

РАЗРАБОТКА НОРМ ДОПУСТИМОСТИ СТРЕСС-КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ТРУБ В СОСТАВЕ ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

А.В. Мельникова, И.В. Ряховских

Лаборатория исследования процессов коррозионного
растрескивания под напряжением ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

- Действующие нормативные документы запрещают эксплуатацию газопровода с выявленными повреждениями типа КРН независимо от их геометрических размеров
- Внутритрубная диагностика не обеспечивает с приемлемой достоверностью выявление трещин, глубиной менее 15% от номинальной толщины стенки трубы, поэтому большинство дефектов типа КРН такой глубины остаются в газопроводе после плановой внутритрубной диагностики
- В настоящее время при капитальном ремонте участка газопровода с выявленными повреждениями типа КРН независимо от их геометрических параметров требуется проводить полную замену труб, что приводит к значительному увеличению затрат при капитальном ремонте действующих магистральных газопроводов
- Однако, многие исследователи сходятся во мнении что стресс-коррозионные повреждения на ранней стадии своего развития (глубиной менее 15% от толщины стенки трубы) при определенных условиях могут дальше не развиваться, что делает актуальной разработку научно-обоснованных норм допустимых дефектов стресс-коррозионного происхождения при условии совершенствования технологий ремонта

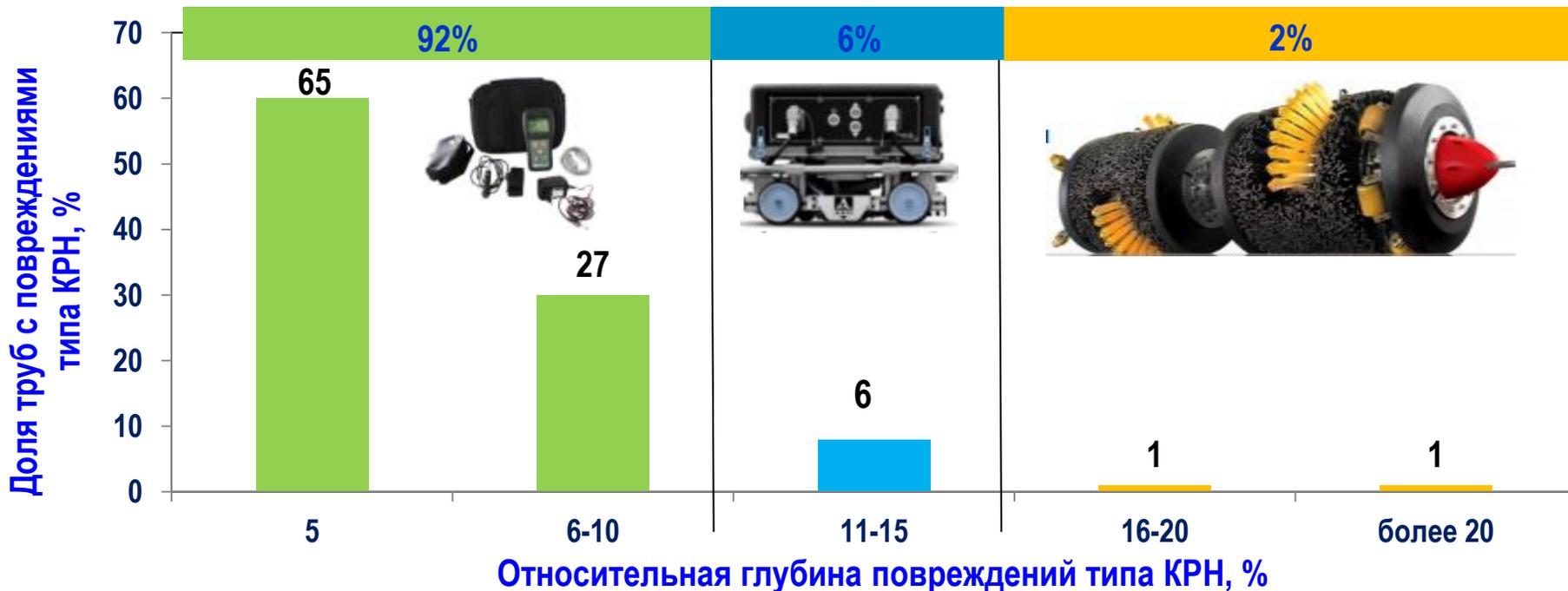
Целью работы является разработка научно-обоснованных норм допустимости стресс-коррозионных повреждений труб, в составе длительно эксплуатируемых МГ с учетом результатов комплексных исследований влияния стресс-коррозионных повреждений на циклический ресурс и статическую прочность труб

Задачи работы

- разработка критериев классификации повреждений КРН труб по степени опасности с учетом их формы, ориентации и местоположения относительно сварного шва, механических свойств стали;
- проведение циклических коррозионно-механические лабораторных испытаний модельных образцов и стендовых испытаний труб на стойкость против КРН;
- экспериментальное исследование влияния органического ингибитора коррозии в модельном грунтовом электролите на стойкость трубной стали против КРН;
- анализ результатов опытно-промышленной эксплуатации труб с повреждениями типа КРН в составе действующих участков МГ;
- разработка предложений по нормированию стресс-коррозионных повреждений труб, в составе длительно эксплуатируемых магистральных газопроводов;
- разработка рекомендаций по совершенствованию технологии ремонта МГ подверженных стресс-коррозии в трассовых условиях.

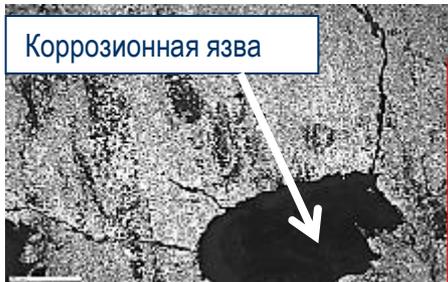
- Впервые экспериментально установлено отсутствие усталостного развития стресс-коррозионных повреждений глубиной менее 10% от толщины стенки трубы при отсутствии доступа коррозионно-активной среды к их поверхности, по результатам стендовых и лабораторных испытаний стальных труб.
- Экспериментально подтверждена эффективность применения добавки органического ингибитора коррозии трубных сталей в модельном грунтовом электролите для повышения стойкости металла труб против образования и развития коррозионно-механических трещин при нагрузках, моделирующих работу МГ.
- Впервые разработаны и научно обоснованы требования к нормированию геометрических параметров стресс-коррозионных повреждений с учетом расчетной оценки прочности труб.
- Полученные результаты позволили разработать рекомендации по совершенствованию технологии ремонта МГ в трассовых условиях, подверженных КРН.

