

УДК 622.691.4+620.194.22

## Оценка размеров стресс-коррозионных дефектов при техническом диагностировании газопроводов

**И.В. Ряховских<sup>1\*</sup>, А.А. Каверин<sup>1</sup>, И.Г. Петухов<sup>1</sup>, А.В. Липовик<sup>1</sup>,  
А.А. Селиванов<sup>2</sup>, А.В. Сахон<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Российская Федерация, 142717, Московская обл., Ленинский р-н, пос. Развилка, Проектируемый пр-д № 5537, вл. 15, стр. 1

<sup>2</sup> ПАО «Газпром», Российская Федерация, 190900, г. Санкт-Петербург, BOX 1255

\* E-mail: I\_Ryakhovskikh@vniigaz.gazprom.ru

**Ключевые слова:** магистральный газопровод, стресс-коррозионные дефекты, техническое диагностирование, приборы, неразрушающий контроль.

**Тезисы.** В статье освещены основные результаты исследовательских испытаний приборов неразрушающего контроля (НК) применительно к задаче оценки размеров колоний стресс-коррозионных трещин на поверхности труб, эксплуатируемых в составе магистральных газопроводов и отличных по типоразмеру, свойствам и химическому составу. Приведены установленные закономерности связей между показаниями приборов, реализующих ультразвуковые, вихретоковые, электропотенциальные методы НК, и фактическими размерами трещин. Достоверность результатов исследований и выводов подтверждена стандартизированными методами оптической электронной микроскопии и рентгеновской томографии при верификации размеров трещин в местах максимальных показаний приборов. Представлены практические рекомендации по применению приборов НК для оценки глубин стресс-коррозионных трещин, изложены возможности данного подхода к задаче категорирования и отбраковки труб магистрального газопровода.

Для большинства газопроводов, построенных во второй половине прошлого века, характерны образование и постепенное развитие многочисленных эксплуатационных повреждений поверхности труб в местах доступа коррозионной среды. Общее число таких повреждений труб может достигать нескольких тысяч на один километр магистрального газопровода (МГ), при этом большинство из них имеют незначительные размеры и не оказывают существенного влияния на работоспособность газопроводов.

Общий износ МГ выдвигает на первый план перед газовыми компаниями задачи планирования и рационального распределения финансовых средств на их техническое диагностирование и ремонт. В последние несколько лет особенно востребованы разработки малозатратных технологий ремонта и восстановления несущей способности газопроводов [1, 2]. В частности, ПАО «Газпром» проводятся системные исследования технологии ремонта в трассовых условиях протяженных участков МГ с дефектами коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) [3]. Суть технологии заключается в возможности продолжения эксплуатации большинства труб с дефектами КРН, глубина которых не превышает 10 % от толщины стенки трубы [4], а также профилактики их дальнейшего роста за счет применения покрытий, содержащих ингибирующие композиции [5]. Важнейшим аспектом данной технологии ремонта является классификация дефектов по степени опасности на основании результатов приборного контроля труб, что ставит задачи более точной локализации наиболее глубоких трещин и достоверной оценки их размеров в колониях трещин КРН методами неразрушающего контроля (НК) в трассовых условиях.

Установленные в нормативной документации ПАО «Газпром» подходы к диагностированию газопроводов в первую очередь направлены на выявление любой трещины глубиной более 0,3 мм на поверхности трубы для последующей вырезки дефектных труб, детального их обследования и ремонта на специализированных заводах (базах). Поэтому в настоящее время процесс определения глубины дефектов КРН представляет собой комплекс последовательных операций, заключающихся в локализации дефектной зоны визуальным и измерительным вихретоковым методами НК,

проявлении дефектов средствами магнитопошковой дефектоскопии, контролируемой шлифовки или пропила металла, последующем контроле наличия трещин на вышлифованной поверхности и измерении остаточной толщины стенки трубы в образовавшейся выемке или глубины пропила. Ввиду того что количество дефектов КРН может достигать нескольких десятков на поверхности одной трубы, а их площадь – трети от общей площади поверхности трубы, данный подход не применим в комплексе с современными технологиями ремонта труб в трассовых условиях по причинам высокой трудоемкости и существенных финансовых и временных затрат на контролируемую вышлифовку металла при оценке глубины трещин или устранении пропилов.

Вышесказанное делает актуальным разработку алгоритмов обработки и способов оценки результатов НК в трассовых условиях при контроле труб с дефектами КРН, а также разработку методической основы для обеспечения требуемой точности, производительности и экономической эффективности технического диагностирования при ремонте МГ.

### **Методика экспериментальной оценки перспектив применения средств НК для определения глубины дефектов КРН**

Методика эксперимента разработана с учетом ранее полученных результатов и недостатков исследования применимости методов НК при оценке глубин поверхностных трещин в ферромагнитных материалах. В российских и зарубежных публикациях [6–13] освещаются результаты исследований, посвященных математической обработке сигналов от несплошностей, полученных при вихретоковом контроле стальных образцов, приводятся алгоритмы выделения информативных сигналов и закономерности взаимодействия электропотенциальных и вихретоковых преобразователей с искусственными дефектами (моделями трещин), параметры которых приближены к параметрам реальных дефектов. Вместе с тем указанные исследования не в полной мере применимы на практике, так как не учитывают специфики дефектов КРН МГ, связанной с характерными морфологическими особенностями трещин (извилистой и наклонной траекторией), неравномерной плотностью трещин в колониях, наличием продуктов коррозии или влаги в полости трещины во время проведения НК. Кроме

того, исследования направлены на изучение конкретного метода НК и не учитывают возможного синергетического эффекта комплексирования результатов контроля с применением различных приборов.

Возможности применения средств НК для оценки глубины дефектов КРН устанавливались с применением 12 портативных приборов общего назначения, реализующих вихретоковый, ультразвуковой и электропотенциальный методы контроля. При вихретоковом контроле дефектов КРН использовались дефектоскопы, работающие в частотном диапазоне от 10 кГц до 1,5 МГц, с дифференциальными накладными вихретоковыми преобразователями (ВТП) трансформаторного типа различных эквивалентных диаметров. Технические средства, реализующие электропотенциальные методы НК, были представлены портативными трещиномерами с рабочей частотой тока порядка 1 кГц и 4-электродными (два токовых и два потенциальных электрода) датчиками линейного ( $1 \times 4$ ) и квадратного ( $2 \times 2$ ) исполнения.

