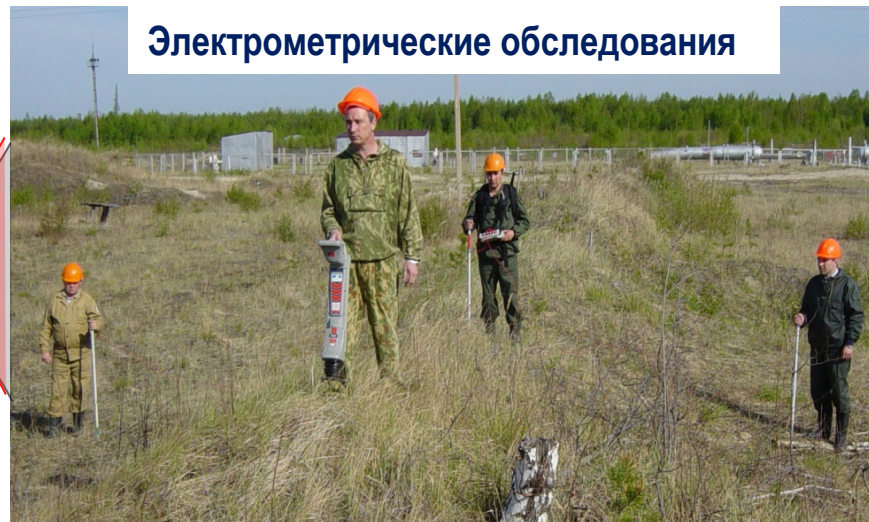
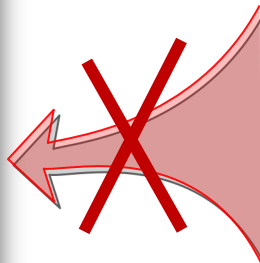


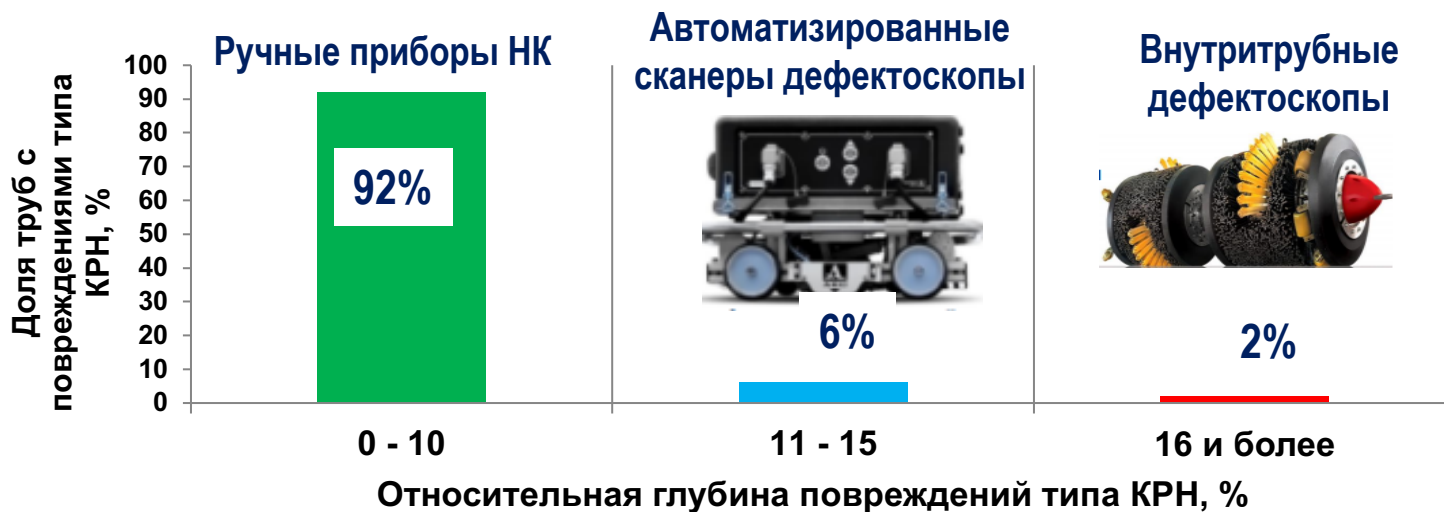
Совершенствование научно-методических подходов в области ремонта и дальнейшей эксплуатации труб с дефектами КРН

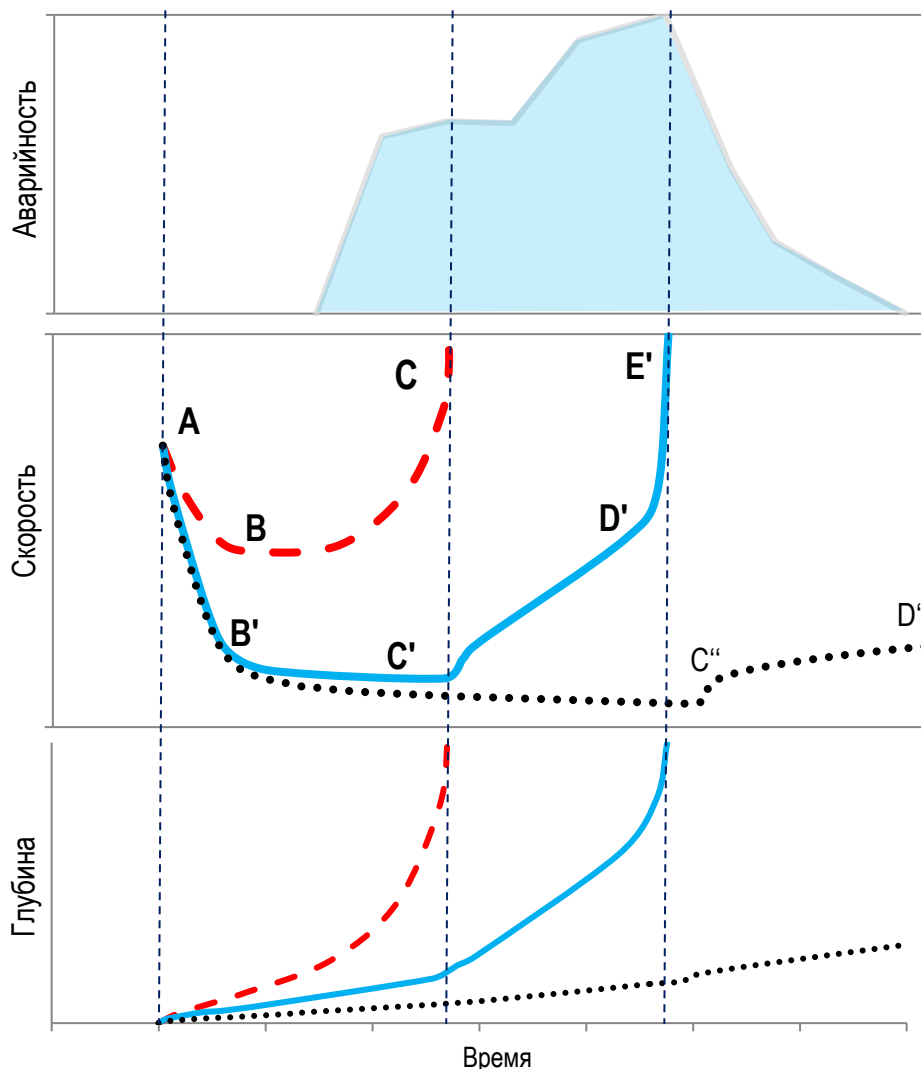
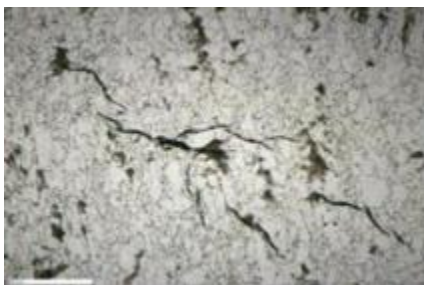
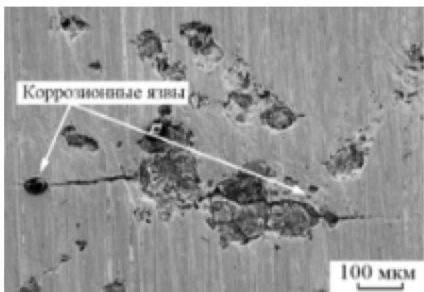
*Лаборатория исследования процессов коррозионного растрескивания
под напряжением ООО «Газпром ВНИИГАЗ»*

*к.х.н. Р.И. Богданов
к.т.н. И.В. Ряховских
к.х.н. Р.В. Кашковский*



Электрометрические обследования





Сценарий 1 (ABC)

Доля аварий МГ в первые 15 лет эксплуатации 0,34.
Вероятность реализации сценария КРН $9,1 \cdot 10^{-4}$.
Скорость 1,0-1,5 мм/год

Сценарий 2 (AB'C'D'E')

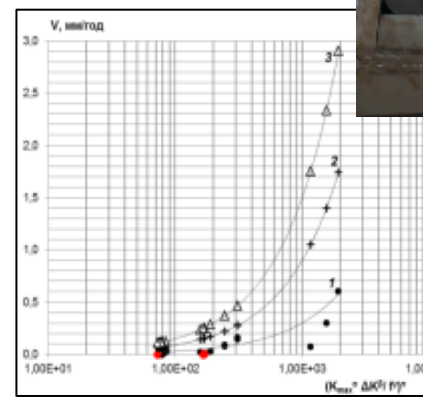
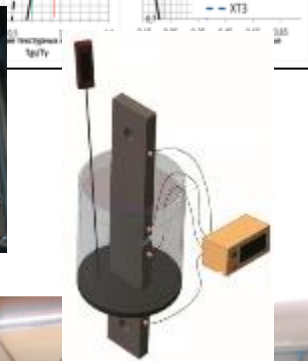
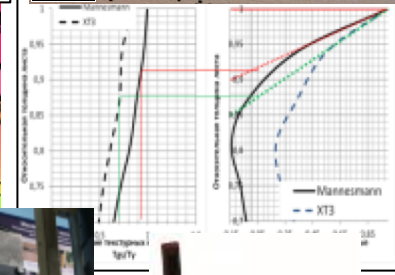
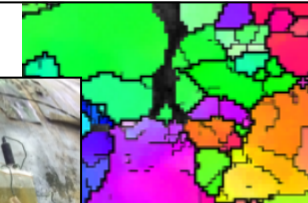
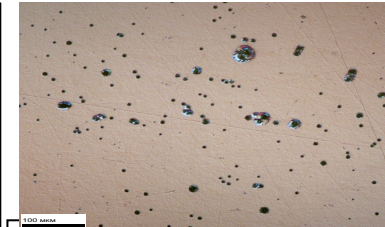
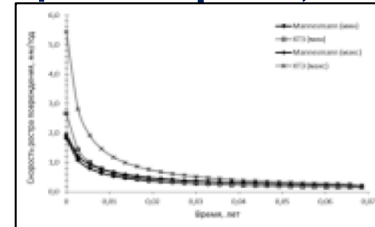
Доля аварий МГ по причине КРН в период 15-30 лет эксплуатации МГ 0,65.
Вероятность реализации сценария КРН $1,65 \cdot 10^{-2}$.
Скорость 0,5-1,0 мм/год