Стресс-коррозионные повреждения глубиной до **0,25** от толщины стенки трубы никогда не становились причиной разрушения МГ, на их долю приходится до **99%** от всех выявленных при ремонте МГ повреждений труб



Основные стадии роста стресс-коррозионных повреждений на поверхности стальных труб

Коррозионная язва



I - Образование микротрещин из локальных поверхностных дефектов труб



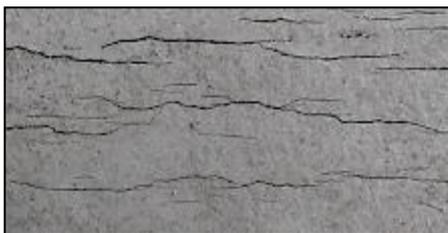
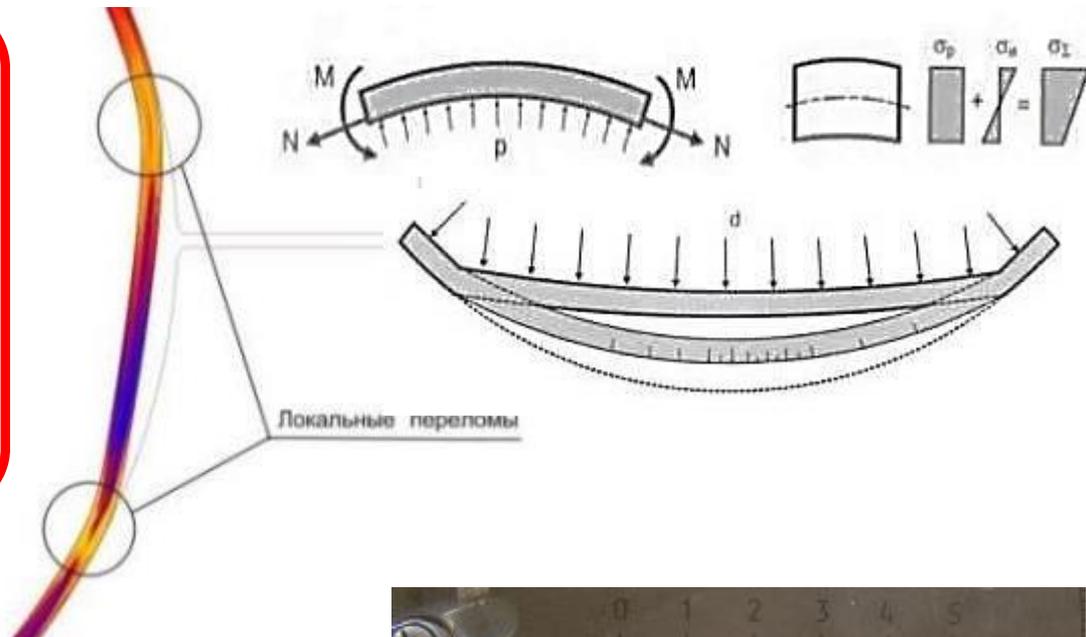
II - Монотонный рост отдельных неориентированных трещин в колонии



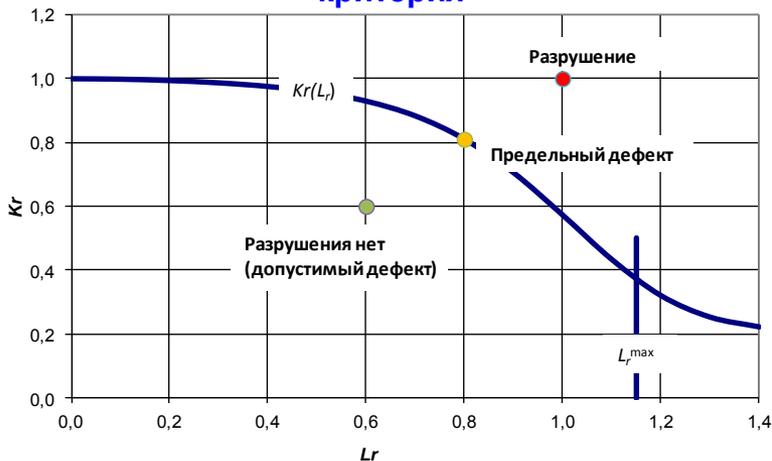
III - Слияние отдельных трещин в магистральные и их выравнивание в колонии



IV - Разрушение аварийной трещины (излом)



Предельная кривая двухпараметрического критерия



$$L_r \leq L_r^{\max} \Rightarrow K_r = (1 - 0,14L_r^2) [0,3 + 0,7 \exp(-0,65L_r^6)]$$

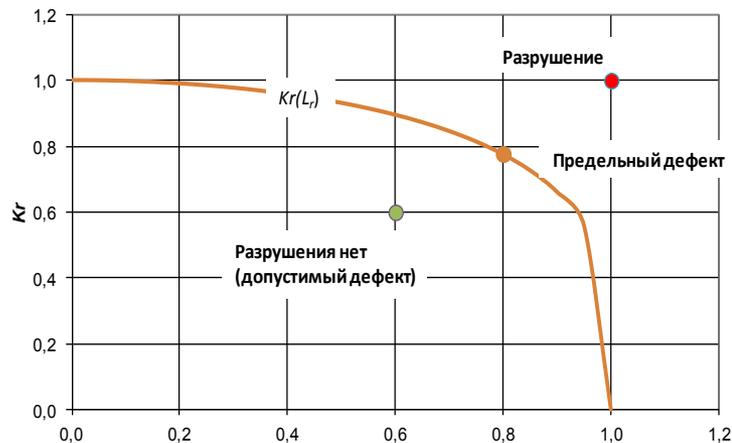
$$L_r > L_r^{\max} \Rightarrow K_r = 0$$

Формулы расчета поверхностной трещины

$$K_I = \left[\sigma_m + \sigma_b H \left(\theta, \frac{h}{c}, \frac{h}{t} \right) \right] \times \frac{\sqrt{\pi h}}{\Phi \left(\frac{h}{c} \right)} F \left(\frac{h}{c}, \frac{h}{t} \right) g \left(\theta, \frac{h}{t} \right) f \left(\theta, \frac{h}{c} \right),$$

$$L_r = \frac{1}{\sigma_Y} \left(M_\varphi \sigma_{m\varphi} + \frac{2\sigma_{b\varphi}}{3(1-\xi)^2} \right),$$

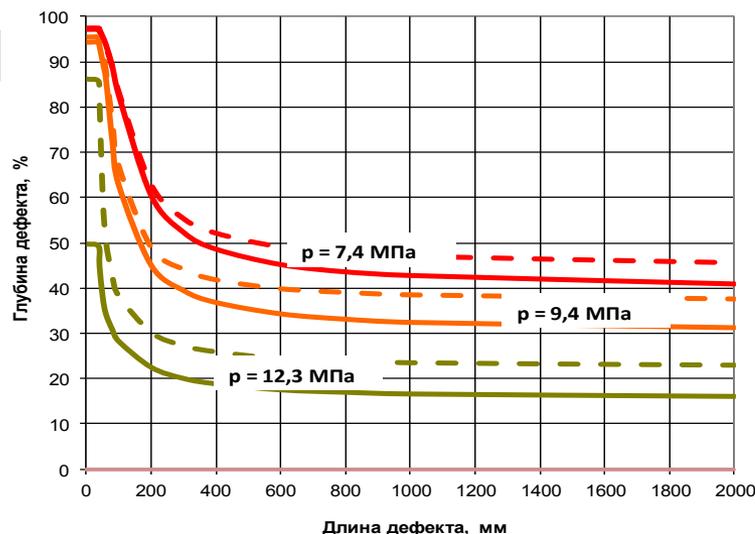
Альтернативный вариант предельной кривой, основанный на понятии предела трещиностойкости