В ходе ультразвукового контроля в ручном режиме применяли дефектоскопы, способные оценивать размеры дефекта, запоминать и документировать параметры настроек и результаты контроля, а именно: ультразвуковые дефектоскопы, оборудованные раздельно-совмещенными пьезоэлектрическими преобразователями, работающими на частоте 5 МГц и имеющими функцию регулировки усиления до 85 дБ с дискретностью 1 дБ; ультразвуковой дефектоскоп-томограф с цифровой (вычислительной) фокусировкой антенной решетки и томографической обработкой данных, позволяющий получать в том числе отображение образов вертикально ориентированных дефектов. Для работы с дефектоскопом-томографом применялась фазированная антенная решетка поперечных волн с центральной рабочей частотой 7,5 МГц и сектором обзора от  $35^\circ$  до  $80^\circ$ .

С целью экспериментального исследования возможностей приборов НК из труб, ранее эксплуатировавшихся в составе МГ, были вырезаны 60 образцов, содержащих дефекты КРН различной глубины и плотности трещин в колонии. Толщины стенок образцов варьировались от 9 до 18,7 мм, что обеспечило учет основного сортамента труб, входящих в состав МГ. Образцы были изготовлены из наиболее подверженных КРН сталей классов прочности X60...X70 в широкой номенклатуре марок

(09Г2, 09Г2С, 10Г2, 17ГС, 17Г2С, 20Г2), что позволило учесть различные вариации электрофизических свойств и структурных неоднородностей металла, обусловленных металлургическим качеством и технологией изготовления труб [14]. Подготовленные образцы представляли собой прямоугольные фрагменты трубы размерами от 200×200 до 630×400 мм (рис. 1). Разметку под вырезку образцов осуществляли таким образом, чтобы трещина (группа трещин) располагалась в центральной части образца (см. рис. 1б). Размеры образцов определялись исходя из размеров выявленных колоний трещин в повреждениях КРН с учетом исключения краевых эффектов при измерениях от границ образцов. При подготовке образцов сохраняли исходное состояние поверхности металла трубы, в частности механические и коррозионные повреждения.

Визуализация трещин на поверхности образцов выполнялась с применением магнитопорошковой дефектоскопии. Предварительно проводилась зачистка наружной поверхности образцов до шероховатости<sup>1</sup> поверхности  $Ra \leq 10$  мкм ( $Rz \leq 63$  мкм). Для получения более контрастного индикаторного рисунка на контролируемый участок образца наносился слой белой краски методом аэрозольного распыления. Осмотр контролируемой поверхности проводился в приложенном магнитном поле не ранее чем через 20 с после нанесения магнитного индикатора. Намагничивание выполнялось с использованием электромагнита Magnaflux Y-6. По линиям индикаторного рисунка определялись характеристики развития дефектов КРН на поверхности образцов, и фиксировались следующие их основные особенности: различная плотность трещин в колониях (от 1 до 15 ед./см<sup>2</sup>), расположение трещин в колониях относительно друг друга, извилистая траектория трещин с признаками объединения коллинеарных трещин, а также наличие в колонии трещин, длины которых отличались в 5 и более раз.

Предварительно на образцах размечались маршруты и контрольные точки проведения измерений приборами НК (рис. 2). Точки контроля выбирались в зонах с различной концентрацией трещин КРН с учетом результатов



Рис. 1. Общий вид образцов (а), схема вырезки образца из трубы, мм (б)

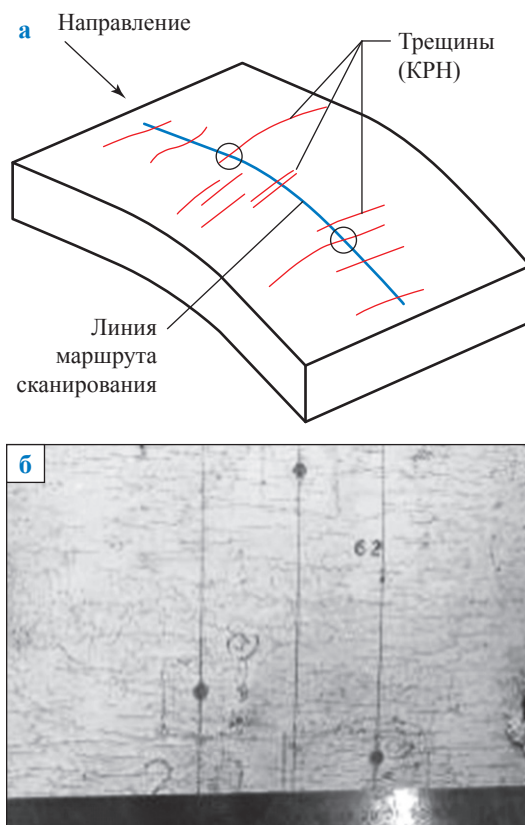


Рис. 2. Схема (а) и пример (б) образца с размеченными маршрутами и контрольными точками для измерений

<sup>1</sup> Ra – среднеарифметическое отклонение профиля; Rz – наибольшая высота профиля (см. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики).

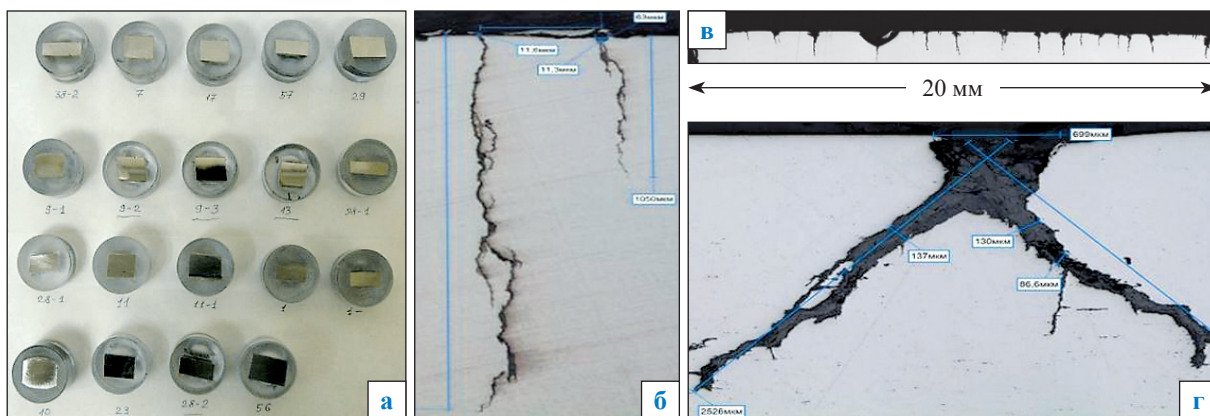


Рис. 3. Внешний вид шлифов до травления (а) и морфология дефектов КРН в образцах: б – ортогональные трещины; в – плотность трещин в колонии; г – наклонные трещины

предварительного оценочного вихретокового контроля, в процессе которого фиксировались трещины, соответствовавшие максимальным показаниям дефектоскопов (см. рис. 2в).