Сценарий 3 (AB'C''D'')

Доля аварий МГ по причине КРН после 30 лет эксплуатации МГ 0,01.
Вероятность реализации сценария КРН 0,98 из них 0,93 глубиной менее 10%.
Скорость 0,0-0,5 мм/год

Договор НИР от 13.09.2016 № 4606-308-15-5 между ООО «Газпром ВНИИГАЗ» и ПАО «Газпром» с участием НИЯУ МИФИ, ФГУП ЦНИИЧермет, ИФХЭ РАН

- ❑ Стадия «0» Инкубационный период до образования трещин
 - коррозионно-электрохимические исследования;
 - металлографический анализ
- ❑ Стадия «1» Образование, начальный рост и стабилизация трещин
 - рентгеноструктурные исследования;
 - коррозионно-механические испытания;
 - микроскопические исследования
- ❑ Стадия «2» – Развитие индивидуальной трещины в колонии
- ❑ Стадия «3» – Развитие магистральной трещины
- ❑ Стадия «4» – Разрушение
 - коррозионно-механические испытания образцов;
 - гидроциклические и гидростатические испытания труб;
 - металлографический анализ



Параметры, определяющие скорость КРН на каждой конкретной стадии, по результатам исследований

Параметр/Стадия	Стадия «0». Инкубационный период	Стадия «1». Образование, начальный рост и стабилизация трещин	Стадия «2». Развитие единичной трещины	Стадия «3». Развитие магистральной трещины	Стадия «4». Разрушение
Долговечность защитного покрытия	значительное влияние				
Макросвойства и механические характеристики стали	не влияет				
Плотность и состав неметаллических включений		незначительное влияние			
Химический состав грунтового электролита					
Скорость внедрения водорода в металл				! значительное влияние в спец. условиях	
Аспектное отношение локального концентратора напряжений					
Уровень остаточных напряжений на поверхности и по толщине стенки трубы					
Параметры текстурной неоднородности					
Отношение глубины к длине единичной трещины					
Плотность трещин в колонии		? треб. доп. исследования		? треб. доп. исследования	
Величина статической нагрузки в газопроводе					
Параметры переменной нагрузки в газопроводе					

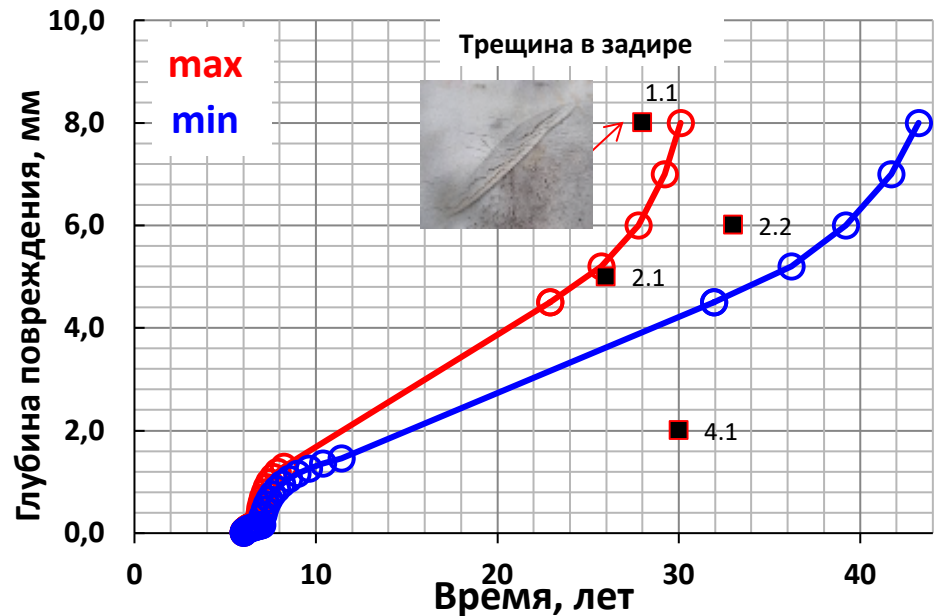
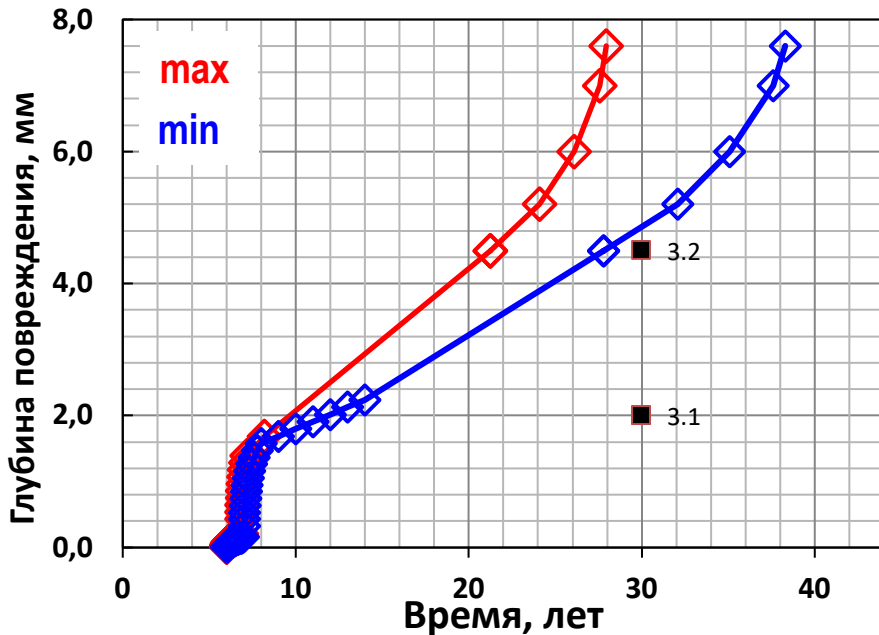
Скорость развития стресс-коррозионных дефектов по результатам комплексных испытаний дефектных труб

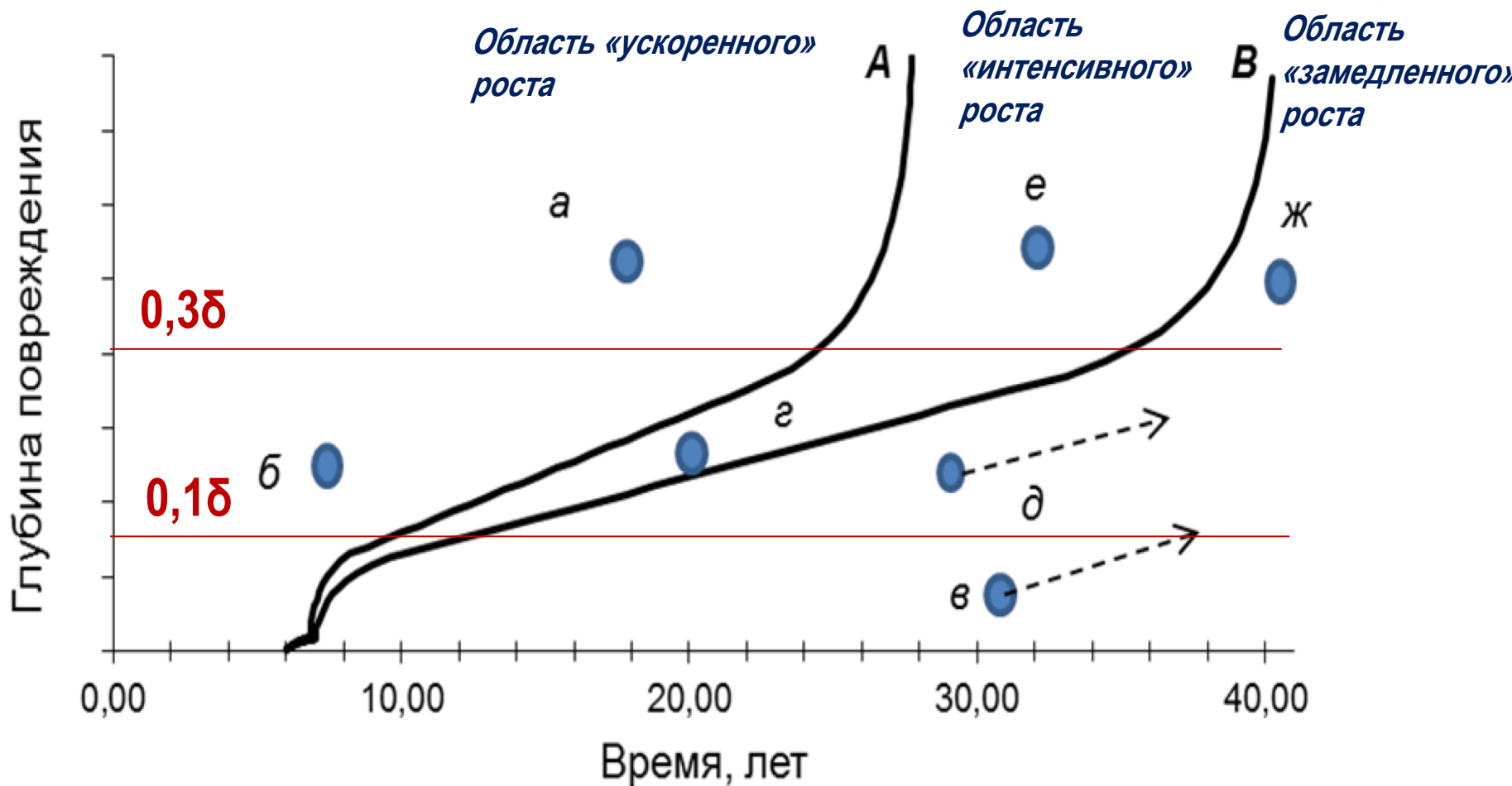
$$\frac{da}{dt}_i = \begin{cases} i = 0 | & K (t - t_0)^{n-1}, \\ i = 1 | & r \cdot \exp\left(-\frac{a}{m}\right), \\ i = 2 | & (A_0 \cdot B \cdot i_a^*)^{\frac{1}{1-n}} \cdot \left(\ln\left(\frac{K^2 - K_{1SCC}^2}{\pi \cdot r_0 \cdot \sigma_Y^2}\right)\right)^{\frac{N+1}{N-1} \cdot \frac{n}{1-n}}, \\ i = 3 | & A_i N_b \left[\frac{K_{max}^\beta \Delta K^\alpha}{f^\gamma \frac{N_L}{32}}\right]^n, \\ i = 4 | & \text{Разрушение} \end{cases}$$