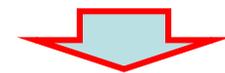
$$\left(\frac{K_I}{K_{IC}} \right)^4 + \left(\frac{\sigma_{netto}}{\sigma_B} \right)^2 = 1,$$

$$K_r = K_I / K_{IC}$$

$$L_r = \sigma_{netto} / \sigma_B$$

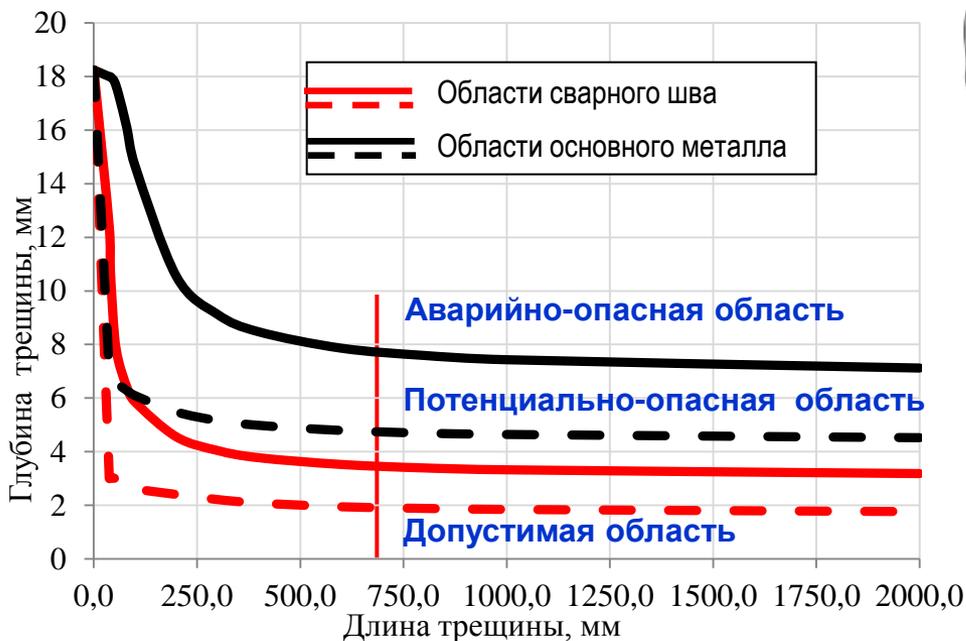


Сравнительный анализ двух методов расчета



Выбран более консервативный метод расчета (R6)

Области допустимых, потенциально-опасных и аварийно-опасных значений размеров трещин КРН для основного металла трубы и сварного шва $D=1420$ мм, $t_{ст}=18,7$ мм, $\sigma_T=461$ МПа, $P_{раб}=7,5$ МПа



Схематизация одиночных трещин и колонии трещин

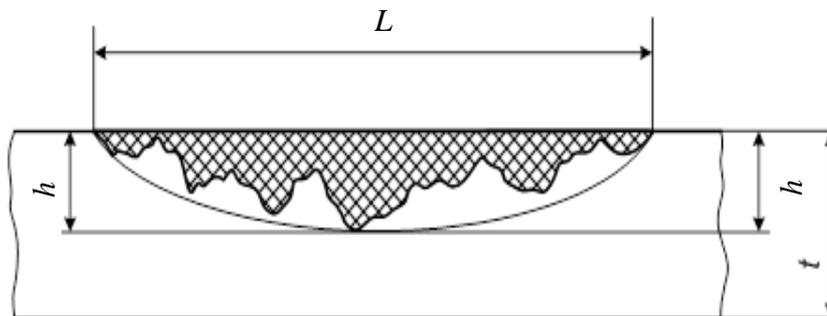
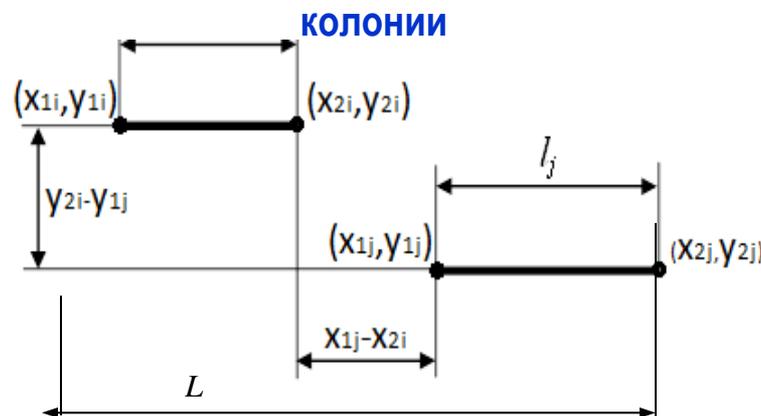


Схема учета взаимодействующих трещин в колонии

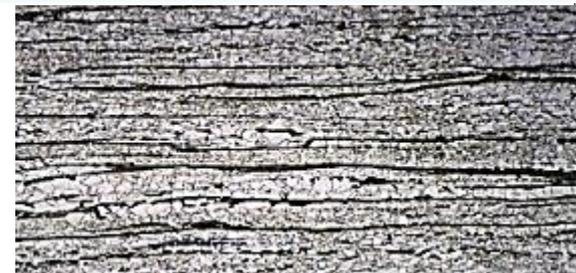
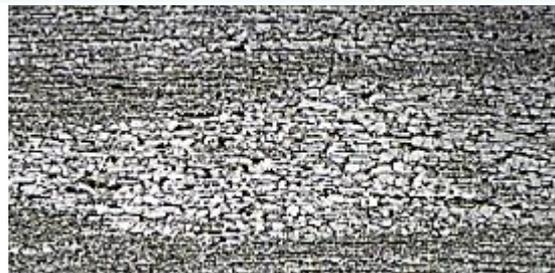


Для подтверждения выполненной расчетной классификации stress-коррозионных повреждений был выполнен комплекс экспериментальных исследований



ТУ 20/28/40/48/56-79

№ трубы	Механические свойства основного материала трубы			
	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Ударная вязкость KCV, (Дж/см ²)	Относительное удлинение, δ
ТУ*	588	461	78,5	20
№1	593	499	220	22
№2	591	483	228	23
№3	594	497	207	23
№4	594	489	217	24



Стендовые гидравлические испытания труб

Для подтверждения анализа возможности развития повреждений КРН на воздухе и при воздействии модельного раствора при длительных циклических и статических режимах нагружения были проведены стендовые испытания

ОБЩИЙ ВИД СТЕНДА

- Система АЭ А-Line 32 D
- Манометр

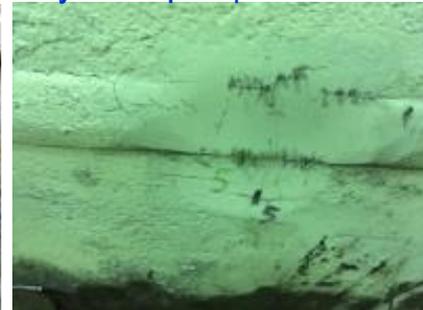
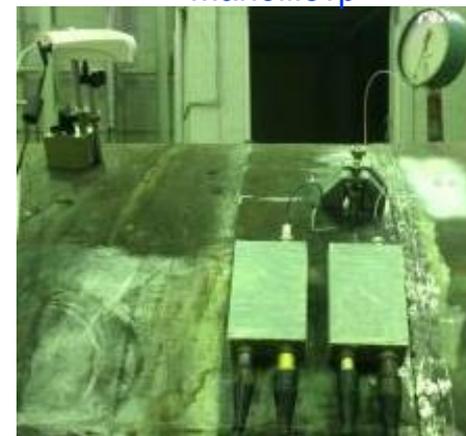


Идентификация повреждений

Коррозионные ячейки с NS4

Определение глубин трещин в ОШЗ

Контрольный дефект в ОМТ



Раствор NS4: 1,64 мМ KCl + 5,75 мМ NaHCO₃ + 1,23 мМ CaCl₂ + 0,74 мМ MgSO₄

Выбор режимов испытаний труб с дефектами КРН на циклический ресурс и статическую прочность

