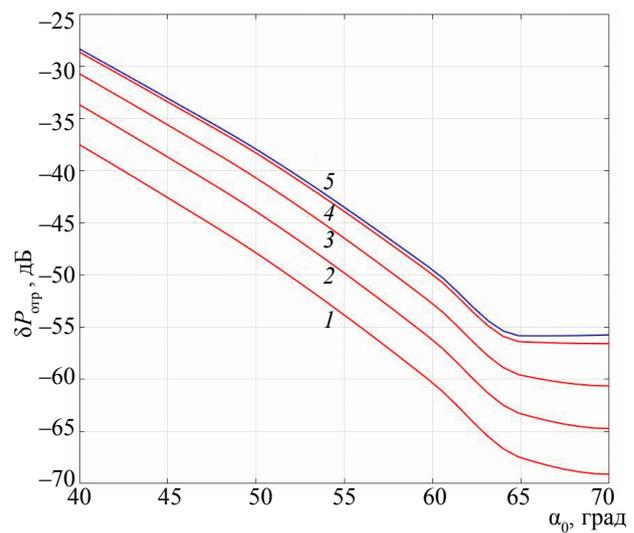


Рис. 9. Изменение амплитуды сигнала от модели углового отражателя, в основании которого цилиндрическая поверхность  $|\delta P_{отр}|$ , как функции от номинального угла ввода  $\alpha_0$  при различной кривизне основания углового отражателя:  
 1 —  $b = 5,0$  мм; 2 —  $b = 15,0$  мм; 3 —  $b = 50,0$  мм; 4 —  $b = 500,0$  мм по [2]; 5 — плоская поверхность (угловой отражатель, регламентируемый по [20, 21]).

та  $G(\alpha)$  и смещением максимума амплитуды относительно точки ввода центрального луча  $O$  для каждого угла ввода, что качественно соответствует результатам эксперимента, приведенного в [2].

В то же время, величина амплитуды зависит от кривизны поверхности основания — чем меньше радиус  $b$ , тем больше снижение амплитуды относительно модели углового отражателя регламентированного НТД и больше разница между сигналами от рассматриваемых моделей. Так, при величине  $b = 500$  мм, соответствующей случаю  $b \rightarrow \infty$ , разница между величинами амплитуд сигналов, по формуле (6) для выпуклого цилиндрического основания и формуле (3) для плоского основания на всем диапазоне рассматриваемых углов ввода не превысила 1 дБ. Тем самым, при  $b \rightarrow \infty$  формула (6) сводится к формуле (3) для углового отражателя с плоским основанием. При уменьшении радиуса до  $b = 50$  мм разница амплитуд эхосигналов от рассматриваемых моделей составила от 2 до 5 дБ при увеличении величины угла ввода. Дальнейшее уменьшение радиуса до  $b = 5$  мм привело к значительному снижению амплитуды отраженного сигнала от углового отражателя с выпуклым цилиндрическим основанием по отношению к регламентированному по [20, 21] с плоским основанием, что привело к увеличению разницы между ними в среднем на 10 дБ. Увеличение кривизны до размеров  $b \approx \delta$  не рассматривалось, тем самым использование полученных выражений (6), (7) для случаев язвенной коррозии ограничено.

Результаты расчета свидетельствуют о том, что в случае развития трещиноподобных дефектов от общих коррозионных повреждений стенки трубопровода или образующихся вмятин на величину максимальной амплитуды эхосигнала, вне зависимости от номинального угла ввода  $\alpha_0$ , существенное влияние оказывает дополнительное расхождение УЗ пучка, обусловленное кривизной основания таких трещиноподобных коррозионно-механических дефектов по [1]. Чтобы учесть влияние образуемой ими конфигурации, описываемой угловым отражателем с выпуклым цилиндрическим основанием [2] при  $b \gg \delta$  и  $b \gg L_b$ , для их выявления и идентификации при проведении ВТД магистральных нефтепроводов, требуется корректировать чувствительность при настройке ВИП при помощи полученных в приближении геометрической акустики формул акустического тракта (6) и (7).

### ВЫВОДЫ

Рассмотрены процессы взаимодействия наклонно падающих поперечных волн с поверхностью углового отражателя, в основании которого выпуклая цилиндрическая поверхность радиусом  $b$ , предназначенного для имитации трещиноподобных коррозионно-механических дефектов. Описана структура формирующегося поля отражения, включающая: зеркально отраженные волны, дифрагированные волны, а также влияние процессов, протекающих при взаимодействии наклонно пада-

ющих поперечных волн со свободной поверхностью — образование боковых волн и эффекта «незеркального» отражения.

В приближении геометрической акустики было получено уравнение акустического тракта ВИП применительно к модели углового отражателя с выпуклым цилиндрическим основанием с соотношением размеров  $b \gg \delta$  и  $b \gg L_b$ .

Из расчетов получены количественные данные по ослаблению эхосигнала для различных радиусов основания рассматриваемого углового отражателя, имитирующих общую коррозию и вмятины. Показано, что амплитуда сигнала, отраженного от поверхности углового отражателя с выпуклым цилиндрическим основанием, не превышала сигнал от регламентированного с плоским основанием. Было определено, что при радиусе основания  $b = 500$  мм, соответствующему случаю  $b \rightarrow \infty$ , различия амплитуд эхосигналов от рассматриваемых моделей отсутствуют, и для близких значений кривизны применима модель с плоским основанием. При уменьшении радиуса  $b$  разница между эхосигналами от рассматриваемых моделей увеличивается: для радиуса  $b = 5$  мм она составила 10 дБ. Качественный характер изменения амплитуд этих сигналов вне зависимости от кривизны  $1/b$  был одинаков при различных углах ввода.