Стадия «0»	0,16 - 0,26 мм/год
Стадия «1»	0,01 - 1 мм/год
Стадия «2»	0,15 - 0,39 мм/год
Стадия «3»	0,5 – более 1 мм/год

Ø1420x16,5 мм ХТЗ

Ø1420x16,5 мм Mannesmann



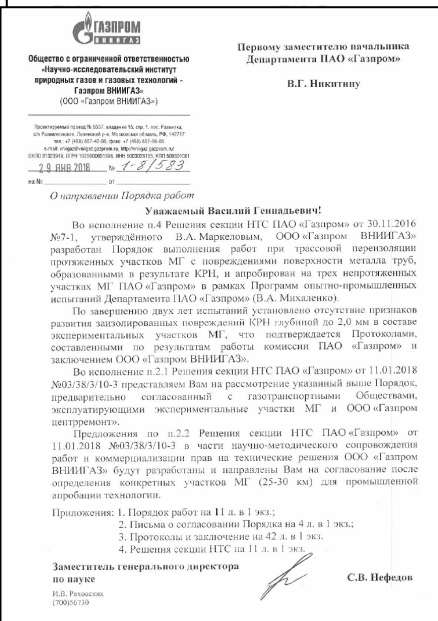
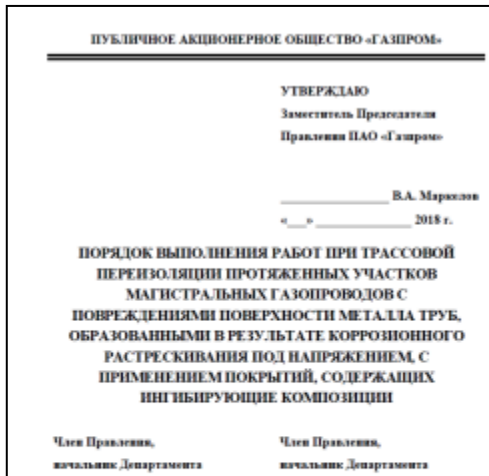


- *A* – кривая интенсивного развития КРН
- *B* – кривая замедленного развития КРН

ВРЕМЕННЫЙ ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ ПРИ ТРАССОВОЙ ПЕРЕИЗОЛЯЦИИ ПРОТЯЖЕННЫХ УЧАСТКОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ С НЕЗНАЧИТЕЛЬНЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА ТРУБ ГЛУБИНОЙ ДО 10% ОТ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ ТРУБЫ, ОБРАЗОВАННЫМИ В РЕЗУЛЬТАТЕ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ

Протокол заседания постоянно действующей комиссии..., подписанный первым заместителем нач. Департамента В.Г. Никитиным

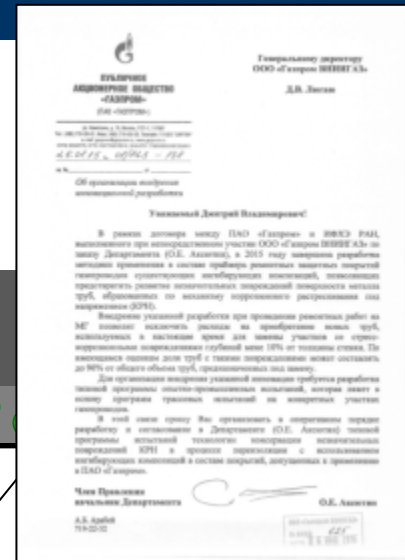
«Наружное защитное покрытие на основе материала «ДЕКОМ-РАМ» и битумно-полимерной грунтовки «ДЕКОМ – ИНГ» по ТУ 2313-030-32989231-2015 допускается к применению на объектах ПАО «Газпром»



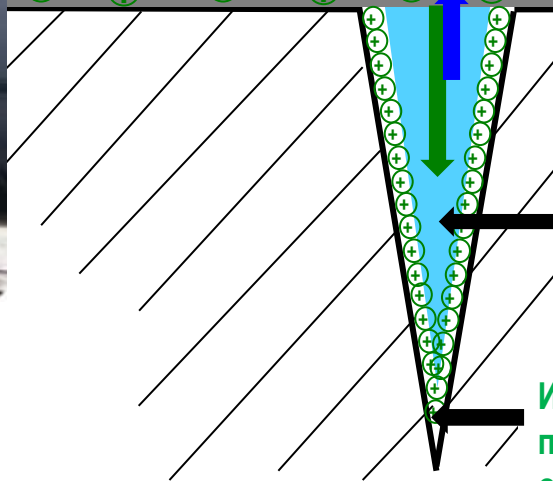
Принцип действия ингибитора после переизоляции МГ при оставлении среды в дефекте КРН



Поручение Департамента (О.Е. Аксютин) об организации внедрения инновационной разработки



Наружный слой покрытия
Клеящий слой

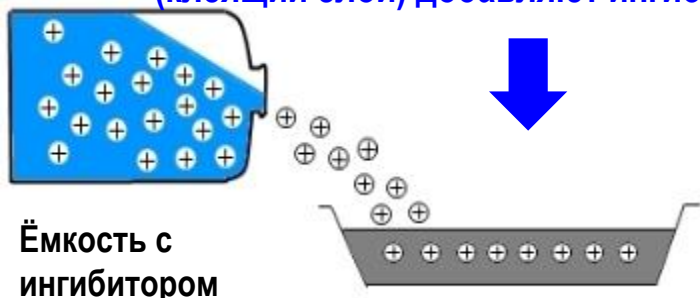


Оставленная влага содержит «агрессивные» ионы – OH^- , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , HS^-

Ингибитор блокирует поверхность металла от воздействия «агрессивных» ионов
Оставленная влага

 Частицы ингибитора ЛАР

В процессе изготовления в праймер (клеящий слой) добавляют ингибитор



Ёмкость с ингибитором

Ёмкость с праймером

Оценка времени до разрушения труб с дефектом КРН в зависимости от полноты исходных данных

Основной металл

Глубина / Макс. погр. / Время до 0,3δ

В области 50 мм от продольного шва

Глубина / Макс. погр. / Время до 0,3δ

0,15 / 0,15 / <1 года	ВТД MFL	0,25 / 0,25 / < 1 года
0,10 / 0,15 / 3 года	ВТД EMA+MFL	0,20 / 0,25 / < 1 года
0,10 / 0,05 / 3,4 года	Норм. ВТД св-ва EMA+MFL	-
0,10 / 0,05 / 3,8 лет	ВТД EMA+MFL	Грунт* -
0,10 / 0,05 / 4,3 года	Норм. св-ва ВТД EMA+MFL	Грунт* -
0,10 / 0,05 / 5,1 года	Кор.-мех. св-ва ВТД EMA+MFL	-
0,10 / 0,05 / 6 лет	Кор.-мех. св-ва ВТД EMA+MFL	Грунт* -

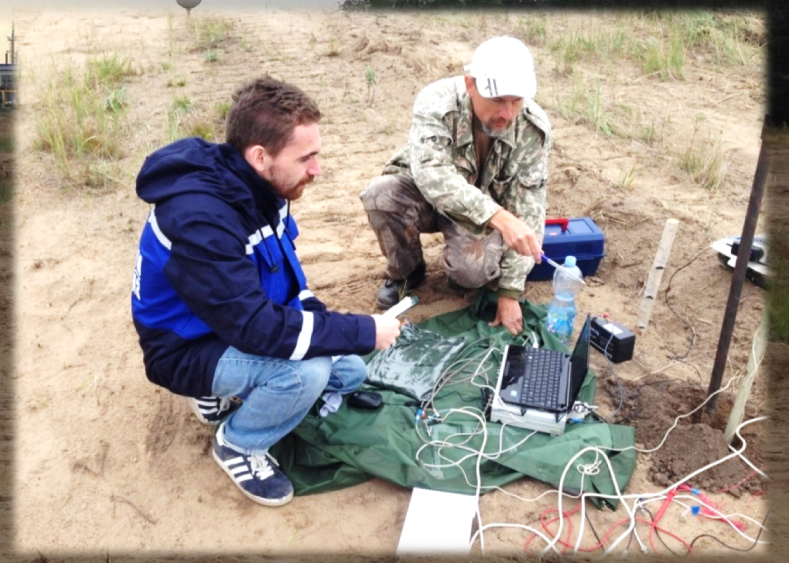
Методика определения агрессивности грунта в отношении КРН (Р Газпром 2-2.3-761)



Трассовые измерения характеристик грунтов с использованием специализированного оборудования



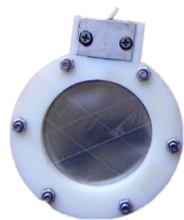
Процесс проведения диагностического обследования специалистами ООО «Газпром ВНИИГАЗ» и ИФХЭ РАН



Оборудование для определения характеристик грунтов на участках МГ, подверженных КРН

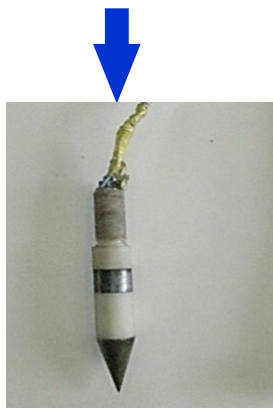
Определение химического состава грунта:

- уровень pH грунтового электролита,
 - концентрация сульфид и карбонат ионов,
- выполнялось с помощью ионселективных электродов



Определение скорости внедрения водорода в сталь (наводороживающая способность грунта) выполнялось с помощью датчиков наводороживания

Определение скорости восстановления кислорода и поляризационных характеристик стали (скорость анодного растворения и наличие гистерезиса) выполнялось с использованием переносных зондов, потенциостата IPC PRO MF



+



Сбор и обработка информации на переносном компьютере



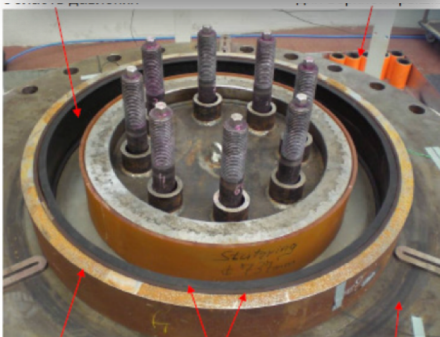
Предложения по организации и размещению испытательного комплекса



ГТО ПАО «Газпром»