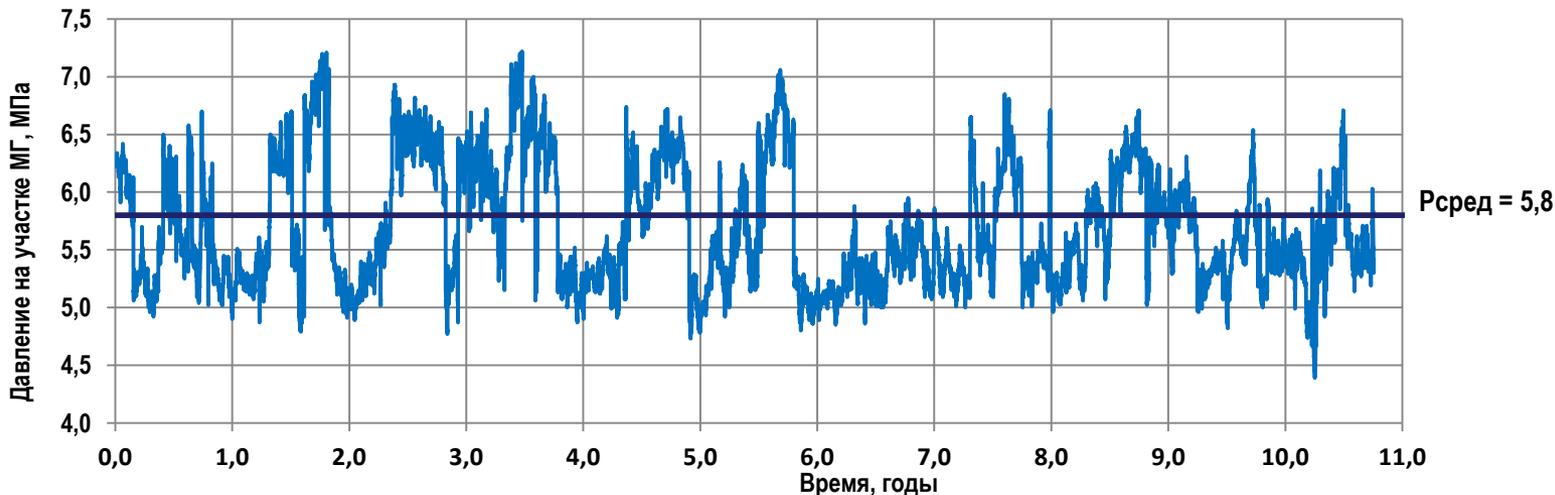


График циклического нагружения плиты

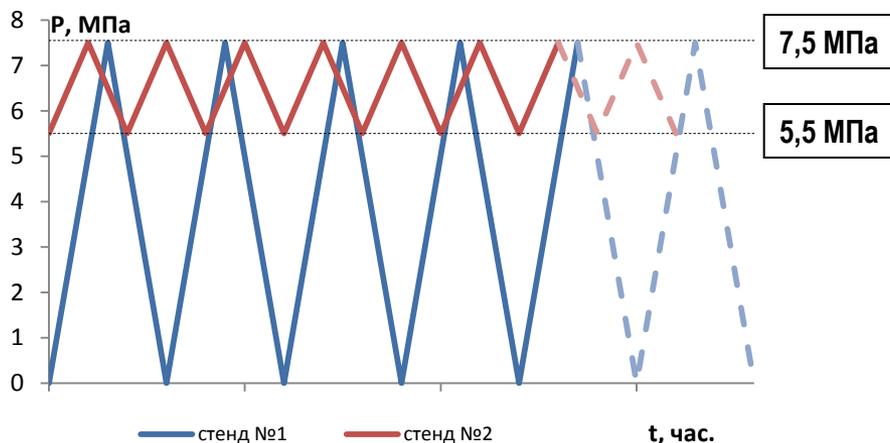
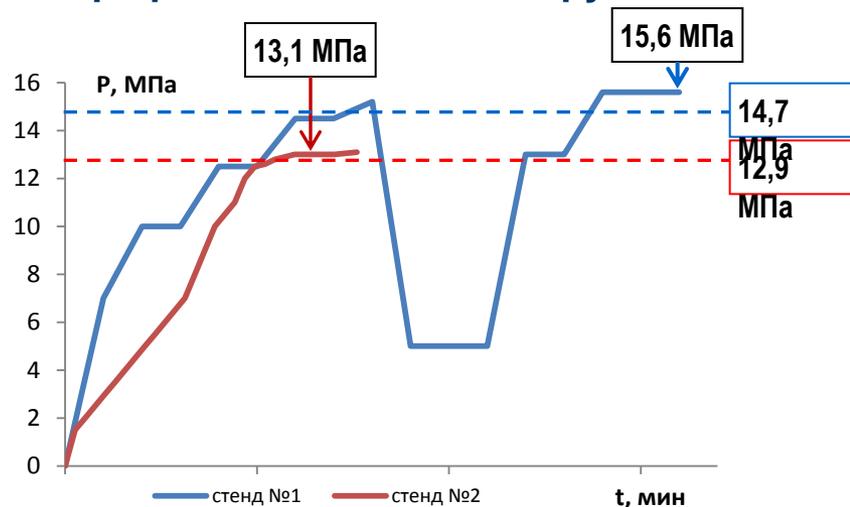


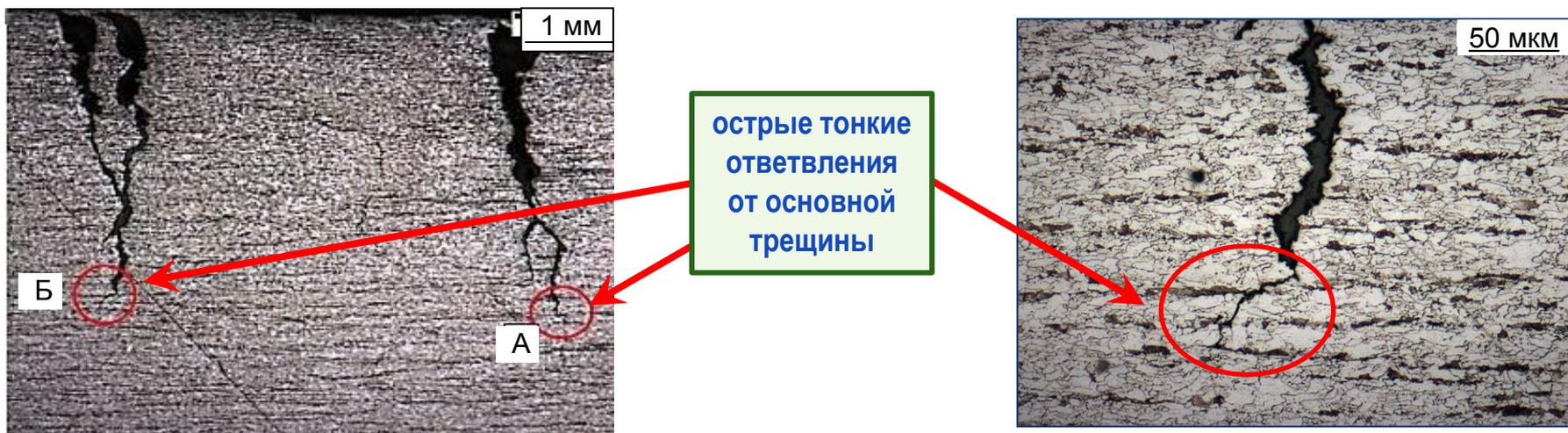
График статического нагружения



Металлографические исследования трещин после испытаний без среды



Металлографические исследования трещин после испытаний в коррозионной среде

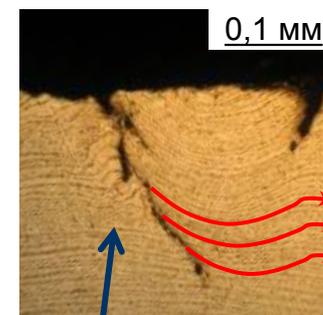


№	Характеристика дефекта	Макс. увеличение глубины дефекта после статических испытаний
1	Дефекты КРН глубиной до 2,0 мм	0 мм
2	Дефекты КРН глубиной около 2,0-3,0 мм	0,2 мм
3	Дефект КРН в задире общей глубиной 7,0 мм	0,83 мм
4	Поверхностный пропил глубиной 3,0 мм и длиной 300 мм	0,3 мм