Всего на образцах были определены более 100 точек, в каждой из которых проводилось не менее пяти измерений глубины трещин КРН приборами НК. Совокупность экспериментальных данных составила выборку из более чем 7600 результатов контрольных замеров глубин трещин в колониях КРН с применением 12 приборов НК. Настройка приборов НК выполнялась на контрольных образцах согласно инструкции по их эксплуатации и нормативной документации, регламентирующей проведение НК соответствующим методом.

Фактическая глубина дефекта КРН в каждой контрольной точке определялась посредством оптической электронной микроскопии путем вырезки, шлифовки и обследования образцов размером 20×20 мм (рис. 3).

Металлографические шлифы изготавливались методом горячей запрессовки в автоматическом гидравлическом прессе TORTECH ML40B с последующей обработкой на шлифовально-полировальном станке TORTECH P25FRC. Металлографические исследования шлифов выполнялись на металлографическом микроскопе Zeiss AxioVert A1 с анализатором изображения Thixomet при увеличениях 100×...1000×.

Исследования шлифов предполагали получение и изучение панорамной фотографии верхней части образца, определение глубины, морфологии, раскрытия и плотности трещин в области контроля (см. рис. 3б). В ортогональной плоскости внешней поверхности

образцов определялись трещины разной глубины – от 0,1 до 10 мм: как перпендикулярные вектору максимальных растягивающих напряжений (см. рис. 3в), так и имеющие сложную ветвистую форму с отклонением траектории развития от нормали к поверхности трубы (см. рис. 3г).

В целях получения дополнительной информации о типе и характере трещин КРН в колонии, а также их визуализации и изучения их внутренней структуры в объеме контролируемого шлифа проводились расширенные исследования шлифов с применением промышленного компьютерного томографа GE v|tome|x m 300 (рис. 4).

Точность определения глубины дефекта КРН приборами НК оценивалась путем статистической обработки результатов измерений согласно ГОСТ Р 8.736-2011<sup>2</sup>. За оцениваемую величину, а именно измеренное приборами НК значение глубины дефекта КРН, принималось среднее арифметическое ( $\tilde{h}$ ) всех полученных отдельных измерений:

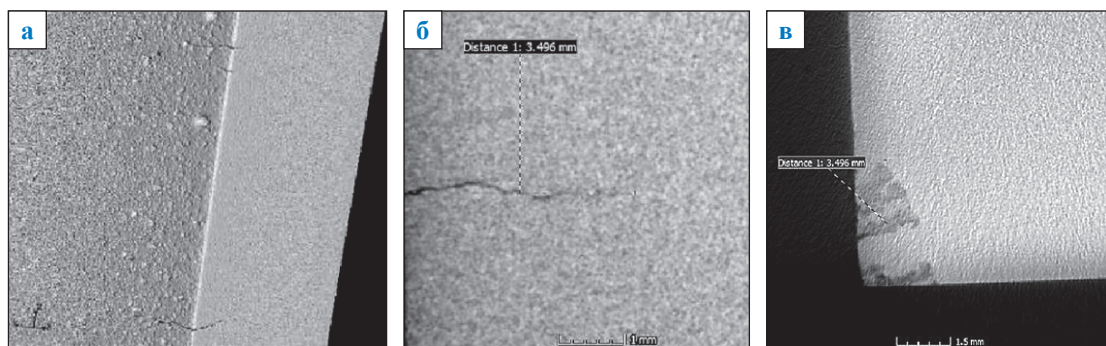
$$\tilde{h} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i, \quad (1)$$

где  $h_i$  –  $i$ -й результат измерений глубины дефекта КРН;  $n$  – число измерений.

Далее для количественного выражения качества проведенного измерения каждым прибором НК рассчитывали абсолютную ( $\Delta$ ) и относительную ( $\delta$ ) погрешности определения глубины дефекта КРН. За истинную величину

<sup>2</sup> ГОСТ Р 8.736-2011 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.





**Рис. 4. Рентгеновская томограмма шлифа:**  
**а – трехмерная модель; б – вид трещины в поперечном сечении шлифа;**  
**в – вид излома трещины**

принималось значение глубины дефекта, определенное по результатам металлографии ( $h_n$ ):

$$\Delta = \tilde{h} - h_n; \quad (2)$$

$$\delta = \frac{\Delta}{\tilde{h}} \cdot 100 \%. \quad (3)$$

### Результаты эксперимента

Сводная выборка данных о результатах измерений глубины всех представленных типов трещин КРН приборами НК приведена на рис. 5. Линиями на графиках ограничена область приемлемых ( $\delta = \pm 30\%$ ) отклонений результатов измерений от действительного значения, определенного по результатам металлографических исследований.

Количественное представление относительных погрешностей результатов измерений глубины дефектов КРН приборами НК представлено на рис. 6. Сводные результаты измерений показывают (см. рис. 5 и 6), что в отношении ряда диапазонов глубин трещин погрешности средств НК существенно различаются. Это объясняется наличием в контрольных точках измерений неодинаковых по плотности колоний трещин разной длины, имеющих неправильный извилистый профиль.