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

Экспериментальные участки МГ с эксплуатационными дефектами



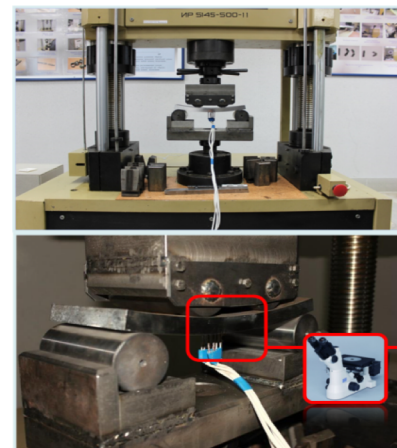
Полноразмерные стенды для проведения гидравлических испытаний дефектных труб

Специализированные лабораторные испытательные стенды и оборудование для проведения серийных испытаний фрагментов труб с дефектами

Кольцевой образец Резиновое Нижняя крышка

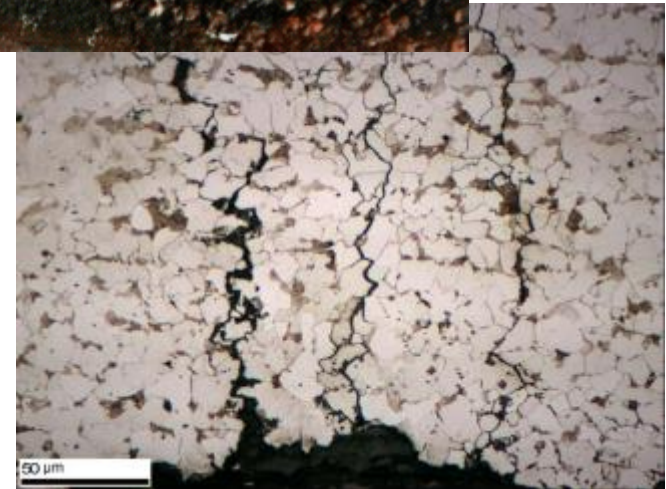
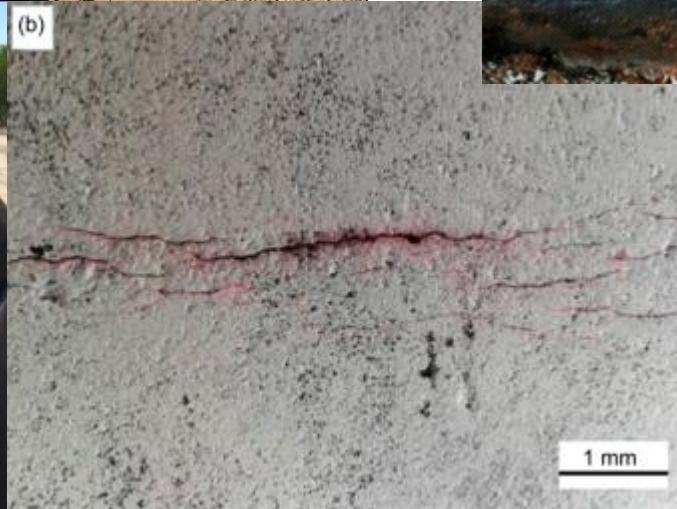
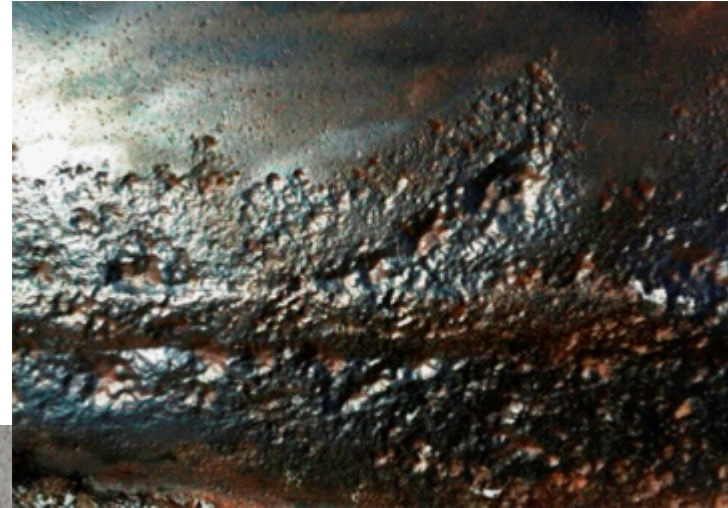
ВУЗы и НИИ РАН

Исследовательские лаборатории для проведения узкоспециализированных коррозионно-механических испытаний сталей, металлофизических, рентгеноструктурных и исследований сталей



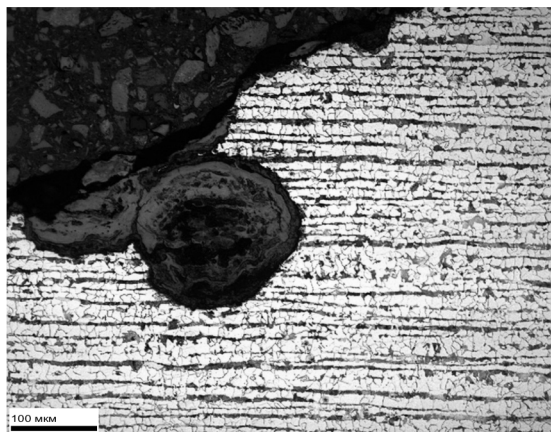
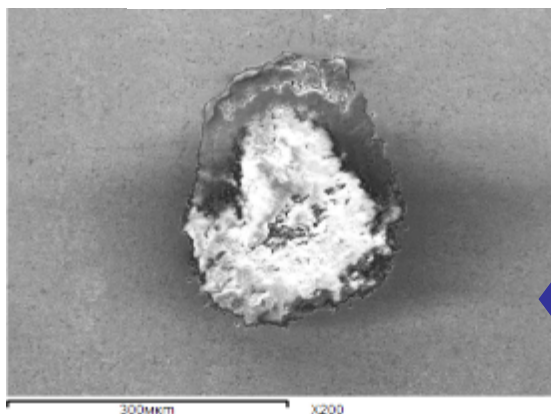
Перспективные направления дальнейших исследований

Астраханская область, МГ Ø1020 x 10 мм



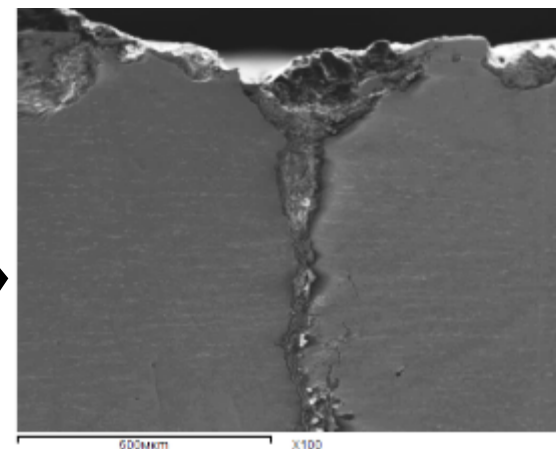
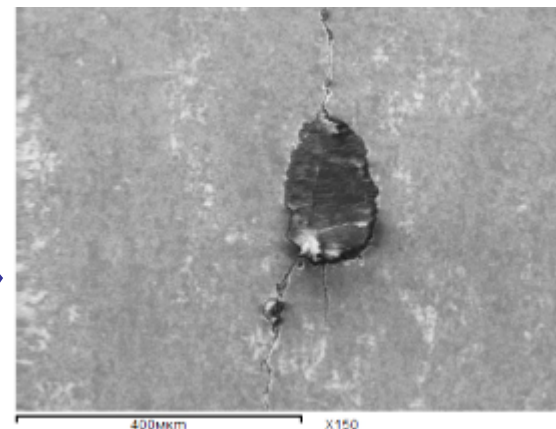
Повреждения магистральных газопроводов

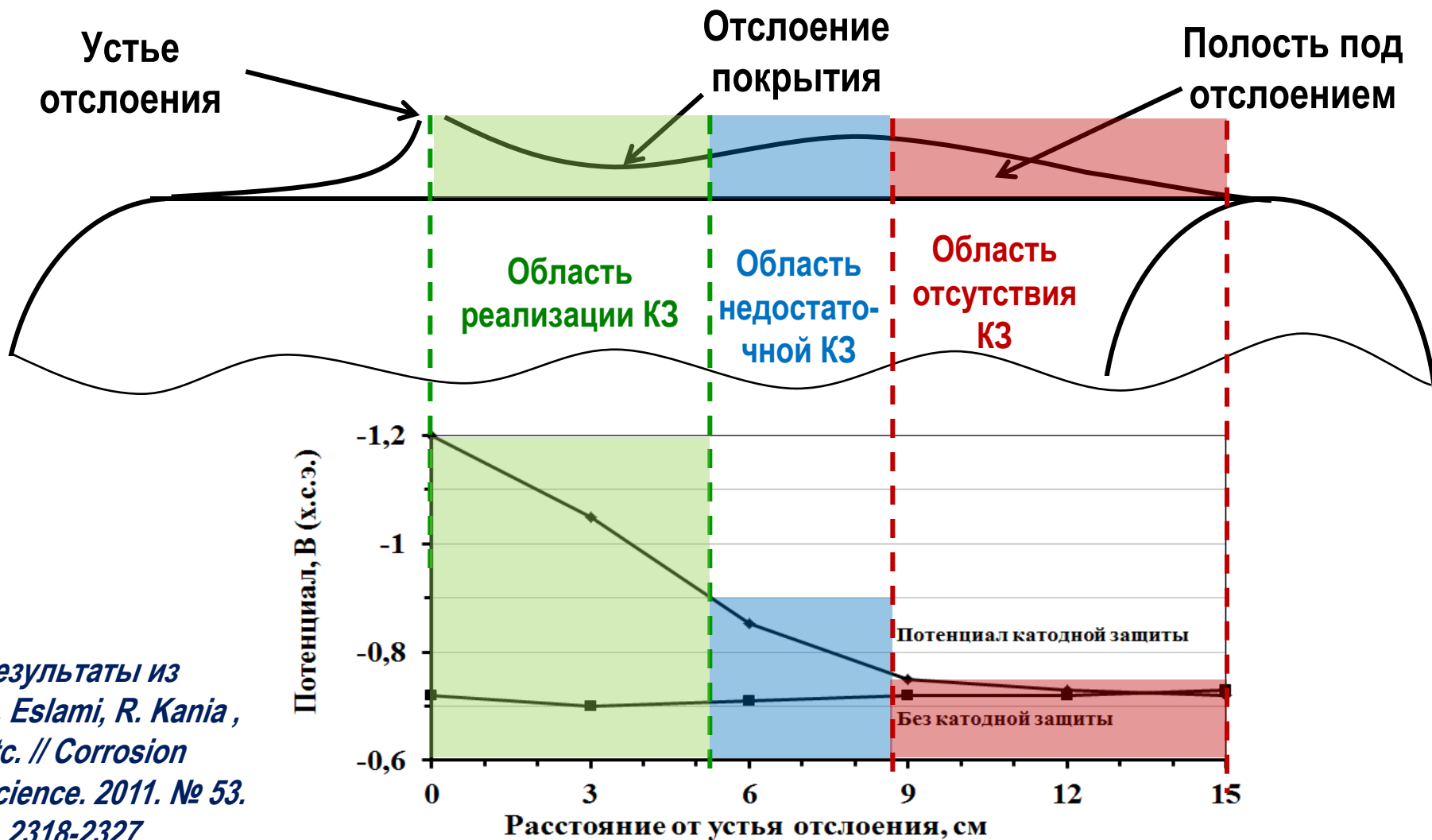
Коррозия



- долговечность защитного покрытия трубопровода
- агрессивность грунтового электролита (*значение pH, анионный состав, скорость внедрения водорода в металл*)
- склонность стали к локальной коррозии (*плотность неметаллических включений*)
- геометрия питтинга (*отношение глубины питтинга к радиусу*)
- уровень внутренних и внешних напряжений