№ 2

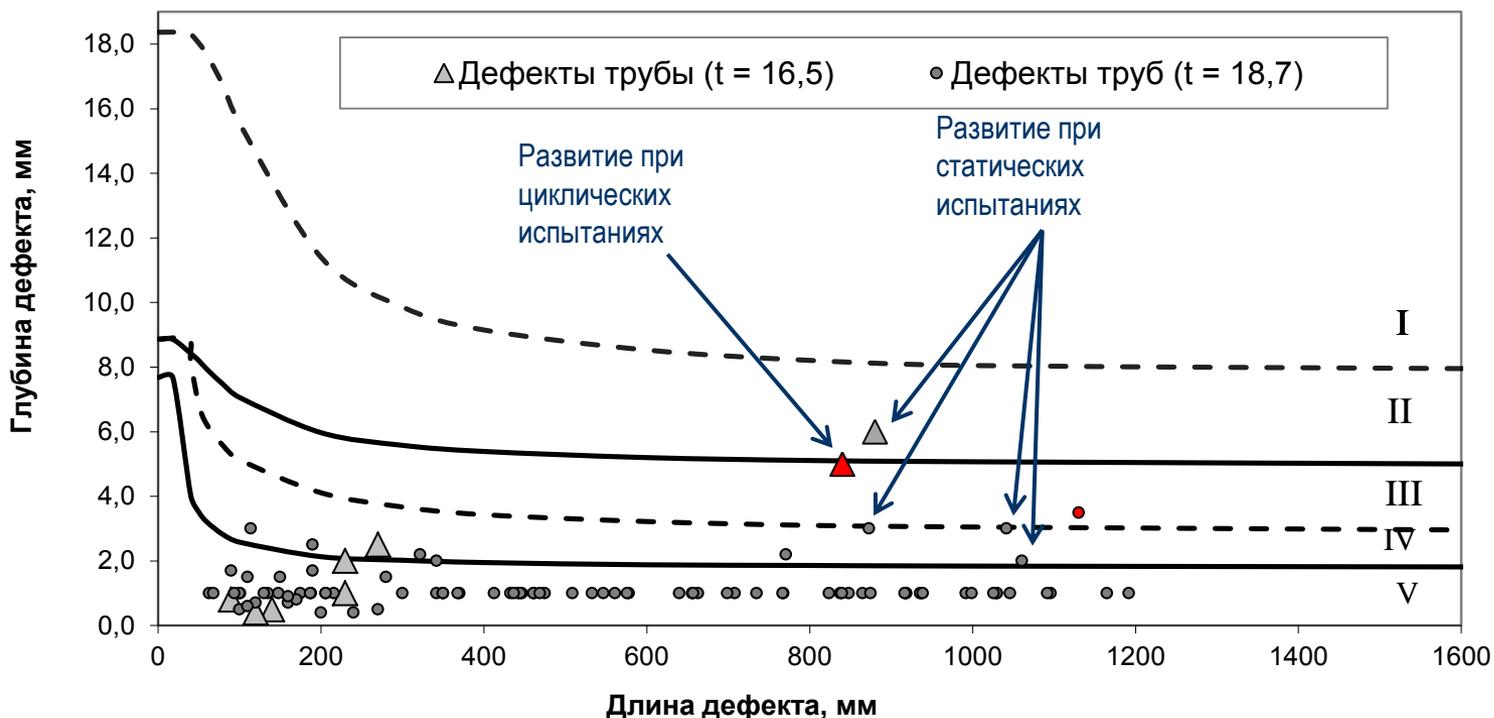


№ 4



Следы пластической деформации

Прирост дефектов глубиной более 2,0 мм зафиксирован при давлении, в 2 раза превышающем рабочее ($\sigma_{исп} > 0,9\sigma_{0,2}$)

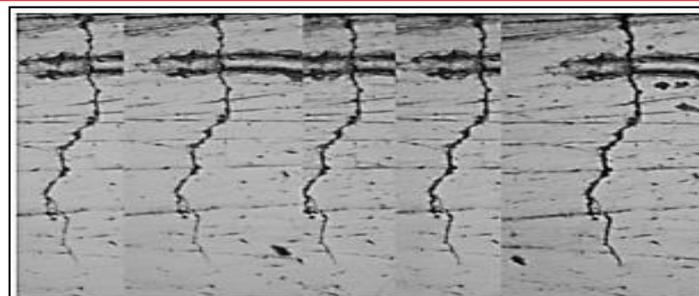


- I – область аварийно-опасных повреждений для всех исследованных труб
- II - область аварийно-опасных повреждений труб с $t = 16,5$ мм и потенциально-опасных повреждений труб с $t = 18,7$ мм
- III - область потенциально-опасных повреждений для всех исследованных труб;
- IV - область неопасных повреждений труб с $t = 18,7$ мм и область потенциально-опасных повреждений труб с $t = 16,5$ мм
- V – область неопасных повреждений для всех исследованных труб

Красным цветом обозначены повреждения, к которым подводился модельный электролит

Для подтверждения отсутствия усталостного развития повреждений КРН на воздухе при длительных, превышающих проектные, циклических режимах нагружения были проведены лабораторные исследования

В условиях циклического нагружения на воздухе дефекты КРН глубиной менее 10% толщины стенки трубы не развиваются!



0 1000 3000 5000 10000
количество циклов нагружения

$\% \cdot \sigma_T$	$\% \cdot \sigma_T$, МПа	ЦИКЛЫ
0 - 0,5 σ_T	230,5	1000
0 - 0,6 σ_T	276,6	1000
0 - 0,7 σ_T	322,7	1000
0 - 0,8 σ_T	368,8	2000
0 - 0,9 σ_T	414,9	5000

Лабораторные испытания образцов с пропилом в среде NS4, с добавкой ИК и на воздухе (патент RU 2582911)

Дополнительно было исследовано влияния органического ингибитора коррозии в модельном грунтовом электролите на стойкость трубной стали против КРН на лабораторных образцах с надрезом

Циклическое нагружение –
до 40 000 циклов
 $0,7\sigma_T - 0,8\sigma_T$ МПа, частота 1 Гц



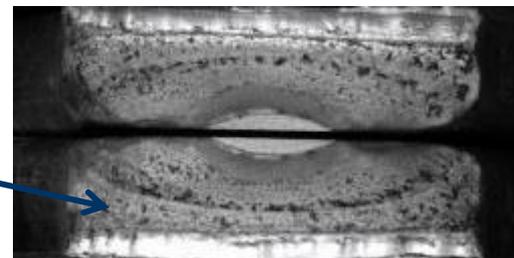
Раствор NS4:

1,64 мМ KCl + 5,75 мМ NaHCO₃ + 1,23 мМ CaCl₂ + 0,74 мМ MgSO₄

Органический ингибитор коррозии

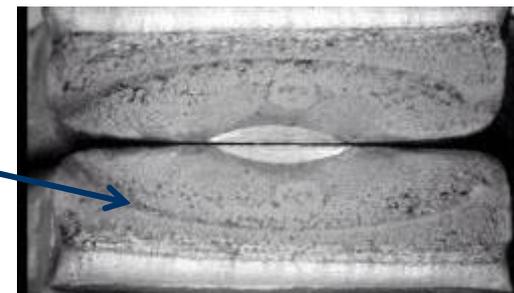
- (1 г/л), состав: продукты реакции жирных аминов с различными смесями высших ненасыщенных карбоновых кислот

Область развития
коррозионно-
механической
трещины



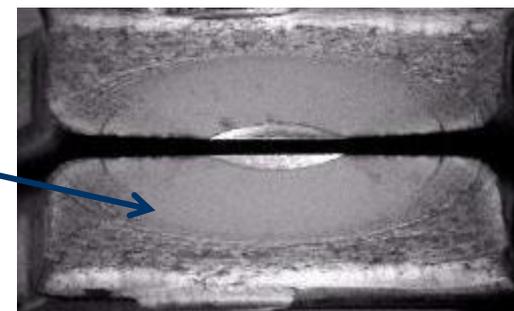
Излом после
испытаний в
среде NS4

Исходный
пропил в
образце



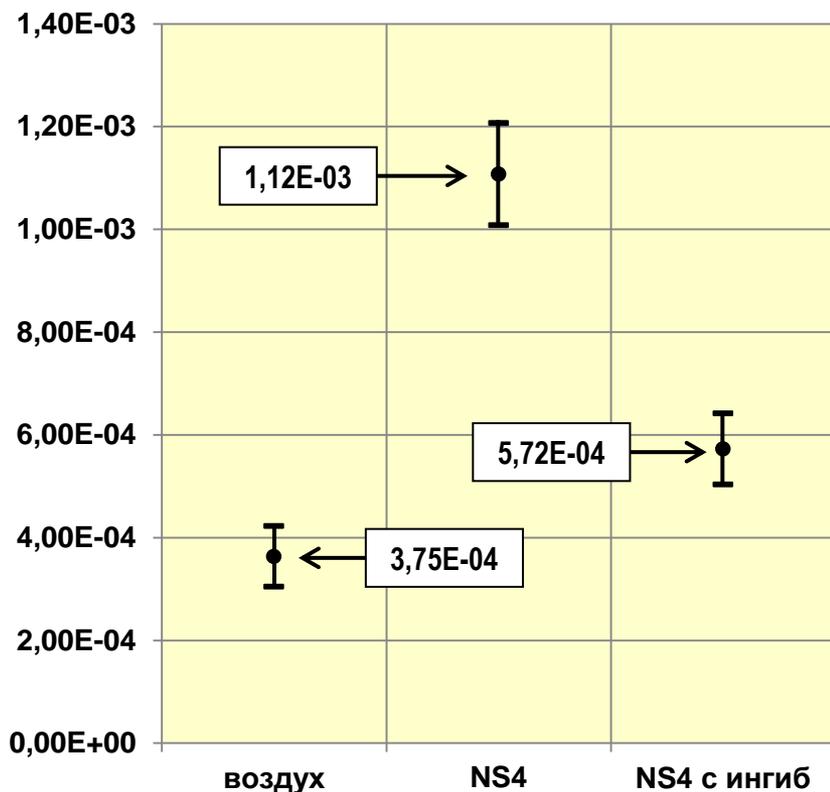
Излом после
испытаний в
среде NS4 с
ингибитором

Область
развития
механической
трещины

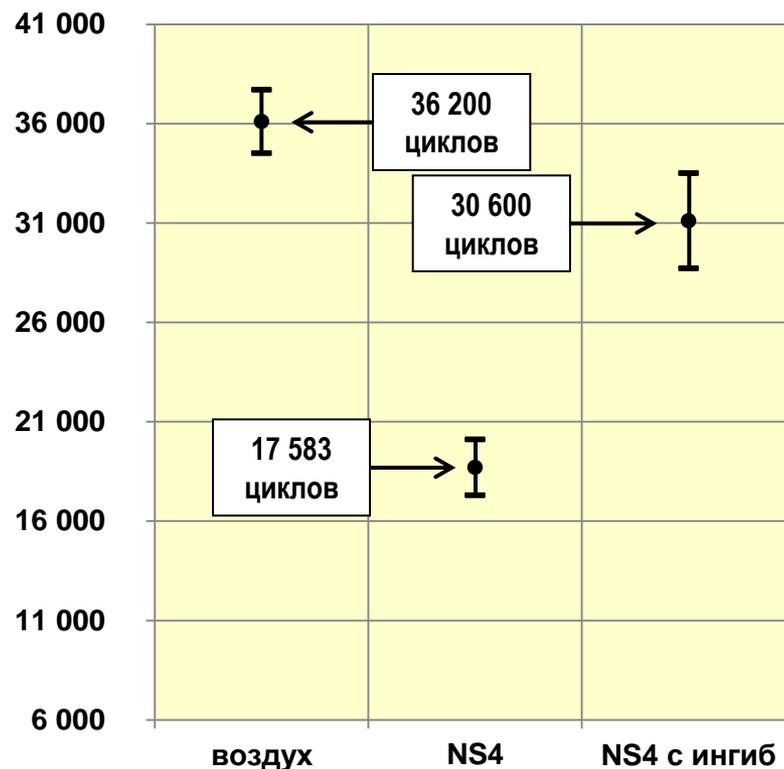


Излом после
испытаний на
воздухе

Скорость роста дефекта V , мм/цикл

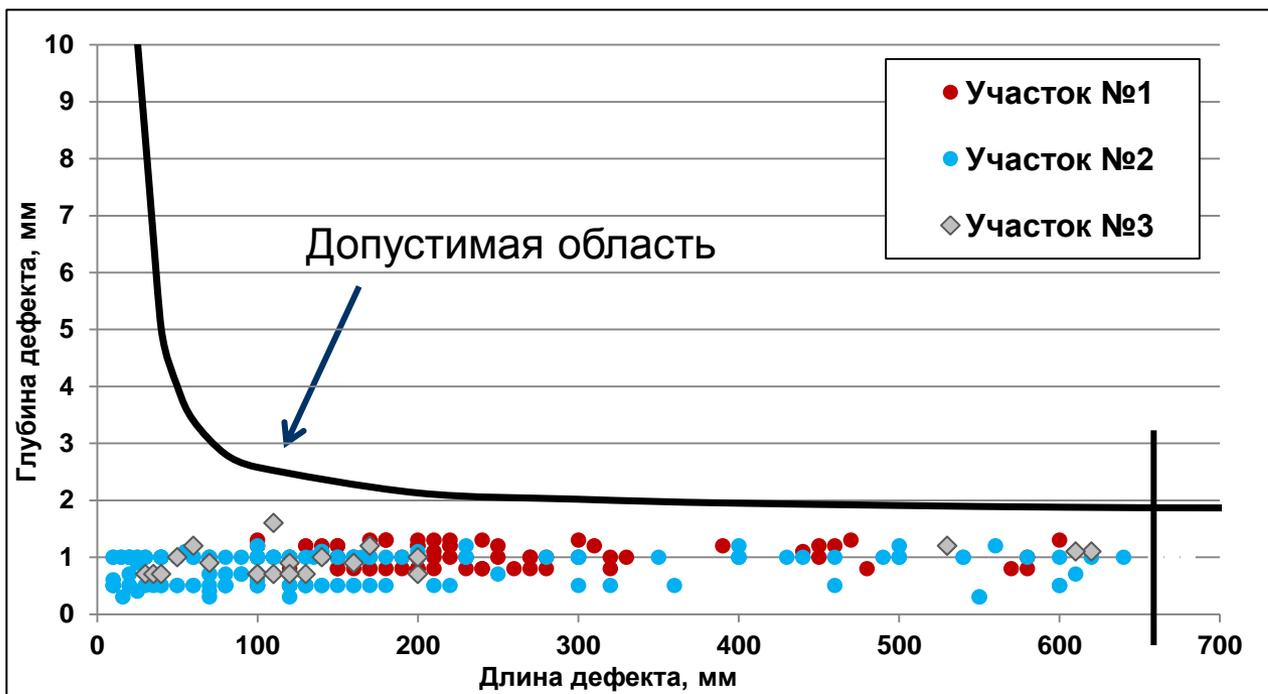


Время до зарождения трещин T , цикл



Для оценки возможности оставления стресс-коррозионных повреждений с максимальной оценочной глубиной не более 10% от толщины стенки трубы были проведены исследования на участках действующих трубопроводов