Анализ представленных зависимостей (см. рис. 6) показывает, что для дефектов КРН малой глубины (до 1 мм) наиболее точные результаты обеспечивают вихретоковые дефектоскопы, но с увеличением глубины дефекта КРН точность их показаний снижается. При использовании штатных вихретоковых дефектоскопов возможно получить приемлемую для практики погрешность оценки трещин КРН глубиной

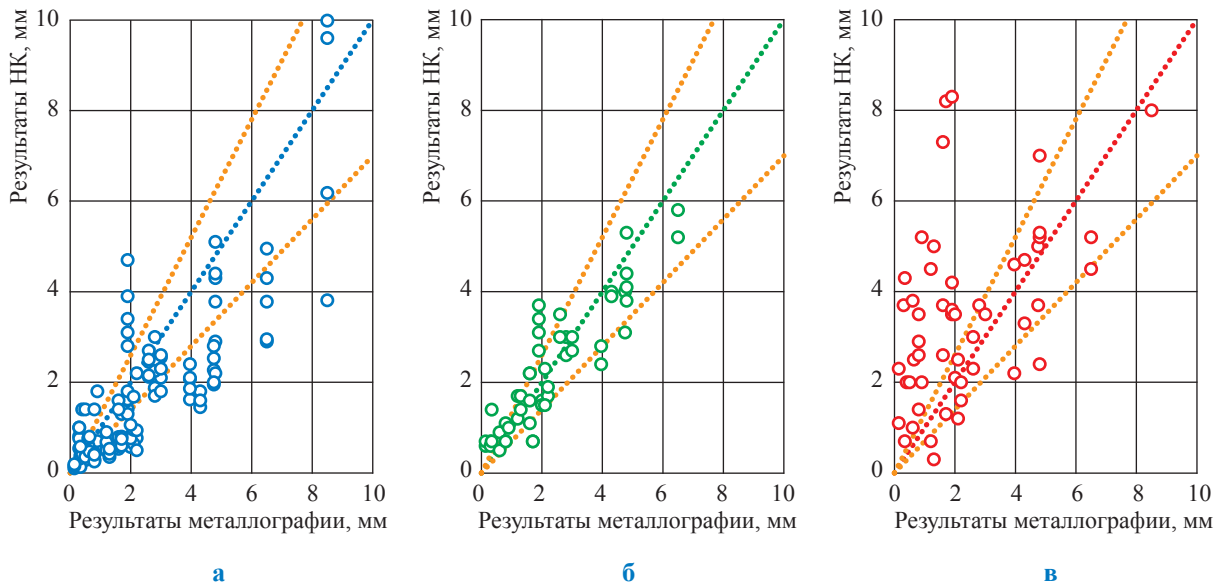
до 3 мм. Приемлемые по точности результаты измерений в пределах  $\delta \pm 30\%$  продемонстрировали электропотенциальные трещиномеры для глубин дефектов более 1 мм и ультразвуковые дефектоскопы при глубинах дефектов более 2,5 мм (более 20% толщины стенки трубы).

Важно отметить, что результаты вихретокового контроля при измерении глубины трещин в колонии КРН могут быть существенно занижены, в среднем на 30...40% при длине трещины, соизмеримой с диаметром ВТП ( $D_{ВТП}$ ) и меньшей. Применительно к электропотенциальным трещиномерам точность дефектометрической оценки глубины трещины определяется условием ее линейной протяженности. Так, длина измеряемой трещины должна в 3 раза и более превышать ее глубину.

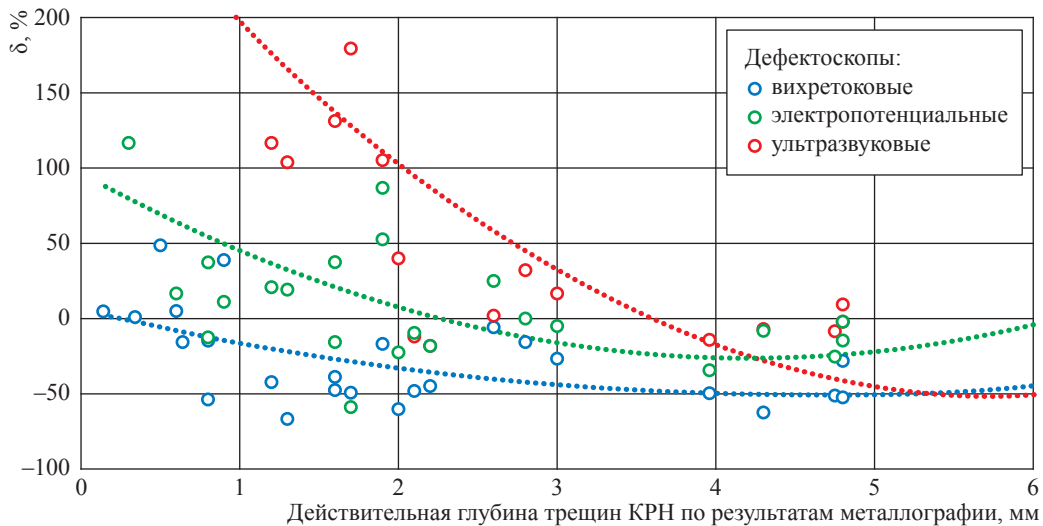
Результаты измерений глубин трещин КРН приборами НК разделены на три выборки в зависимости от морфологических особенностей трещин (рис. 7).

На основании представленных результатов исследований установлены зависимости достоверности оценки глубины трещин КРН от плотности их расположения в колониях. При линейной аппроксимации значений прослеживается однозначная тенденция к возрастанию ошибки измерений при более плотном расположении трещин в колонии КРН (рис. 8).

Для вихретоковых дефектоскопов существенное влияние на результат оценки глубины дефекта КРН оказывает нахождение соседних трещин на расстоянии, соизмеримом с  $D_{ВТП}$  и меньшем. Учитывая плотность трещин в колонии дефектов КРН, при оценке их глубины целесообразно условно разделять ВТП на две группы:  $D_{ВТП} \leq 3$  мм и  $D_{ВТП} > 4$  мм. Так, средняя плотность трещин более 4 ед./см<sup>2</sup> приводит



**Рис. 5. Сводные результаты измерений глубины дефектов КРН приборами НК:**  
**а – вихрековые дефектоскопы; б – электропотенциальные трещиномеры;**  
**в – ультразвуковые дефектоскопы**



**Рис. 6. Относительные погрешности результатов измерений**  
**глубины дефектов КРН приборами НК**

к росту погрешности оценки глубины трещины до 50 % при  $D_{ВТП} \leq 3$  мм и до 65 % при  $D_{ВТП} > 4$ . Для электропотенциальных трещиномеров невозможность точного позиционирования контактов преобразователя над одной трещиной в колонии из-за их высокой плотности приводит к увеличению погрешности измерений, при этом ошибка может составить примерно 40 %. В связи с этим в данных условиях для измерения глубины трещин целесообразно применять электропотенциальный преобразователь квадратного (2×2) исполнения.