Коррозионное растрескивание

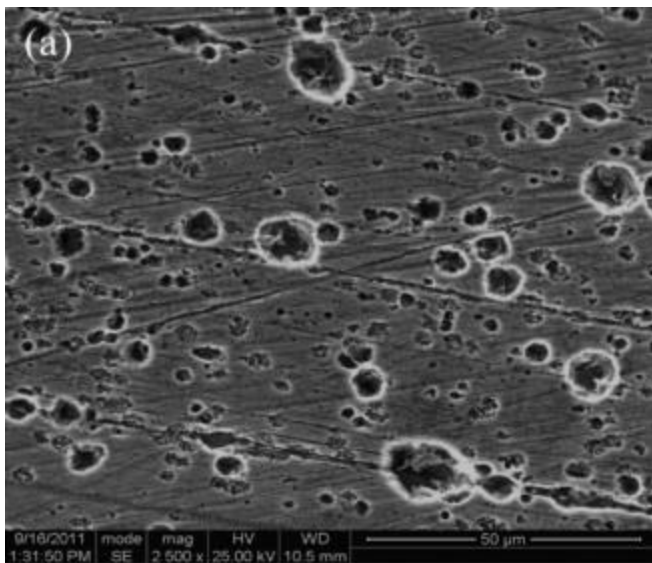




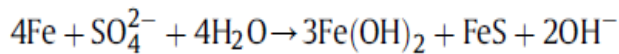
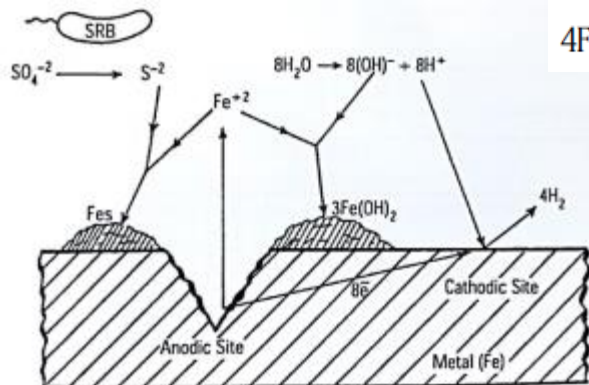
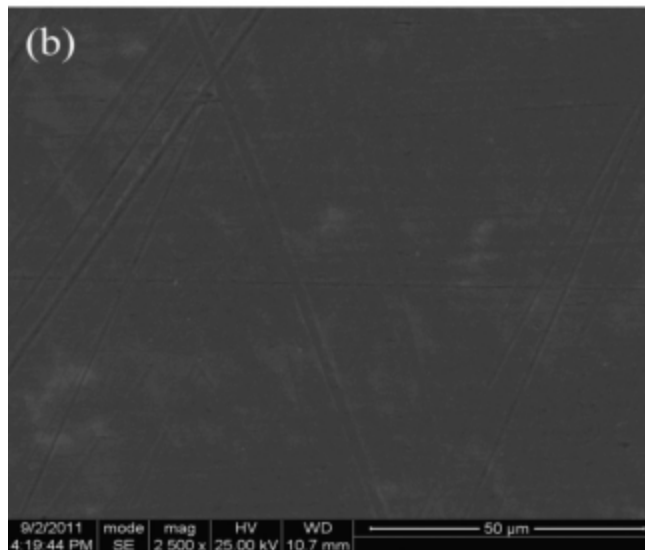
Результаты из
A. Eslami, R. Kania,
etc. // Corrosion
Science. 2011. № 53.
p. 2318-2327

В присутствии СРБ

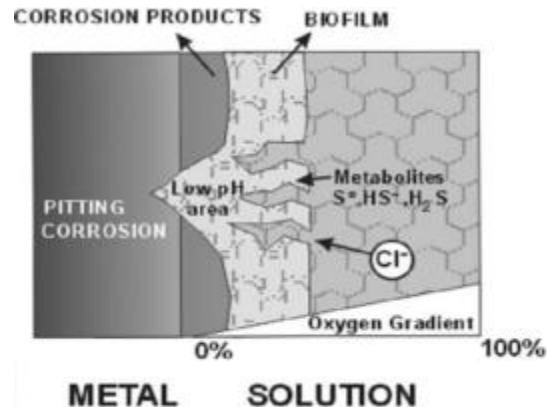
J. Xu et al. / Materials Chemistry and Physics. 2013. Vol. 142. p. 692-700

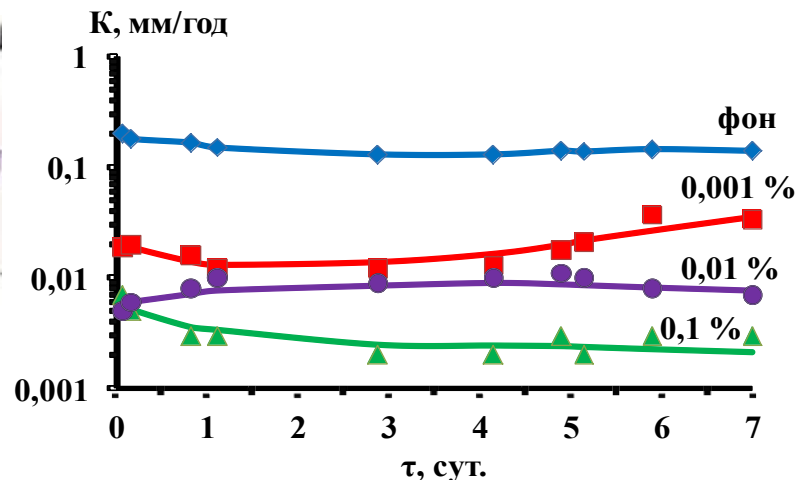
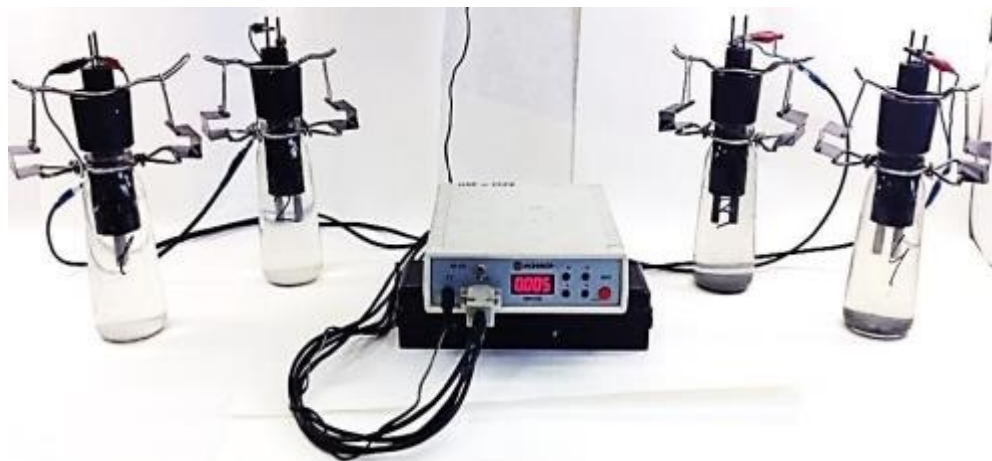


В стерильной среде

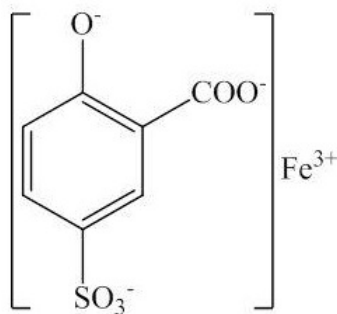


Участие метаболитов СРБ в коррозионном процессе



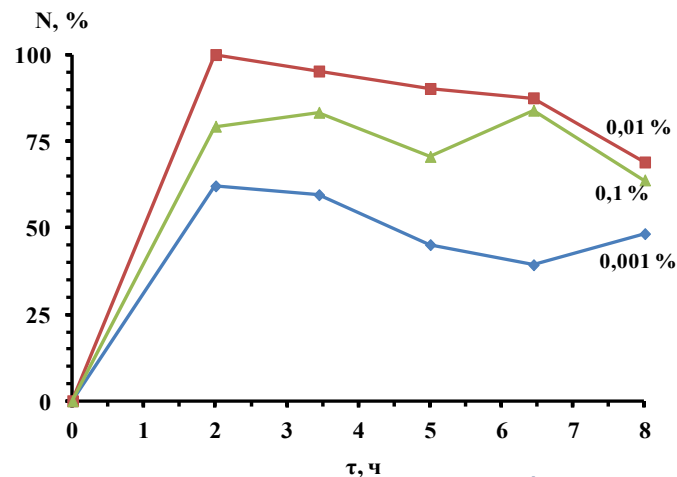


Скорость коррозии в фоновой среде с СРБ и при добавлении бактерицида (метод ЛПР)