Полученные в приближении геометрической акустики формулы акустического тракта позволяют учесть влияние кривизны основания трещиноподобных коррозионно-механических дефектов, имитируемых угловым отражателем с выпуклой цилиндрической поверхностью с  $b \gg \delta$  и  $b \gg L_b$  и скорректировать чувствительность при настройке ВИП применительно к задаче выявления и идентификации трещин, развивающихся от механических или коррозионных повреждений стенки магистрального нефтепровода в ходе проведения ВТД.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 23.040.00-КТН-011-11. Классификатор дефектов магистральных и технологических трубопроводов [Электронный ресурс] // URL: [http://www.tehlit.ru/1lib\\_norma\\_doc/54/54762/index.htm#i12079](http://www.tehlit.ru/1lib_norma_doc/54/54762/index.htm#i12079) (дата обращения 23.11.18). Загл. с экрана.
2. Жуков А.Д. К вопросу выявления и идентификации комбинированных дефектов при диагностировании магистральных нефтепроводов с использованием акустических внутритрубных инспекционных приборов // Контроль. Диагностика. 2019. № 4. С. 28—33.
3. Specifications and requirements for in — line inspection of pipelines — Version 2016 [Электронный ресурс] // Pipeline operators forum (POF). 2016. URL: <https://www.pipelineoperators.org/downloads-links/> (дата обращения 06.06.2019).
4. Willems H., Kopp G., Haro V. Sizing crack indications from ultrasonic ILI: Challenges and options. [Электронный ресурс] // 12<sup>th</sup> Pipeline technology conference, Берлин Май 2—4. 2017. URL: <https://www.ndt-global.com/resources/sizing-crack-indications-from-ultrasonic-ili-challenges-and-options> (дата обращения 06.06.2019).
5. Ермолов И.Н., Гребенник В.С. Зависимость амплитуды ультразвукового сигнала от размеров и глубины залегания дефекта при иммерсионном способе контроля // Заводская лаборатория. 1962. № 1. С. 56—60.
6. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1981. 240 с.
7. Ермолов И.Н., Гребенник В.С., Райхман А.З. Отражение ультразвука от углового дефекта // Заводская лаборатория. 1964. № 30. С. 1351—1355.
8. Первалов С.П., Райхман А.З. Акустический тракт наклонного искателя для отражателя углового типа. I. // Дефектоскопия. 1979. № 11. С. 5—14.
9. Первалов С.П., Райхман А.З. Акустический тракт наклонного искателя для отражателя углового типа. II. // Дефектоскопия. 1979. № 12. С. 28—36.
10. Гребенник В.С. Уточнение характера зависимости амплитуды эхо — сигнала от величины углового отражателя углового типа // Дефектоскопия. 1976. № 6. С. 122—124.
11. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль / Справочник. В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
12. Ермолов И.Н. Достижения в теоретических вопросах ультразвуковой дефектоскопии, задачи и перспективы // Дефектоскопия. 2004. № 10. С. 13—48.
13. Краморов Г.А., Евсюков В.Н. О соотношении площадей плоскостного и углового отражателей // Дефектоскопия. 1972. № 4. С. 137—138.
14. Данилов В.Н., Ушаков В.М., Михалев В.В. К вопросу о моделировании акустического тракта наклонного преобразователя при ультразвуковом контроле сварных соединений малой толщины // Дефектоскопия. 2012. № 10. С. 28—39.
15. Данилов В.Н. Формулы акустического тракта дальней зоны совмещенного наклонного преобразователя для угловых отражателей типа вертикального цилиндрического отверстия и засверловки // Контроль. Диагностика. 2015. № 10. С. 9—16.

16. Данилов В.Н. Формулы акустического тракта ультразвукового контроля методом тандем // Контроль. Диагностика. 2015. № 3. С. 44—53.
17. Сумбатян М.А., Дружинина И.Д. К расчету диаграммы направленности призматического искателя // Дефектоскопия, 1989. № 3. С. 3—7.
18. Гребенник В.С., Тайц М.З. Расчет диаграммы направленности призматического искателя // Дефектоскопия. 1981. № 1. С. 87—101.
19. Данилов В.Н. Формулы акустического тракта совмещенного наклонного преобразователя для дальней зоны // Контроль. Диагностика. 2015. № 2. С. 43—50.
20. ГОСТ Р 55724—2013. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. М.: Стандартиформ, 2014. 24 с.
21. РД 25.160.10-КТН-016-15. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Неразрушающий контроль сварных соединений. М.: АО «АК «Транснефть», 2014. 187 с.
22. Хёнль Х., Мауэ А., Вестпфаль К. Теория Дифракции. М.: Мир, 1964. 428 с.
23. Данилов В.Н. Формулы акустического тракта дефектоскопа с прямым преобразователем в приближении геометрической акустики // Дефектоскопия. 1986. № 11. С. 24—28.
24. Данилов В.Н. Расчет акустического тракта наклонного преобразователя для цилиндрического отверстия // Контроль. Диагностика. 2015. № 1. С. 33—45.

---