Ультразвуковые дефектоскопы при увеличении плотности трещин в колонии более 3 ед./см<sup>2</sup> в несколько раз завышают результат оценки глубины трещин КРН.

Для всех применяемых приборов НК сложная ветвистая форма трещины с отклонением траектории развития трещины от нормали к поверхности трубы (см. рис. 3г) приводит к дополнительному завышению количественной оценки глубины трещин.

Определены наиболее перспективные с практической точки зрения схемы контроля

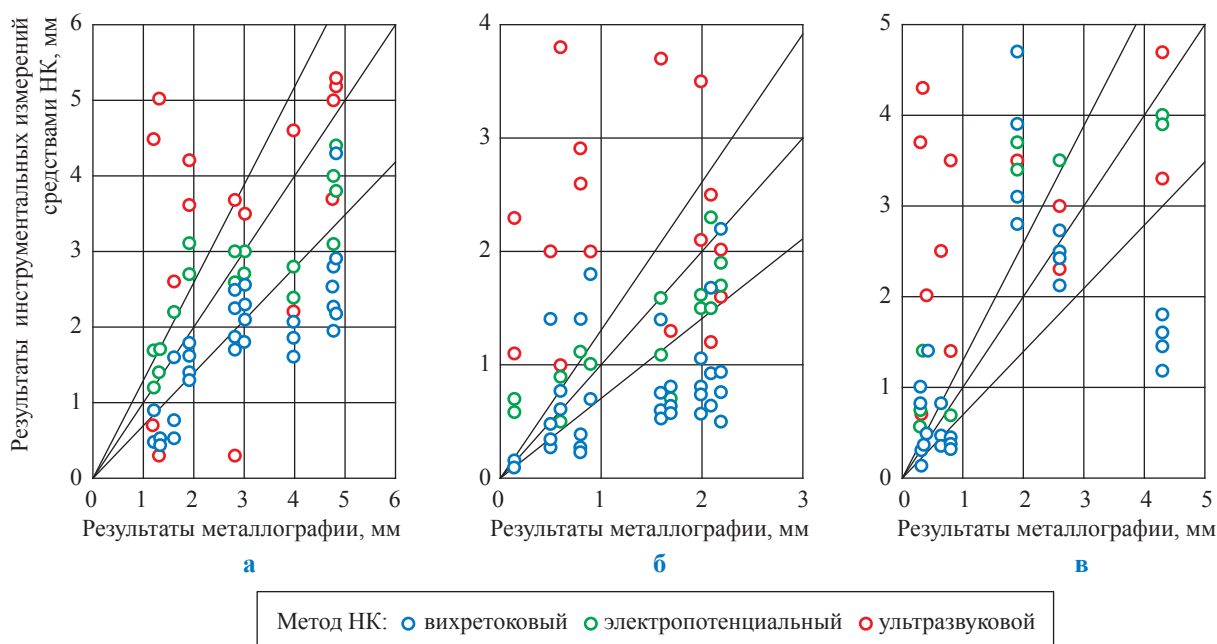


Рис. 7. Сводные данные о результатах измерений глубины трещин КРН по группам трещин: а – ортогональные трещины плотностью от 1 до 3 ед./см<sup>2</sup>; б – ортогональные трещины плотностью более 4 ед./см<sup>2</sup>; в – разветвленные и наклонные трещины

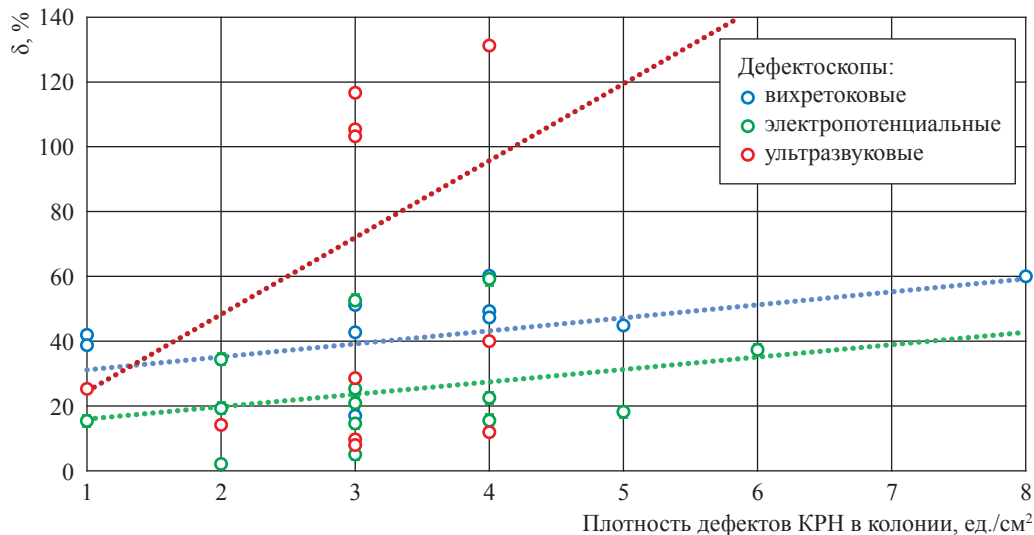


Рис. 8. Зависимость относительной погрешности результатов измерений глубины дефектов КРН от плотности трещин КРН в колонии

дефектов КРН ультразвуковыми приборами, а именно:

- дифракция поперечных волн на трещине с использованием раздельно-совмещенного преобразователя;
- эхо-импульсная томография с помощью ультразвукового дефектоскопа с цифровой фокусировкой апертуры антенной решетки.

На основании результатов исследований возможностей названных ультразвуковых способов контроля, их ограничений, особенностей

при поиске образов вершин трещин намечены составляющие для разработки методики измерений глубины дефектов КРН.

