ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПОЛИТЕХ
Научно технологический комплекс новые технологии и материалы

УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ

ПРИМЕНЕНИЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБ В КАЧЕСТВЕ ЭФФЕКТИВНОГО МЕТОДА ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ УВЛАЖНЕННОГО ГАЗА



Давыдов Артем Дмитриевич
Инженер-исследователь НТК «Новые технологии и материалы»

04.09.2024. VIII Научно-техническая конференция «Коррозия в нефтяной и газовой промышленности»

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Параметры внешней эксплуатации

- Температура, градиент температур, давление
- Скорость течения
- pH внешней среды
- Сейсмические условия
- Стабильность грунтов



Параметры транспортируемой среды

- Температура
- Давление
- Физ. хим. состав (% H_20, % CO_2, % H_2S)
- КВЧ, ТВЧ (размер, форма, абразивность)
- pH-среды
- Минерализация
- Режим течения
- Скорость потока
- КНнС

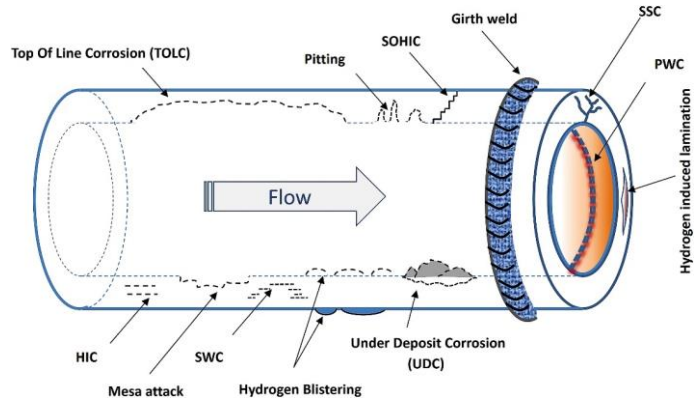
Параметры трубы

1. *Материал*
- Химический состав
- Механические свойства
- Микроструктура
- Неметаллические включения
- Факторы разнозернистости
- Полосчатость
- Остаточная текстурированность

2. Труба
- Геометрия (толщина, форма)
- Неоднородность ХС (по партиям труб)
- Качество поверхности
- Способ сварки
- Трещиностойкость
- Хладостойкость

3. Трубопровод
- Геометрия
- Способ прокладки трубопровода
- Технология сварки
- Период и условия укладки

Различные виды повреждений трубопроводов в агрессивных средах



Основные параметры выбора материала:

1) Себестоимость продукции.
2) Коррозионная стойкость.
3) Механические свойства.

Низколегированные стали – стоимость
Коррозионно-стойкие сплавы – стойкость
Биметаллические трубы – перспективный вариант

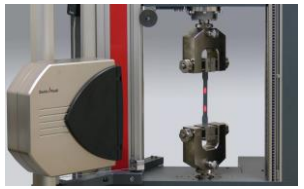
ПЛАН ИССЛЕДОВАНИЙ: Классическая матрица

Анализ структуры и механических свойств

ЭТАП 1

Подбор материалов по изначальным критериям

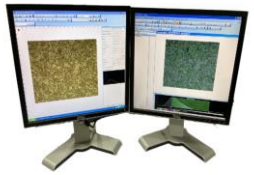
Испытания на растяжение и ударный изгиб



Определение твердости



Металлография



- Оценка микроструктуры
- Структура определяет свойства

Результаты

- Соответствие мех свойствам
- Значение ударной вязкости
- Твердость материала
- Набор структур и величин зерна для каждого образца

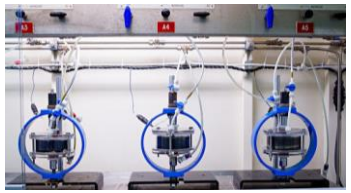
Испытания при нормальных условиях

ЭТАП 2

Сбор исходных данных:

- Фаз. состояние
- Наличие примесей
- PVT
- Мех. примеси
- Гидродинамические хар-ки

В изолированных сосудах в средах



•Общая коррозия поверхности

Испытания на сульфидное коррозионное растрескивание под напряж. (СКРН, SSC)

Испытания на водород-индуцированное растреск. (ВИР, HIC)