Диаграмма допустимых размеров стресс-коррозионных повреждений для труб 1420 x 16,5 мм (X70)



3 тестовых участка в составе действующих МГ ПАО «Газпром», расположенных в различных регионах России, со сроками эксплуатации **более 30 лет**

Оставлено для дальнейших исследований **175 зон** стресс-коррозионных повреждений с максимальной оценочной глубиной не более **1,8 мм** (10% от толщины стенки трубы)

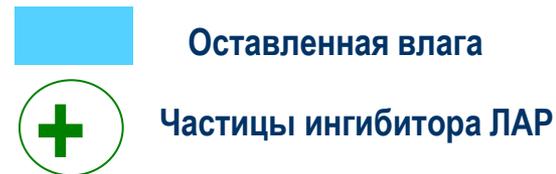
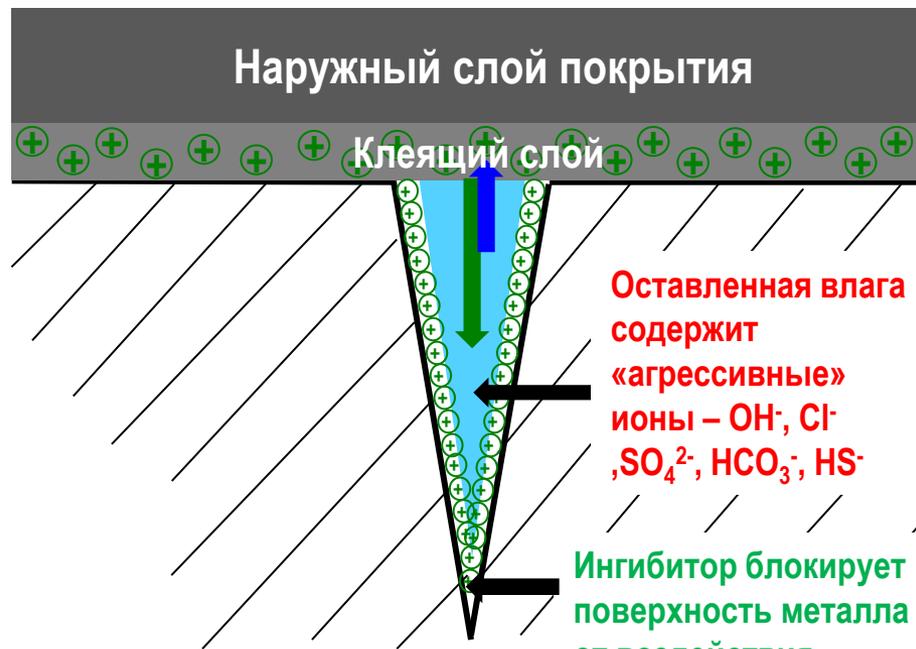
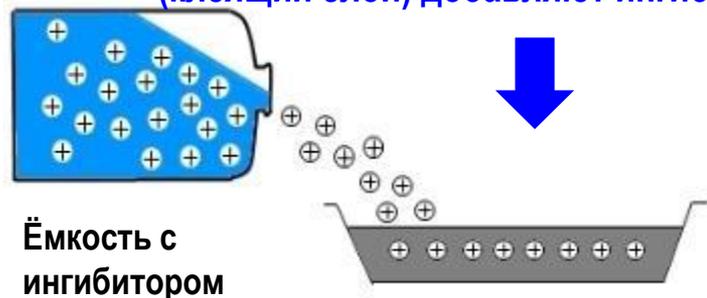
Принцип действия ингибитора после переизоляции МГ при оставлении среды в дефекте КРН



Процесс нанесения
изоляционного
покрытия
с помощью машины
(РИМ 1420)

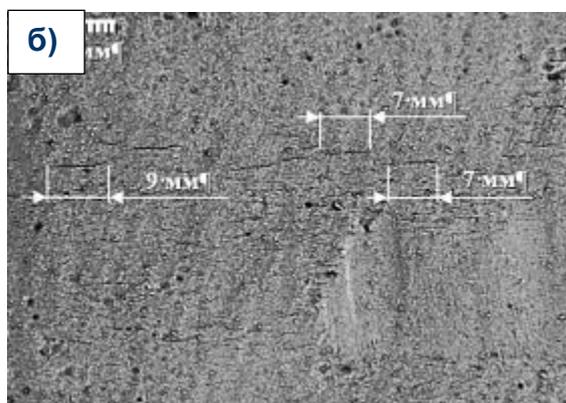


В процессе изготовления в праймер
(клеящий слой) добавляют ингибитор



До начала испытаний (а)

После окончания (б)



Критерии:

l_0 – длина КЗ КРН до испытаний;

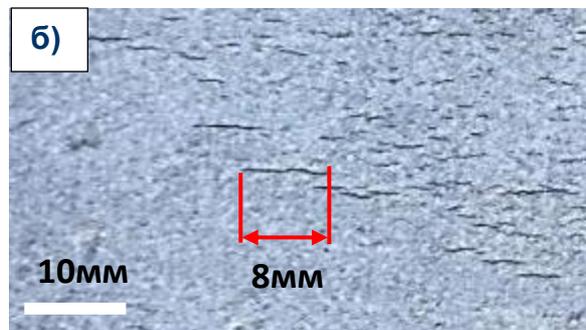
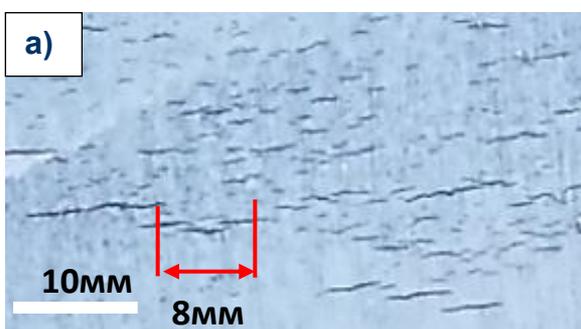
l_k – длина КЗ КРН после испытаний;

l_{0max} – длина «лидерной» трещины в колонии КРН до испытаний;

l_{kmax} – длина «лидерной» трещины в колонии КРН после испытаний;

ρ_0 – плотность трещин в контрольной зоне КРН до испытаний;

ρ_k – плотность трещин в контрольной зоне КРН после испытаний.