С учетом удобства практического применения наиболее приемлемыми в трассовых условиях являются приборы, реализующие вихретоковый метод НК. Вихретоковый контроль целесообразно применять в качестве поискового, а также при первичной оценке глубины КРН. При сопоставимых уровнях погрешностей применение электропотенциальных трещиномеров

### Погрешности результатов измерений приборами НК для ряда диапазонов фактических глубин трещин, %

Диапазон глубин трещин КРН, мм	Вихретоковый метод НК				Электрический (электропотенциальный) метод НК	
	$D_{ВТП} > 4$ мм		$D_{ВТП} \leq 3$ мм		– $\delta$	+ $\delta$
	– $\delta$	+ $\delta$	– $\delta$	+ $\delta$		
$\leq 0,5$	66	184	41	65	100	210
$> 0,5 \dots 1,0$	77	239	37	63	70	24
$> 1,0 \dots 1,5$	63	60	48	38	35	37
$> 1,5 \dots 2,0$	60	65	46	55	41	41
$> 2,0 \dots 2,5$	52	65	48	17	18	7
$> 2,5 \dots 3,0$	54	62	44	47	35	37

менее предпочтительно по сравнению с вихретоковыми дефектоскопами в связи с большими трудоемкостью и стоимостью подготовительных и технологических операций НК, которые требуют дополнительной зачистки поверхности над дефектом до металлического блеска.

При оценке глубины выявленной трещины большое значение имеет погрешность результатов измерений в определенных диапазонах. Путем сравнения измеренных приборами НК значений глубины дефектов КРН с результатами металлографических исследований установлены погрешности измерений для ряда диапазонов фактических глубин трещин (таблица).

#### Практические рекомендации

Полученные результаты исследований позволяют разработать практические рекомендации к технологиям контроля труб, определить оптимальные области применения различных приборов НК при оценке глубины дефектов КРН в процессе категорирования и отбраковки труб с дефектами КРН.

С учетом высокой производительности вихретокового метода контроля относительно электропотенциального при оценке дефектов КРН глубиной до 10 % от толщины стенки трубы целесообразно применять первый метод в комбинации с различными диаметрами ВТП. В этом случае технология поиска и предварительной оценки глубины дефектов КРН должна предполагать 100%-ный вихретоковый контроль всей поверхности контролируемого участка с использованием  $D_{ВТП} \gg 4$  мм. Далее для ряда дефектов КРН в определенном диапазоне глубин результат измерений может быть уточнен методом вихретокового контроля с применением ВТП «карандашного типа» ( $D_{ВТП} \leq 3$  мм) или способом контролируемой шлифовки.

На рис. 9 показаны возможности применения данного подхода к задаче категорирования и отбраковки труб наружным диаметром 1420 мм, имеющих стенку толщиной 15,7 мм, с повреждениями КРН, глубина которых составляет 10 % от толщины стенки трубы, с учетом приборных погрешностей (см. таблицу).

Повреждения КРН оценочной глубиной до 1,1 мм по показаниям вихретокового дефектоскопа при  $D_{ВТП} \leq 3$  мм относят к допустимым (менее 10 % от толщины стенки трубы), а оценочной глубиной более 2,8 мм – к недопустимым (более 10 % от толщины стенки трубы). Повреждения КРН оценочной глубиной 1,1...2,8 мм включительно по показаниям вихретокового дефектоскопа при  $D_{ВТП} \leq 3$  мм относят к граничным. Статистическая доля дефектов КРН в данном диапазоне глубин в среднем составляет 18 %, и оценку глубины для таких дефектов выполняют методом контролируемой шлифовки.

Статистический анализ данных о повреждениях КРН, выявленных методами НК в процессе капитального ремонта МГ ПАО «Газпром», показывает, что примерно в 80 случаях из ста глубина дефектов КРН не превышает 10 % от толщины стенки трубы [2]. При этом сметная стоимость работ по вышлифовке поверхности металла труб с последующим контролем может в несколько раз превышать стоимость операций по выявлению дефектов КРН и определению их размеров исключительно средствами НК. Исходя из реальных статистических данных о МГ с повреждениями КРН инновационная технология ремонта труб в трассовых условиях с применением покрытий, содержащих ингибирующие КРН композиции, и реализация предложенного подхода к НК в процессе категорирования и отбраковки труб с дефектами КРН позволят снизить объемы работ, обеспечивающих контролируемую шлифовку труб,



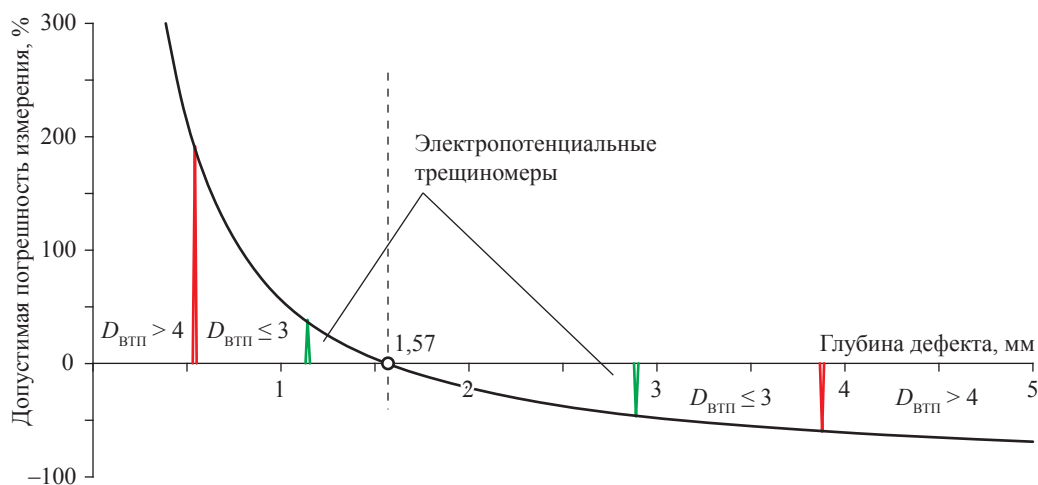


Рис. 9. Области применения приборов НК при отбраковке стальных (класс X70) труб диаметром 1420 мм (толщина стенки трубы – 15,7 мм) [5]

в 4 раза. Сравнительный технико-экономический анализ традиционной технологии определения размеров дефектов КРН и разработанного способа НК показывает потенциал 70%-ного сокращения финансовых затрат на техническую диагностику в процессе категорирования и отбраковки труб при рассматриваемом уровне дефектности МГ.

\*\*\*

Результаты исследовательских испытаний приборов, реализующих вихретоковый, электропотенциальный и ультразвуковой методы НК, продемонстрировали возможности и перспективы представленного оборудования при оценке глубины дефектов КРН.