Электрохимические испытания



Эл-хим ячейки

Результаты

- Прогноз скорости коррозии
- Оценка устойчивости
- Общая и локальная коррозия
- Оценка мех св-в под воздействием корр. среды

Испытания при повышенных Т и Р

ЭТАП 3

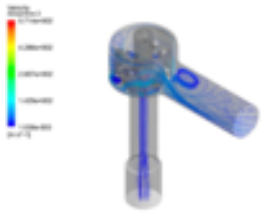
Статические автоклавные испытания



Статический автоклав

- Условия конденсации растворенной воды
- Условия забоя высокой концентрации воды

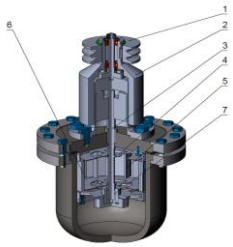
Моделирование гидродинамики



Исходные данные

Постановка эксперимента

Динамический испытания



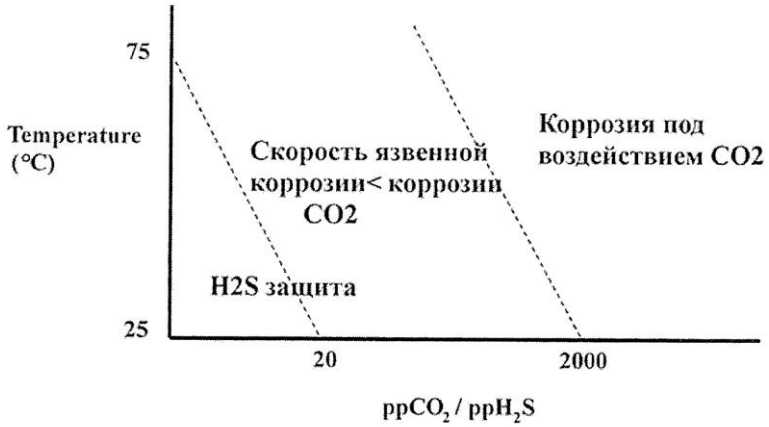
Автоклав с крыльчаткой

- Моделирование условий эксплуатации материала в присутствии потока
- Оценка скорости корр. и анализ поверхности

Результаты

- Влияние потока на протекание процессов деградации

Механизмы коррозионного воздействия, H_2S+CO_2



Влияние доли H_2S/CO_2[1]

По данным NACE, Norsok, Nalco механизм коррозии описывается через образование отложений в зависимости от соотношения H_2S:CO_2; Оценивается стабильность и защитные свойства.

Подход не учитывает:
1) Параметров и свойства материала;
2) Эксплуатационных Факторов (гидродинамики, режима течения и т.д.)

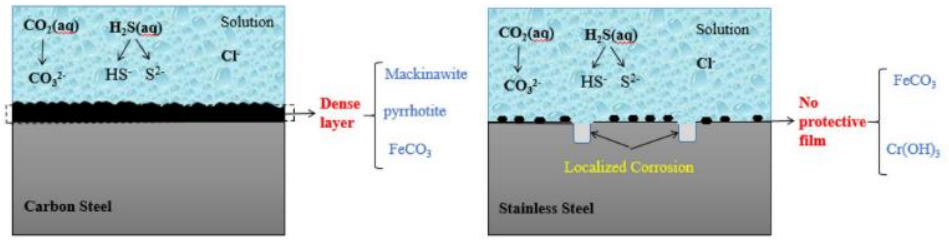


Схема воздействия среды на разные материалы[2]