**ПРИЗНАКОВ РАЗВИТИЯ НЕ УСТАНОВЛЕНО, ЧТО СВИДЕТЕЛЬСТВУЕТ
О КОНСЕРВАЦИИ ПРОЦЕССА РАСТРЕСКИВАНИЯ СТАЛИ**

Анализ существующих требований

Виды повреждений	ГОСТ 31447-2012 Трубы стальные сварные для магистральных газопроводов, нефтепроводов и нефтепродуктопроводов	СНиП 2.05.06-85* (СП 36.13330.2012) Магистральные трубопроводы	СНиП III-42-80* (СП 86.13330.2014) Магистральные трубопроводы	ГОСТ ISO 3183-2015 Трубы стальные для трубопроводов нефтяной и газовой промышленности
Трещина	не допускаются	не допускаются	не допускаются	не допускаются
Дефект коррозионного растрескивания под напряжением	<u>не регламентированы</u>	<u>не регламентированы</u>	<u>не регламентированы</u>	<u>не регламентированы</u>

Допустимая глубина повреждений типа КРН сварных труб из сталей контролируемой прокатки

ТУ на трубу	Диаметр труб, мм	Класс прочности (марка стали)	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Рабочее давление, МПа	Толщина стенки, мм	Макс. глубина (основной металл)		Макс. глубина (ОШЗ)	
							мм	%	мм	%
ТУ 14-3-995-81	1420	X70	589	441	7,4	15,7	3,0	19	1,5	10
ТУ 14-3-109-73	1220	17Г1С	510	363	5,4	14,6	2,9	20	1,4	10
	1220	14Г2САФ	559	392	5,4	15,0	3,0	20	1,5	10
ТУ 14-3-311-74	1220	17Г2СФ	588	412	5,4	10,5	2,1	20	1,0	10
ТУ 14-3-602-77	1220	17Г1С-У	510	363	5,4	14,0	2,8	20	1,4	10
ТУ 14-3-741-78	1420	09Г2ФБ	549	422	7,4	17,5	3,3	19	1,7	10
ТУ 48-56-77	1420	X70	588	461	7,4	19,5	3,3	17	1,9	10
ТУ 20-28-40-48-79	1020	X70	588	461	7,4	16,0	2,9	18	1,5	10
ТУ 14-3-985-87	1420	X70	588	441	7,4	18,7	3,3	18	1,8	10
ТУ 56-72-73	1420	X70	588	412	7,4	16,5	3,3	20	1,6	10

Перечень труб склонных к КРН определен в соответствии с действующей нормативной документацией СТО Газпром 2-2.3-760-2013 «Инструкция по идентификации КРН металла труб как причины отказов магистральных газопроводов»

Потребность в капитальном ремонте МГ в 2018–2022 гг.

Показатели	2018	2019	2020	2021	2022	Итог
Общая протяженность КР, км	1617,5	1617,5	1617,5	1977,5	1977,5	8807,5
Прогноз замены труб, км	171	171	171	209	209	931
Общая протяженность КР в регионах с высокой предрасположенностью к КРН, км	1180	1180	1180	1443	1443	6426

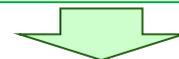
Усредненные данные о повреждениях КРН, выявляемых в процессе ТД МГ при КР

Показатели	Диаметр труб, мм		
	Ø1020	Ø1220	Ø1420
Средняя толщина стенки трубы, мм	17,33	14,02	16,67
Общая плотность повреждений КРН, ед./км	44,36	56,36	36,44
Плотность повреждений КРН глубиной менее 0,1 от стенки трубы, ед./км	37,39	36,08	31,28
Площадь повреждений КРН глубиной менее 0,1 от стенки трубы, м ² /км	64,52	14,34	164,63

Прогноз замены труб с использованием усовершенствованной технологии ремонта

→ **54,2 км**

Если $h \leq 0,1\delta$



Ремонт труб с повреждениями КРН в трассовых условиях методом переизоляции с применением ингибирующих КРН композиций

Если $0,1\delta < h \leq 0,15\delta$



Ремонт труб с КРН в базовых или заводских условиях с последующим нанесением изоляционного покрытия

Если $h > 0,15\delta$



Рекомендуется ремонт путем замены труб с КРН на новые трубы с заводским покрытием



9.3 В зависимости от степени опасности дефектов КРН, выявленных в процессе технического диагностирования в шурфах ТТ КС, принимают одно из следующих решений:

- ремонт труб со stress-коррозионными дефектами;
- восстановление АЗП дефектных труб и организация наблюдения за оставленными в МГ условно допустимыми stress-коррозионными дефектами.

9.6 Восстановление АЗП дефектных труб согласно 9.5 рекомендуется выполнять с применением ингибирующих композиций для предотвращения КРН в соответствии с действующей документацией ОАО «Газпром».



Рекомендации разработаны с целью определения процедуры оценки прочности ТТ КС ПАО «Газпром» со stress-коррозионными дефектами и принятия решения по их устранению в процессе диагностических работ.



Стандарт распространяется на методы экспериментального определения сопротивления сталей и сварных соединений трубопроводов, аппаратов и нефтегазового оборудования КРН

Изобретение относится к коррозионным испытаниям, а именно к способам испытания высокопрочных сталей на склонность к КРН

1. Исследованы основные стадии роста трещин на поверхности стальных труб по механизму КРН в условиях эксплуатации МГ, а также факторы, определяющие возможность остановки роста неглубоких повреждений.
2. Результаты проведенных расчетов стресс-коррозионных повреждений по методике оценки прочности труб с повреждениями КРН позволили классифицировать стресс-коррозионные повреждения по степени опасности в отношении эксплуатационной надежности МГ и построить диаграммы допустимых, предельно-допустимых и аварийно-опасных размеров повреждений КРН для отдельных случаев.
3. Определены параметры стресс-коррозионных повреждений труб, позволяющие принять решение о возможности их эксплуатации в составе МГ при условии восстановления их защитного покрытия.
4. Установлено по результатам гидростатических испытаний, что стальные трубы, механические свойства которых соответствуют указанным в ТУ, после длительной эксплуатации в составе МГ, с повреждениями типа КРН глубиной до 10% от толщины стенки имеют фактический коэффициент запаса по внутреннему давлению порядка 1,5-2,0, что сопоставимо с расчетной прочностью бездефектных труб.
5. Экспериментально установлено отсутствие развития естественных стресс-коррозионных повреждений глубиной от 0,5 мм до 3,0 мм в процессе гидроциклических испытаний труб диаметром 1420 мм производства Mannesmann (ТУ 20-28-40-48-56-79) класса прочности Х70 на воздухе при нагрузках, не превышающих нормативные эксплуатационные

6. Экспериментально установлено, что добавка в модельный грунтовый электролит NS4 1 г/л органического ингибитора коррозии (ТУ 2415-029-16424386-2015) трубной стали, содержащего в своем составе продукты реакции жирных аминов с различными смесями высших ненасыщенных карбоновых кислот, значительно снижает скорость роста трещины и повышает стойкость к КРН трубной стали.
7. Совершенствование технологии ремонта труб МГ с незначительными стресс-коррозионными повреждениями заключается в установлении степени опасности повреждений КРН на основании данных НК и последующем принятии решения о допустимости или недопустимости повреждений к проведению переизоляции труб в трассовых условиях с применением битумно-полимерных материалов холодного нанесения, содержащих ингибирующие КРН композиции.
8. Применение расчетной методики оценки прочности труб с повреждениями КРН позволило подтвердить полученные результаты экспериментальных исследований и разработать предложения по нормированию для труб из сталей контролируемой прокатки с учетом формы, ориентации, местоположения относительно сварного шва и механических свойств трубной стали.
9. Показана эффективность ремонта труб с повреждениями КРН до 10% от толщины стенки и продления периода работы действующих длительно эксплуатируемых МГ.

Спасибо за внимание!