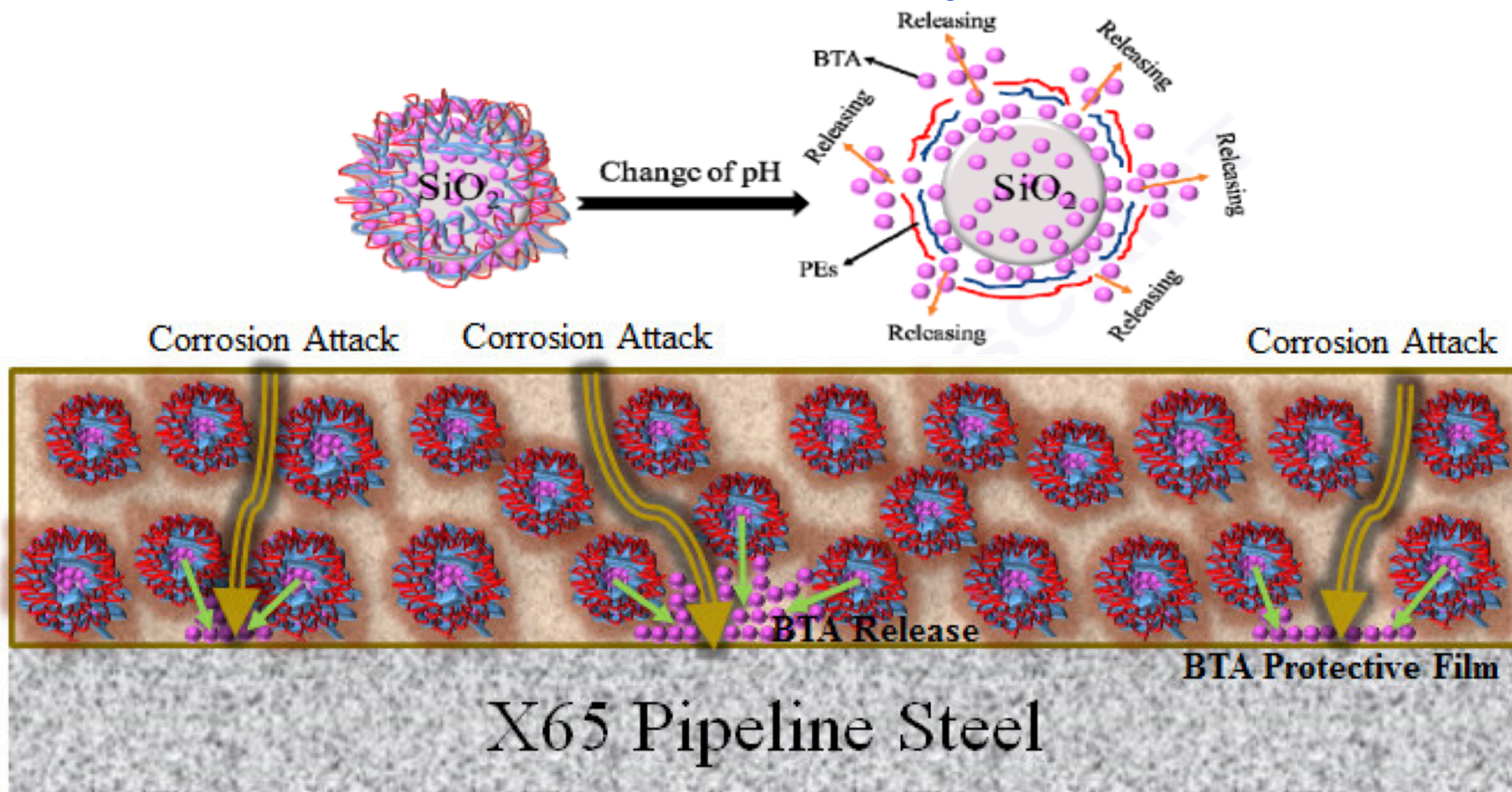
Определение С (Fe_{общ}) в растворе по ГОСТ 4011

С(Fe_{общ}) пропорциональна оптической плотности окрашенного комплексного соединения Feⁿ⁺ с сульфосалициловой кислотой при pH > 8



Степень подавления роста численности бактерий в присутствии бактерицида

Технологии инкапсулирования ингибитора коррозии/бактерицида в защитное покрытие трубопровода





Научно-практический семинар «Повышение надежности магистральных газопроводов, подверженных коррозионному растрескиванию под напряжением»

Цель семинара – организация уникальной площадки обмена знаниями в области КРН и подпленочной коррозии между работниками администрации и дочерних обществ ПАО «Газпром», научных работников, ВУЗов и НИИ, диагностических и ремонтных организаций, производителей инновационного оборудования и материалов для газовой отрасли.

За 3 года в работе семинаров приняли участие более **150 человек**, заслушано более **70 докладов**.

Разработан **типовой учебный план** и программа повышения квалификации, утвержденные Департаментом 715 ПАО «Газпром». Обучение прошли более **70 молодых специалистов** нефтегазовой отрасли



1. Разработана комплексная универсальная модель образования и развития КРН МГ во времени с учетом современных представлений о физико-химических процессах, протекающих при коррозионно-механическом разрушении трубных сталей. В рамках модели рассмотрены характерные сценарии развития КРН металла труб, описывающие стадийность процесса, а также изменение скорости роста и глубины трещин во времени с учетом ретроспективы эксплуатации МГ.
2. По результатам выполненного комплекса экспериментальных исследований установлены параметры модели КРН для труб ХТЗ/Mannesmann, которые влияют на скорости роста трещин, на каждой конкретной стадии развития процесса. При этом, скорость развития дефектов КРН металла труб ХТЗ на всех стадиях процесса выше, чем у труб Mannesmann.
3. Показана возможность применения разработанной универсальной модели кинетики КРН для достоверного прогнозирования ресурса труб со стресс-коррозионными дефектами и назначения междиagnostических сроков обследования участков МГ. На основе разработанной модели предложен алгоритм принятия решений об эксплуатации труб с дефектами КРН с учетом кинетики их развития в составе участков МГ.
4. Разработан способ ремонта подземных участков МГ со стресс-коррозионными повреждениями глубиной до 10% от толщины стенки трубы, с применением защитных покрытий, содержащих ингибирующие композиции. В настоящее время защитное покрытие на основе термостойкого рулонного армированного материала «ДЕКОМ-РАМ» и термостойкой битумно-полимерной грунтовки «ДЕКОМ-ИНГ» ТУ 2313-030-32989231-2017, содержащей ингибирующую КРН композицию допущено к применению на объектах ПАО «Газпром».

- *Продолжить работы по развитию и внедрению методов трассовой оценки характеристик грунтов, определяющих скорость развития дефектов КРН и подпленочной коррозии в различных природно-климатических условиях*
- *С целью продолжения системных испытаний различных типоразмеров труб после длительной эксплуатации в составе МГ и их классификация по стойкости против КРН, а также для оценки параметров кинетической модели стресс-коррозии и в случае необходимости их корректировки необходимо создание испытательного комплекса для исследования КРН труб, коррозионно-механической прочности и долговечности стальных конструкций, эксплуатируемых на объектах ГТС ПАО «ГАЗПРОМ».*
- *Поддержать заявку ООО «Газпром ВНИИГАЗ» на выполнение НИР «Разработка мероприятий, направленных на предотвращение процессов коррозионного разрушения магистральных газопроводов под отслоившимся покрытием», включенную в в Перечень работ и услуг ООО «Газпром ВНИИГАЗ», выполняемых на регулярной основе по направлению бизнес-процесса Департамента (В.А. Михаленко) ПАО «Газпром». В рамках указанной работы запланировать:*
 - *проведение исследования микробиологического воздействия на коррозионную агрессивность грунтов и грунтовых электролитов в местах пролегания МГ;*
 - *продолжение работ в части повышения функциональных свойств защитных покрытий трубопроводов, в том числе с применением технологии инкапсулирования ингибитора коррозии/бактерицида в покрытие;*
 - *определение базовых газотранспортных предприятий для апробации разрабатываемых защитных покрытий*

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

Богданов Роман Иванович, канд. хим. наук
Ведущий научный сотрудник лаборатории
исследования процессов коррозионного
растрескивания под напряжением
Тел.: (498) 657-40-48 доб. 27-72 (газ. 5-67-30)
E-mail: R_Bogdanov@vniigaz.gazprom.ru

Ряховских Илья Викторович, канд. техн. наук
Начальник лаборатории исследования
процессов коррозионного растрескивания под
напряжением
Тел.: (498) 657-40-48 доб. 21-15 (газ. 5-67-30)
E-mail: I_Ryakhovskikh@vniigaz.gazprom.ru

Кашковский Роман Владимирович, канд. хим. наук
Ведущий научный сотрудник лаборатории
исследования процессов коррозионного
растрескивания под напряжением
Тел.: (498) 657-40-48 доб. 27-72 (газ. 5-67-30)
E-mail: R_Kashkovskiy@vniigaz.gazprom.ru

Зарубежный опыт эксплуатации труб с повреждениями КРН в составе действующего газопровода

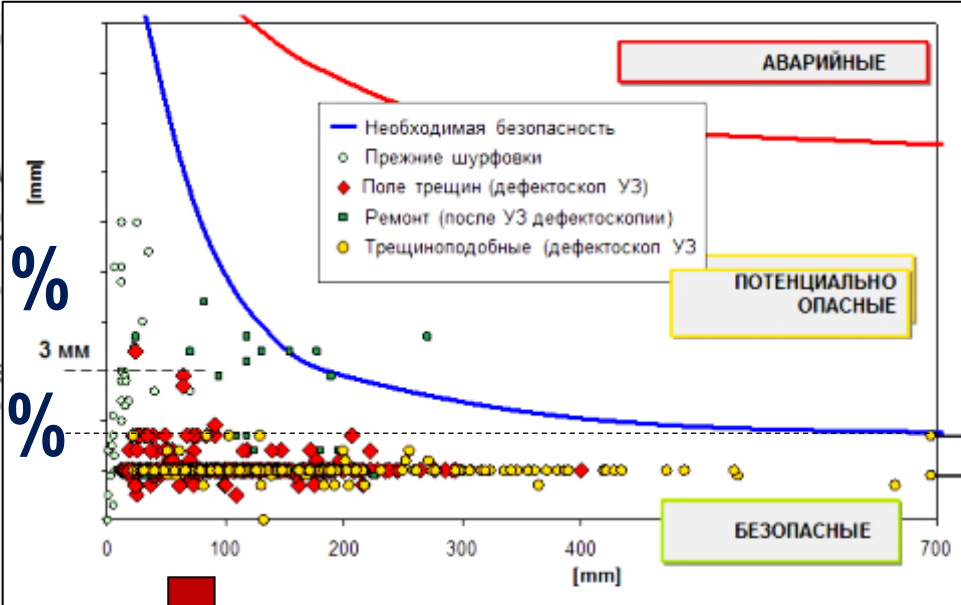
Транс-европейский газопровод (Trans-Europa-Naturgas-Pipeline) – TENP I

Общая протяженность: 490 км;
 Диаметры: 950-900 мм;
 Рабочее давление: 6,7 МПа;
 Толщина стенок: 12,3 – 15,1 мм;
 Ввод в эксплуатацию: 1972/73 гг.