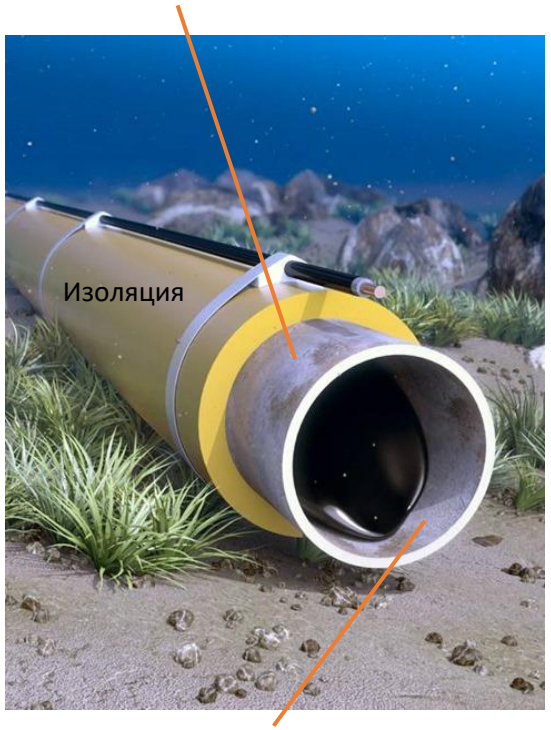
Образцы после воздействия в автоклаве H_2S/CO_2

Вывод:
Для оценки интенсивности коррозионных процессов и выбора материального обеспечения требуется проведения мультифизических испытаний

[1] Г. Шмитт, Г.Лохе, В.Бруксофф. Влияние продуктов коррозии на эффективность ингибиторов в среде сероводородсодержащего газа. Международный форум «Коррозия-87», г. Сан-Франциско, шт. Калифорния, 9-13 марта 1987 г.
[2] Kazemi A, Shariat MH, Hashemi B (2021) Investigation on corrosion behaviors of different zones of dissimilarly welded A312TP316L and A106Gr.B in the brine solution containing H2S and CO2. J Bio Tribo Corros 7:132–141.

Трубопровод: Особенности эксплуатации промысловой подводной трубы

Внешняя часть трубы
1) Пластичность при укладке
2) Стойкость к внешнему давлению
3) Стойкость к окружающей среде



Внутренняя часть трубы
1) Стойкость к внутренней транспортируемой среде
2) Стойкость к внутреннему давлению
3) Шероховатость (гладкость)

Параметр	Материалы			
	Углеродистые стали	Коррозионностойкие стали и сплавы	Полимерные композитные	Биметаллические
Стойкость в среде CO_2				
Стойкость в среде H_2S				
Стойкость в среде $CO_2 + H_2S$				
Стойкость к МКК				
Прочностные хар-ки				

– неприменимо

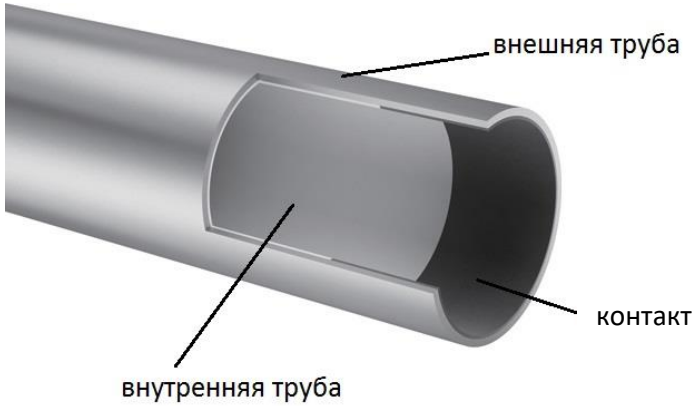
– применимо с ограничениями

– применимо

1) Внутренний лайнер из коррозионностойкого материала обеспечивает надежность от коррозии и прорыва промысловой трубы;
2) Внешняя часть трубы из низколегированной стали обеспечивает механические свойства при укладке и эксплуатации на морском дне.

Материалы: Биметаллы, материалы исследований

1. Внутренняя часть повторяет свойства и требования коррозионностойких материалов
2. Внешняя часть повторяет свойства и требования низколегированных сталей



Материал	Тип заготовки	Материал	Тип заготовки
Incoloy 825	Плакирующий слой	09Г2С	Основной металл
Incoloy 625	Плакирующий слой	08Х18Н10Т	Плакирующий слой
AISI 904L	Плакирующий слой	L450M	Основной металл
AISI 316L	Плакирующий слой	AISI 317L	Плакирующий слой
SMO 254	Плакирующий слой	Incoloy 825	Плакирующий слой