Определено влияние параметров трещин КРН, характеризующихся различными плотностью, глубиной, раскрытием и пространственной ориентацией по толщине стенки трубы, на оценку их глубин приборами НК. При дефектометрии трещин КРН с высокой плотностью ( $> 4$  ед./см<sup>2</sup>) в колонии существенно возрастает погрешность измерений. Для вихретоковых дефектоскопов ошибка может составить примерно 65 %, для электропотенциальных трещиномеров – примерно 40 %.

Установлены предельные погрешности измерений глубины дефектов КРН приборами НК для ряда диапазонов фактических глубин трещин в колонии, подтвержденные методами оптической электронной микроскопии и рентгеновской томографии. Вихретоковые дефектоскопы с  $D_{ВТП} \leq 3$  мм обеспечивают наиболее точные результаты оценки глубины трещин

в колонии:  $+\delta = 65$  %,  $-\delta = 40$  % при максимальной глубине трещины до 1 мм;  $\pm\delta = 50$  % для трещин максимальной глубиной 1...3 мм (см. таблицу). Электропотенциальные трещиномеры обеспечивают в среднем  $\pm\delta = 40$  % для глубин коррозионных трещин свыше 1 мм, однако являются менее предпочтительными по сравнению с вихретоковыми дефектоскопами с точки зрения применения в трассовых условиях из-за трудоемкого комплекса подготовительных операций и могут быть рекомендованы для выборочной проверки результатов НК.

Результаты исследований позволяют разработать методику ранжирования выявленных дефектов КРН, сочетающую в себе высокую производительность технологических операций дефектоскопии, достаточную чувствительность и достоверность оценки при определении условных параметров дефектов КРН. Данный подход обеспечит оптимизацию объемов НК и минимизацию затрат на контролируемую шлифовку труб в процессе их категорирования и отбраковки в ходе капитального ремонта МГ. При этом детальный анализ данных ультразвуковых дефектоскопов с учетом особенностей схем контроля и влияния толщин стенок образцов выходит за рамки настоящей статьи и требует отдельного рассмотрения.

Полученные результаты также представляют практическое значение в отношении автоматизации процесса технического диагностирования и категорирования труб с применением диагностических комплексов при трассовом ремонте протяженных участков МГ.

## Список литературы

1. Филатов А.А. Особенности технологии капитального ремонта газопроводов на современном этапе / А.А. Филатов, И.И. Велиюлин, А.Д. Лазарев и др. // Газовая промышленность. – 2017. – № 12. – С. 90–94.
2. Кантюков Р.А. Устройства для ремонта локальных дефектов / Р.А. Кантюков, Н.М. Якупов, И.М. Тамеев и др. // Газовая промышленность. – 2015. – № 2. – С. 60–63.
3. Алимов С.В. Концепция диагностирования и ремонта магистральных газопроводов в регионах с высокой предрасположенностью к стресс-коррозии / С.В. Алимов, А.Б. Арабей, И.В. Ряховских и др. // Газовая промышленность. – 2015. – № S2 (724). – С. 10–15.
4. Арабей А.Б. Технология ремонта магистральных газопроводов, подверженных коррозионному растрескиванию под напряжением / А.Б. Арабей, И.В. Ряховских, А.В. Мельникова и др. // Наука и техника в газовой промышленности. – 2017. – № 3 (71). – С. 3–16.
5. Пат. RU 2639599 С2. Способ отбраковки и ремонта труб подземных трубопроводов / С.В. Нефедов, И.В. Ряховских, Р.И. Богданов и др.; заявка № 2016123908 от 15.06.2016; опубл. 21.12.2017.
6. Шкатов П.Н. Исследование возможности измерения электропотенциальным методом глубины поверхностной трещины в зоне сетки трещин / П.Н. Шкатов, И.О. Лисицина // Приборы. – 2016. – № 5. – С. 14–22.
7. Шкатов П.Н. Исследование возможности ослабления влияния соседней трещины на вихретоковый сигнал накладного вихретокового преобразователя / П.Н. Шкатов, И.О. Лисицина // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2016. – № 5 (319). – С. 130–135.
8. Janousek L. Decline in ambiguity of partially conductive cracks' depth evaluation from eddy current testing signals / L. Janousek, M. Smetana, M. Alman // Int. J. Appl. Electromagnet. Mech. – 2012. – Т. 39. – С. 329–334.
9. Chi B.B. Manufacturing of representative axial stress corrosion cracks in tube specimens for eddy current testing / Bum Bahn Chi, S. Bakhtiari, J. Park, et al. // Nuclear Engineering and Design. – 2013. – Т. 256. – С. 38–44.
10. Li P. Sensitivity boost of rosette eddy current array sensor for quantitative monitoring crack / Peiyuan Li, Li Cheng, Yuting He, et al. // Sensors and Actuators A: Physical. – 2016. – Т. 246. – С. 129–139.
11. Nafiah F. Quantitative evaluation of crack depths and angles for pulsed eddy current non-destructive testing / F. Nafiah, A. Sophian, M.R. Khan, et al. // NDT and E International. – 2019. – Т. 102. – С. 180–188. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.11.019>.
12. Li P. A novel frequency-band-selecting pulsed eddy current testing method for the detection of a certain depth range of defects / Peng Li, Shejuan Xie, Kedian Wang, et al. // NDT and E International. – 2019. – Т. 107. – № 102154.
13. Xie S. Features extraction and discussion in a novel frequency-band-selecting pulsed eddy current testing method for the detection of a certain depth range of defects / S Xie, L. Zhang, Y. Zhao, et al. // NDT and E International. – 2020. – Т. 111. – № 102211. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.102211>.
14. Арабей А.Б. Влияние особенностей технологии производства труб на стойкость к коррозионному растрескиванию под напряжением / А.Б. Арабей, Т.С. Есиев, И.В. Ряховских и др. // Газовая промышленность. – 2012. – № 2 (673). – С. 52–54.