Open Grid Europe
 The Gas Wheel
 Crack Detection by UT Inline Inspection completed

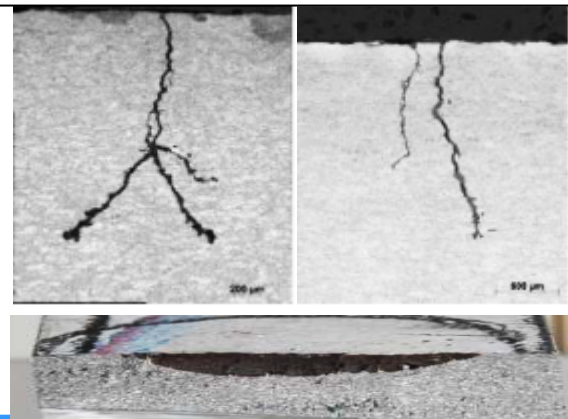


25%
 15%



Повторное ВТД через 7-8 лет

**Повреждений КРН – 3300 шт.
 Глубиной до 1 мм – 2694 шт.**



Depth	crack-like (eg. MILI defect)	crackfield (eg. SCC)
< 1 mm	94	533
1 - 2 mm	49	151
2 - 4 mm	5	15
> 4 mm	-	1
sum	138	700

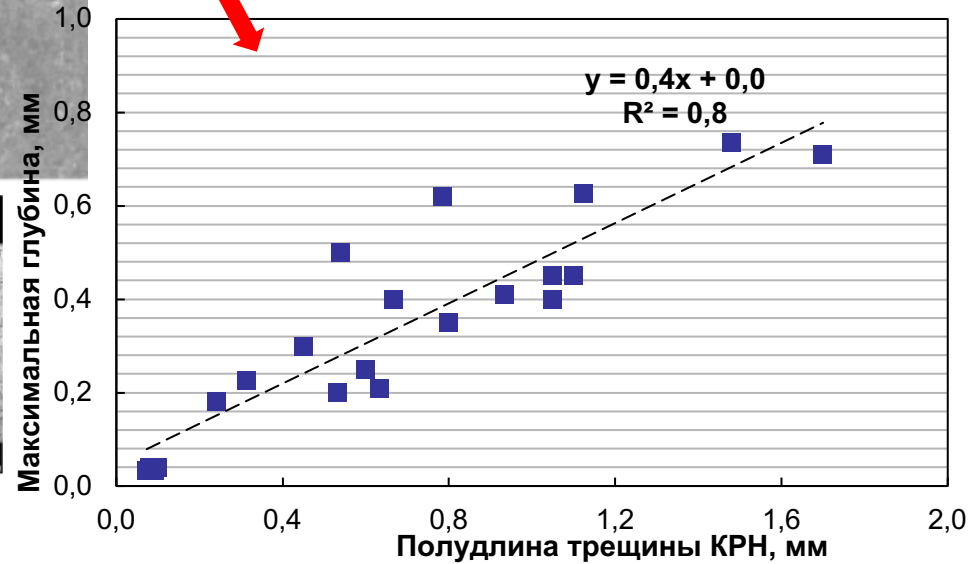
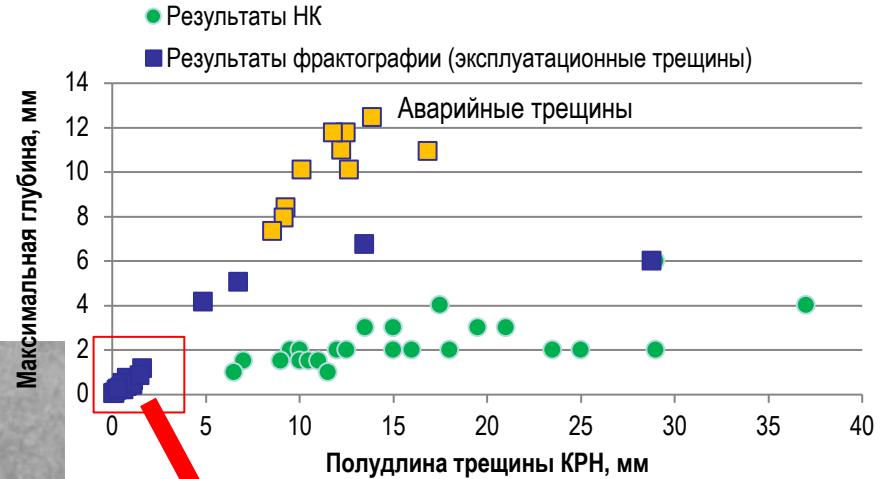
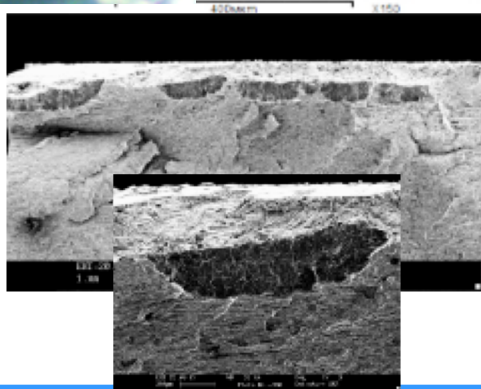
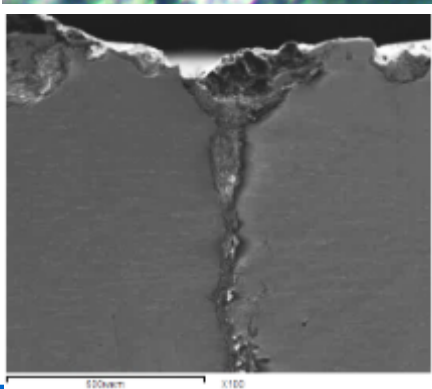
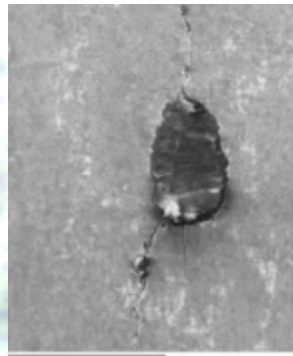
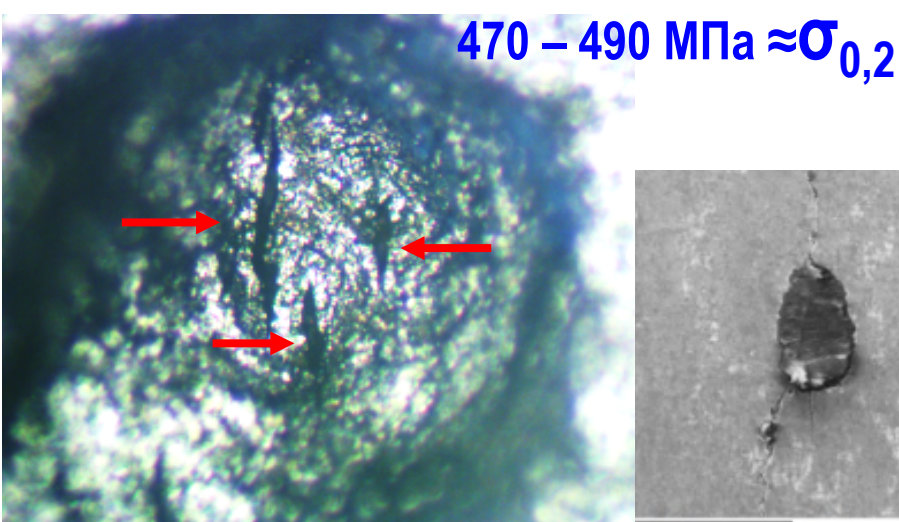
Depth	crack-like (eg. MILI defect)	crackfield (eg. SCC)
< 1 mm	318	2088
1 - 2 mm	48	120
2 - 4 mm	6	14
> 4 mm	-	3
sum	373	2225

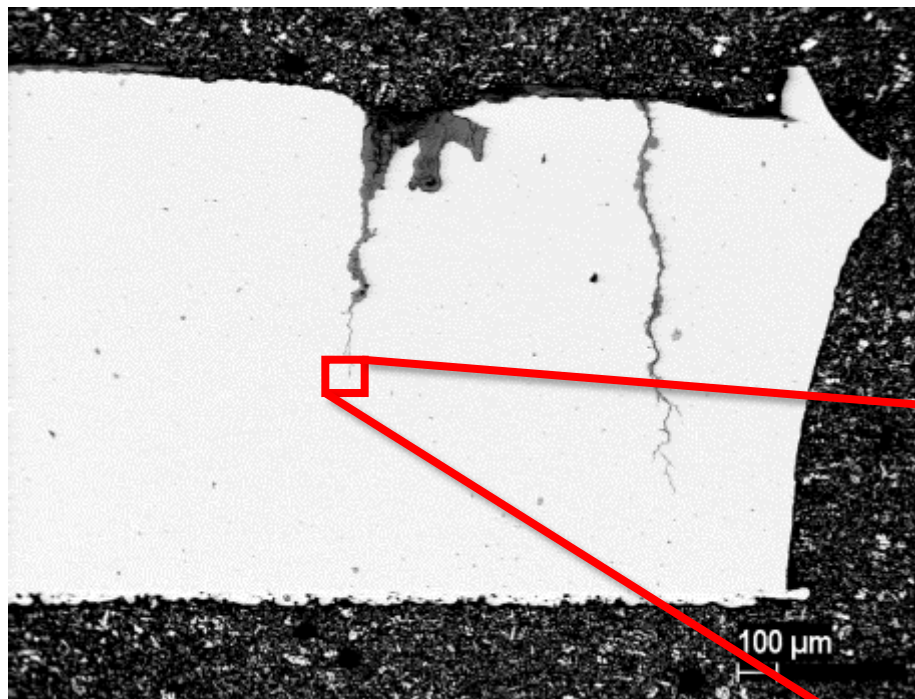
Schwarzach - Hügelsheim (103 km in 2010)

Hügelsheim - Wallbach (147 km in 2006)