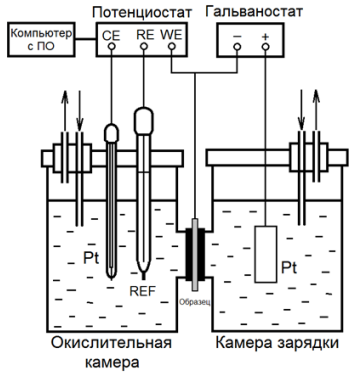
НТД для сравнения – ГОСТ/ISO 3183-2015, ГОСТ 5632-2014 и API 5LD

Особенности биметаллического исполнения трубопровода

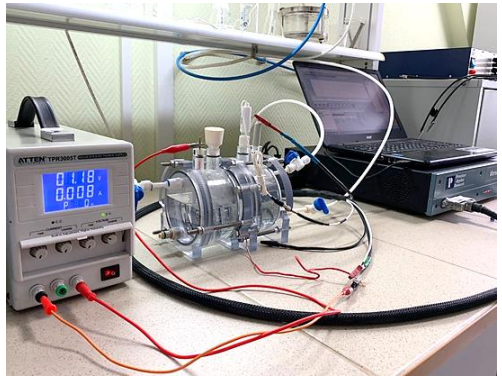
1) Необходимость адресного выбора материала плакирующего слоя;
2) Отсутствие конкретных методов контроля;
3) Высокие требования к производству.

Методика: Исследования и испытания

Двойная электрохимическая ячейка

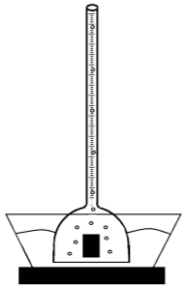


Схема



Общий вид

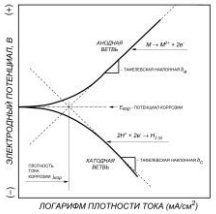
Эвдиометр

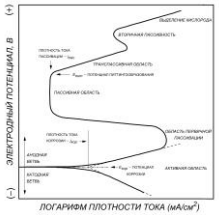


Электрохимические исследования



Потенциостат: VersaStat
Princeton Applied Research





Окислительная камера
- Раствор: 0,1М NaOH
- pH: 12,6

Камера зарядки
- Раствор: 0,5М NaCl, 6 г/л CH4N2S
- pH: 6,5
- Плотности тока зарядки: 5 мА/см^2