## Assessment of dimensions for stress-corrosion cracks during technical diagnosis of gas pipelines

I.V. Ryakhovskikh<sup>1\*</sup>, A.A. Kaverin<sup>1</sup>, I.G. Petukhov<sup>1</sup>, A.V. Lipovik<sup>1</sup>, A.A. Selivanov<sup>2</sup>, A.V. Sakhon<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Gazprom VNIIGAZ LLC, Bld. 1, Estate 15, Proyektiruemyy proezd no. 5537, Razvilka village, Leninskiy district, Moscow Region, 142717, Russian Federation

<sup>2</sup> Gazprom PJSC, BOX 1255, St. Petersburg, 190900, Russian Federation

\* E-mail: I\_Ryakhovskikh@vniigaz.gazprom.ru

**Abstract.** This article highlights experimental examination of the instruments for nondestructive testing (NDT) in respect to their applicability for assessing dimensions of the stress-corrosion cracks families located upon the tubes incorporated into working gas mains. The tested tubes were distinct in sizes, properties and chemical compositions. Authors present the derived dependencies between the indications of the supersonic, eddy current, or electropotential flow detectors and the factual sizes of cracks. Authenticity of study results and conclusions were testified using standard methods of optical electron microscopy and X-ray tomography during verification

of cracks dimensions in the points where the NDT instruments showed maximal indications. There are also practical recommendations on the application of the NDT instruments for assessing depths of stress-corrosion flaws and possibility to use this technology for categorization and rejection of tubes being parts of the trunk gas pipelines.

**Keywords:** trunk gas pipeline, stress-corrosion defects, technical diagnostics, nondestructive testing.

### References

1. FILATOV, A.A., I.I. VELIYULIN, A.D. LAZAREV, et al. Features of technology of overhaul repair of gas pipelines at the present stage [Osobennosti tekhnologii kapitalnogo remonta gazoprovodov na sovremennom etape]. *Gazovaya Promyshlennost*, 2017, no. 12, pp. 90–94. ISSN 0016-5581. (Russ.).
2. KANTYUKOV, R.A., N.M. YAKUPOV, I.M. TAMEYEV, et al. Devices for remedying local defects [Ustroystva dlya remonta lokalnykh defektov]. *Gazovaya Promyshlennost*, 2015, no. 2, pp. 60–63. ISSN 0016-5581. (Russ.).
3. ALIMOV, S.V., A.B. ARABEY, I.V. RYAKHOVSKIKH, et al. Concept for diagnosing and repairing gas mains in regions prone to stress corrosion [Kontseptsiya diagnostirovaniya i remonta magistralnykh gazoprovodov v regionakh s vysokoy predraspolozhennostyu k stress-korrosii]. *Gazovaya Promyshlennost*, 2015, no. S2 (724), pp. 10–15. ISSN 0016-5581. (Russ.).
4. ARABEY, A.B., I.V. RYAKHOVSKIKH, A.V. MELNIKOVA, et al. Technique for repairing trunk gas pipelines subject to stress corrosion [Tekhnologiya remonta magistralnykh gazoprovodov, podverzhennykh korrozionnomy rastreskivaniyu pod napryazheniyem]. *Nauka i Tekhnika v Gazovoy Promyshlennosti*, 2017, no. 3(71), pp. 3–16. ISSN 2070-6820. (Russ.).
5. GAZPROM VNIIGAZ LLC. *Method of rejection and repair of underground pipelines* [Sposob otrakovki i remonta trub podzemnykh truboprovodov]. Inventors: S.V. NEFEDOV, I.V. RYAKHOVSKIKH, R.I. BOGDANOV, et al. Appl.: 15 June 2016, no. 2016123908; publ.: 21 December 2017. RU 2639599 C2. (Russ.).
6. SHKATOV, P.N., I.O. LISITSINA. Study into the feasibility of electropotential measurements of a skin crack within an alligatoring zone [Issledovaniye vozmozhnosti izmereniya elektropotentsialnym metodom glubiny poverkhnostnoy treshchiny v zone setki treshchin]. *Pribory*, 2016, no. 5, pp. 14–22. ISSN 2071-7865. (Russ.).
7. SHKATOV, P.N., I.O. LISITSINA. Study into the feasibility to decrease the effect of a nearby crack upon an eddy-current signal of an attachable eddy-current converter [Issledovaniye vozmozhnosti oslableniya vliyaniya sosedney treshchiny na vikhretokovyy signal nakladnogo vikhretokovogo preobrazovatelya]. *Fundamentalnyye i Prikladnyye Problemy Tekhniki i Tekhnologii*, 2016, no. 5 (319), pp. 130–135. ISSN 2073-7408. (Russ.).
8. JANOUSEK, L., M. SMETANA, M. ALMAN. Decline in ambiguity of partially conductive cracks' depth evaluation from eddy current testing signals. *Int. J. Appl. Electromagnet. Mech.*, 2012, vol. 39, pp. 329–334. ISSN 0021-8928. (Russ.).
9. CHI, B.B., S. BAKHTIARI, J. PARK, et al. Manufacturing of representative axial stress corrosion cracks in tube specimens for eddy current testing. *Nuclear Engineering and Design*, 2013, vol. 256, pp. 38–44. ISSN 0029-5493.
10. LI, P., L. CHENG, Y. HE, et al. Sensitivity boost of rosette eddy current array sensor for quantitative monitoring crack. *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2016. – T. 246. – C. 129–139. ISSN 0924-4247.
11. NAFIAH, F., A. SOPHIAN, M.R. KHAN, et al. Quantitative evaluation of crack depths and angles for pulsed eddy current non-destructive testing. *NDT and E International*, 2019, vol. 102, pp. 180–188. ISSN 0963-8695. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.11.019>.
12. LI, P., S. XIE, K. WANG, et al. A novel frequency-band-selecting pulsed eddy current testing method for the detection of a certain depth range of defects. *NDT and E International*, 2019, vol. 107, no. 102154. ISSN 0963-8695.
13. XIE, S., L. ZHANG, Y. ZHAO, et al. Features extraction and discussion in a novel frequency-band-selecting pulsed eddy current testing method for the detection of a certain depth range of defects. *NDT and E International*, 2020, vol. 111, no. 102211. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.102211>.
14. ARABEY, A.B., T.S. YESIYEV, I.V. RYAKHOVSKIKH, et al. Effect of tube production technologies upon their stress-corrosion resistance [Vliyaniye osobennostey tekhnologii proizvodstva trub na stoikost k korrozionnomy rastreskivaniyu pod napryazheniyem]. *Gazovaya Promyshlennost*, 2012, no. 2 (673), pp. 52–54. ISSN 0016-5581. (Russ.).