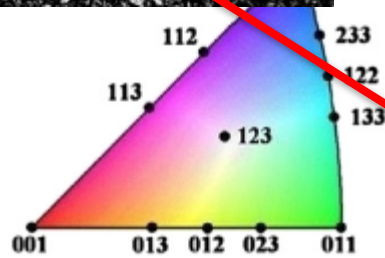
SCC | Essen | 04/2014

Стадия «1». Образование, начальный рост и стабилизация трещин

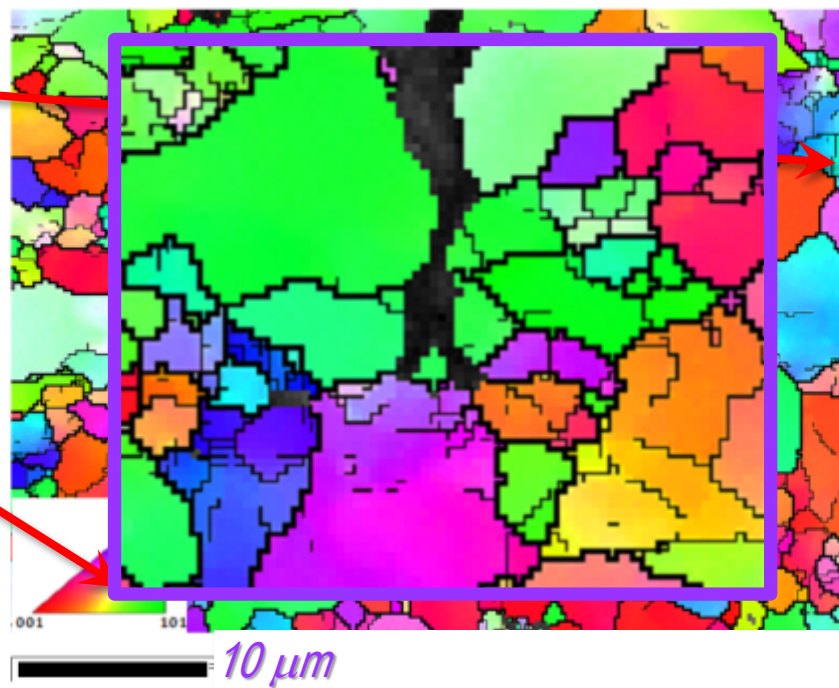




Остановка трещины при наличии послойной текстурной неоднородности



EBSD карта

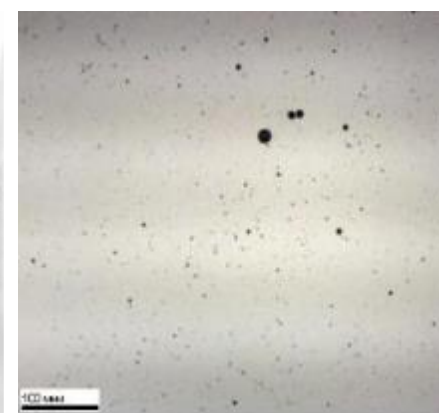
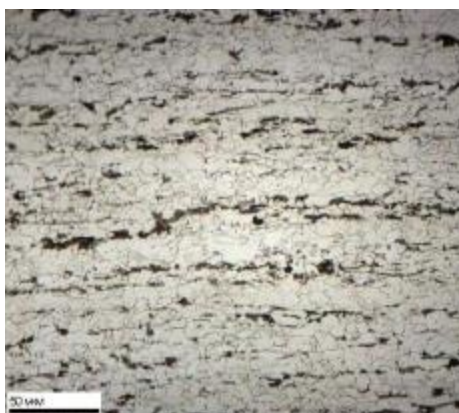
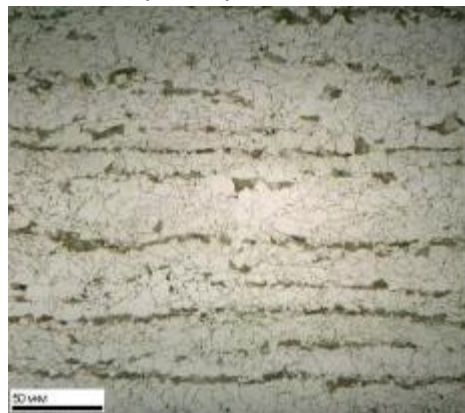


(ХТЗ)

(Mann)

(ХТЗ)

(ПСШ ХТЗ)



Параметр	ХТЗ	Mann
Размер зерна феррита	10-12	9-10
Полосчатость структуры	2-3 (по всему сечению)	Менее 2 (слабо выражена)
$\sigma_{0,2}$	Соотв. ТУ	Соотв. ТУ
σ_B	Соотв. ТУ	Соотв. ТУ
δ	20 (-1,49 +1,34)	20 (-0,06 +2,7)
σ_T/σ_B	Соотв. СТО Газпром 2-4.1-713	Соотв. СТО Газпром 2-4.1-713
KCV, KCU	Соотв. ТУ (кроме ЛС)	Соотв. ТУ

Договор № 2704-0300-11-9 от 01.03.2013 с ИФХЭ РАН

Предварительный выбор ингибирующих КРН композиций на базе ИФХЭ РАН

- электрохимические исследования (скорость растворения металла)
- коррозионно-механические испытания статической нагрузкой и методом SSRT

Испытано 10 органических веществ различного состава;

Выбрано 2 композиции.

Проверка свойств ингибирующих КРН композиций и оценка совместимости с защитным покрытием на базе

ООО «Газпром ВНИИГАЗ» СТО 2-2.3-148-2013

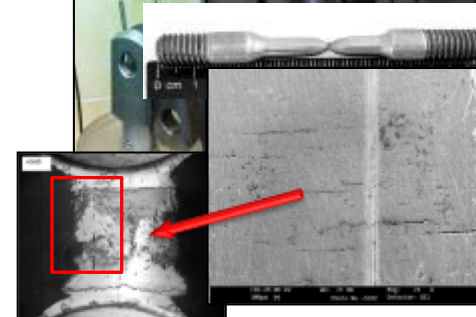
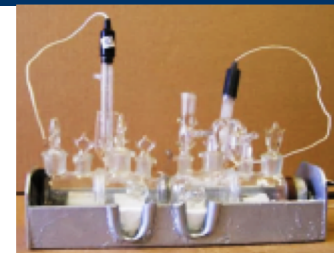
- коррозионно-механические испытания при циклическом нагружении;
- лабораторные и стендовые нанесения защитного покрытия

Испытано 2 композиции,

Выбрана 1 эффективная композиция КР60



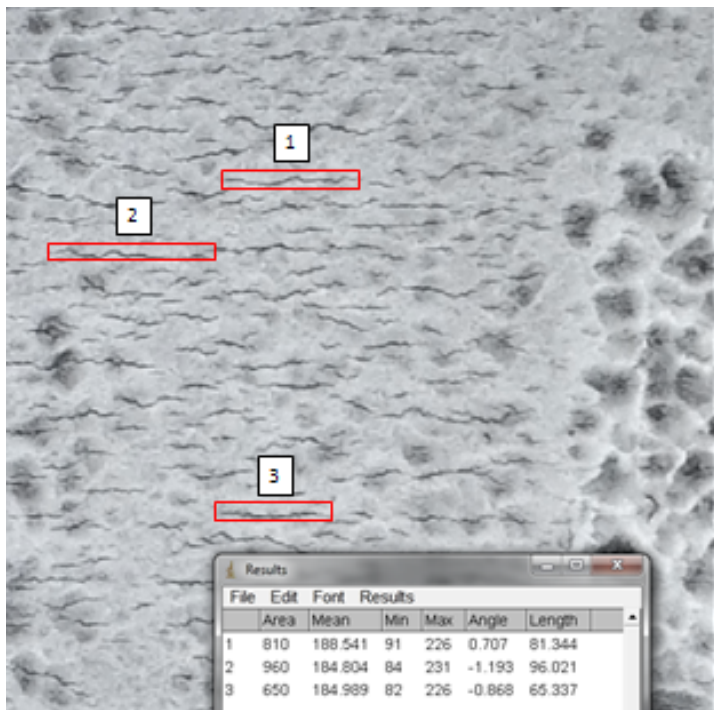
- повышает обобщенный показатель сопротивления КРН в электролите в 1,16 раз (SSRT);
- снижает скорость роста уже существующей трещины в электролите в 3 раза (при стат. нагр.);
- повышает время до зарождения трещин в трубной стали в электролите в 1,2 раза (при цикл. нагр.);
- снижает скорость роста трещины в электролите в 1,53 раза (при цикл. нагр.);
- адгезия защитного покрытия в 1,2 раза выше технических требований ПАО «Газпром».



№ п/п	Оцениваемый показатель	Норма	Участок №1 МГ «Ямбург-Западная граница»	Участок №2 МГ «Пунга-Ухта-Грязовец IV»	Участок №3 МГ «Пунга-Ухта-Грязовец IV»
1.	Качество очистки поверхности	Не ниже степени 3 По ГОСТ 9.402	соответствует	соответствует	соответствует
2.	Температура поверхности	от +10 до 50°C	от +11 до +12	+12	+12
3.	Толщина покрытия	4,6-4,8 мм	4,6	4,6	4,6
4.	Адгезия методом отслаивания	> 30 Н/см	59	44	86
5.	Нахлест края витка На предыдущий	15-30 мм	соответствует	соответствует	соответствует
6.	Нахлест концов обертки	400-500 мм	соответствует	соответствует	соответствует

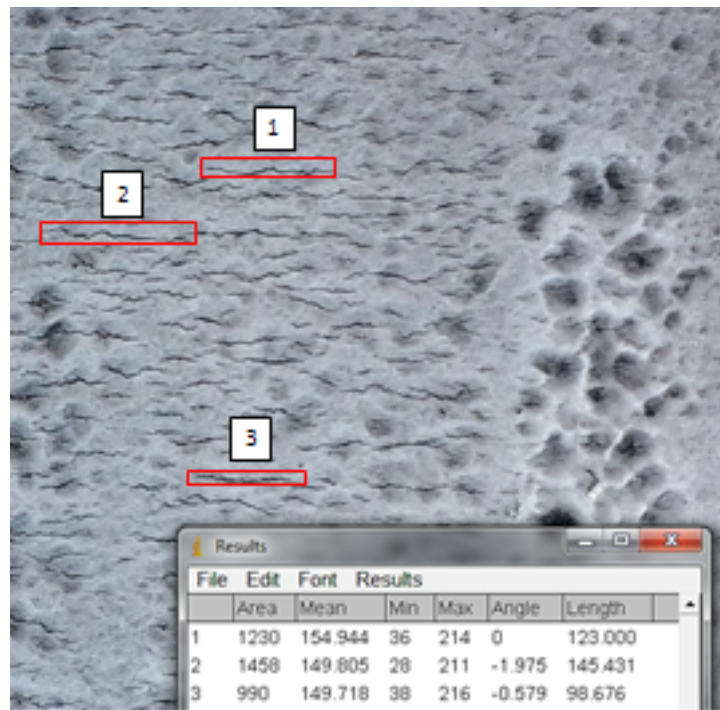


Сентябрь 2015



Масштаб	Длина, пикс.	Длина, мм.
152пикс.\ 10 мм	81,34	5,35
	96,02	6,32
	65,33	4,30

Сентябрь 2017



Масштаб	Длина, пикс.	Длина, мм.
230пикс.\ 10 мм	123,00	5,33
	145,43	6,31
	98,67	4,28