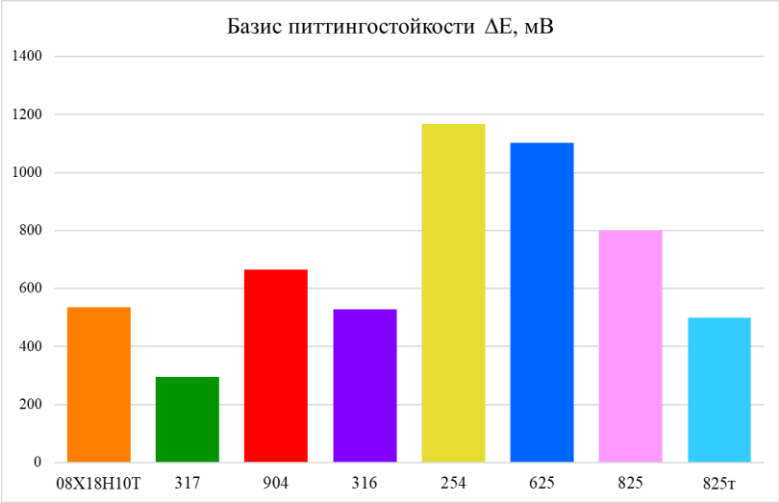


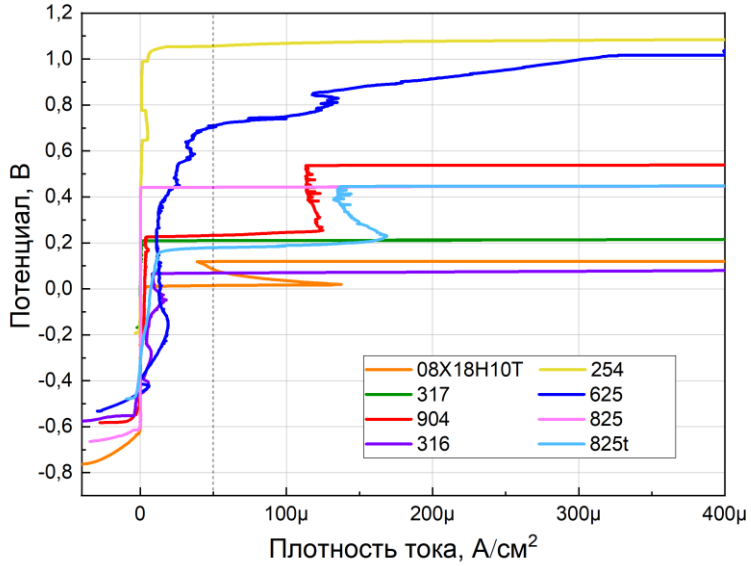
Стандартные испытания (ASTM G48, ГОСТ 6032)

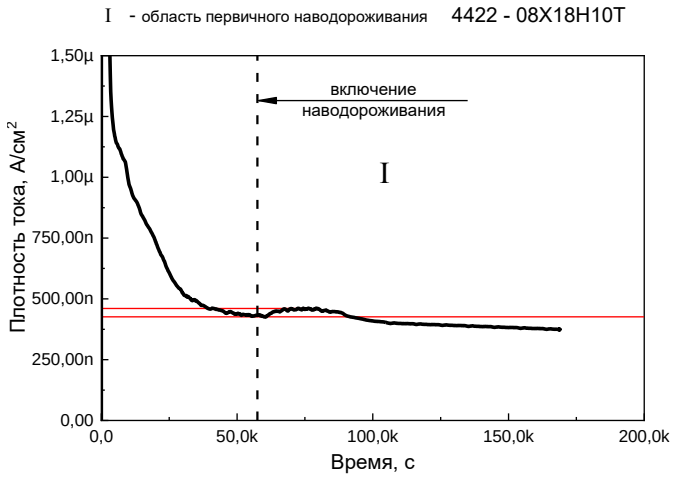


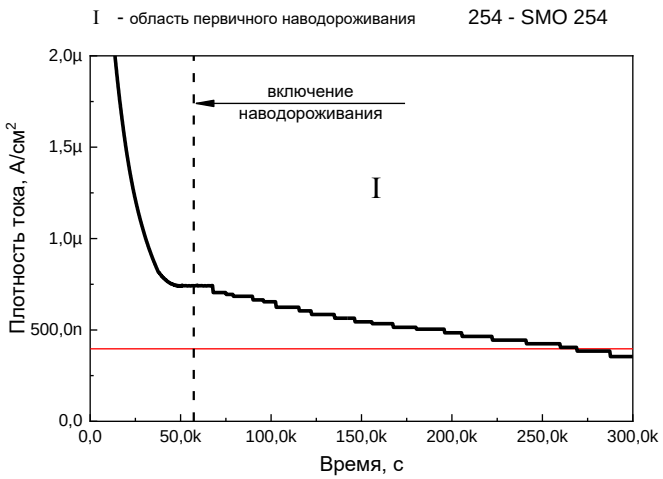
Автоклавный комплекс (статические испытания)

Результаты: электрохимические исследования и проницаемость водорода









Анализ результатов:

1) Проявление пассивации для всех исследуемых образцов;
2) Значительное отличие только в базисе питтингостойкости;
3) Низкие **теоретические** скорости коррозии;
4) Отсутствие выхода водорода и проницаемости через материал плакирующего слоя.

Результаты: испытания на стойкость к питтинговой коррозии и МКК

Маркер (материал)	Средняя скорость коррозии	PREN
	г/м²ч	ед.
08Х18Н10Т	17,2167	18,0
317L	9,9297	27,7
Inc825	2,5723	32,3
Inc825-2	4,3573	34,0
625 (Inc625)	0,0019	51,5
904 (904L)	1,4164	35,0
316 (316L)	12,4300	22,5
254 (SMO 254)	0,0056	40,2

Анализ результатов:

1) Стандартные испытания на питтинговую коррозию для общего сравнения коррелируют с PREN;
2) Отсутствие признаков МКК на всех образцах.



Анализ результатов:

1) Низкие (околонулевые) скорости коррозии по всем образцам;
2) Образование налета на образцах 08Х18Н10Т и на Inc825 от трубы;
3) Стойкость образцов в условиях **стационарного** автоклава.

Обобщение предварительных результатов: сводная таблица по материалам

Таблица относительных показателей в рамках сравнения между материалами

Марка стали	Автоклавные испытания (статическая модель)	Питтинговая коррозия (ASTM G48)	МКК (ГОСТ 6032)	Электрохимические исследования (модель)	Проницаемость водорода
08Х18Н10Т	+	-	+	-+	+
317L	+	-+	+	+-	+
Inc825-2	+	+-	+	+	+
Inc825	+	+-	+	+	+
Inc625	+	+	+	++	+
904L	+	+	+	+	+
316L	+	-	+	-+	+
SMO 254	+	+	+	++	+

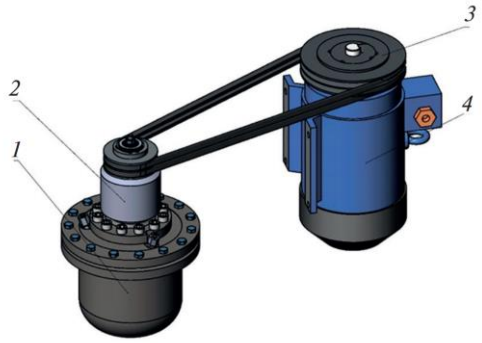
Стойкость
Ограничения
Низкая стойкости

1) Показательность стандартного испытания
2) Отсутствие качественных данных после статических автоклавных испытаний

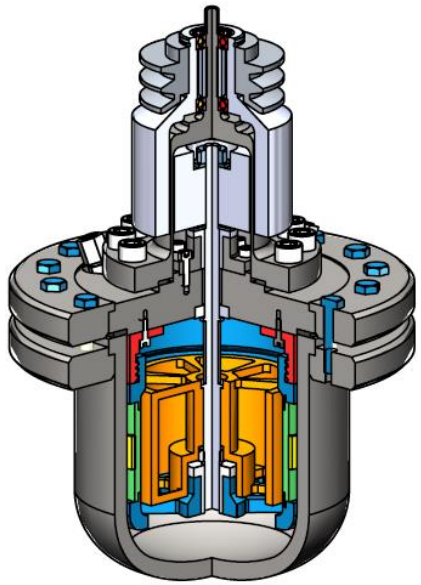
Выводы по этапу:

1) Высокая стоимость Incoloy 825 и 625;
2) Перспективные материалы: SMO 254, 904L, 317L и 316L;
3) Статические модели не в полной мере отражают воздействие среды.

Стенд: Динамический автоклав



1 - автоклав, 2 - магнитная муфта,
3 - клиноременная передача,
4 - электродвигатель



3D модель конструкции

Характеристики

- Рабочая температура ≤ 150 °C
- Рабочее давление 150 бар
- Скорость потока 1-20 м/с
- КННС – до 50 Па

Кейс:



20XM **0,247 мм/год**

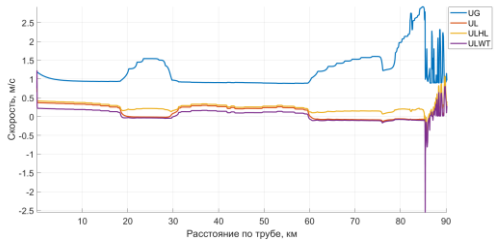
20XM **0,722 мм/год**

13 Cr **0,00 мм/год**

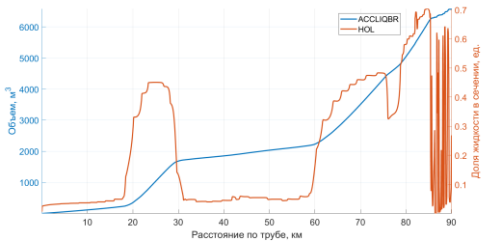
13 Cr **0,02 мм/год**

Создание подробной модели потока:

1) Трассировка трубопровода;
2) Корректировка трассы с учетом перепадов высот;
3) Оценка параметров и свойств трубопровода: материальное исполнение;
4) Учет условий окружающей среды: перепады температур, давления, времени года.



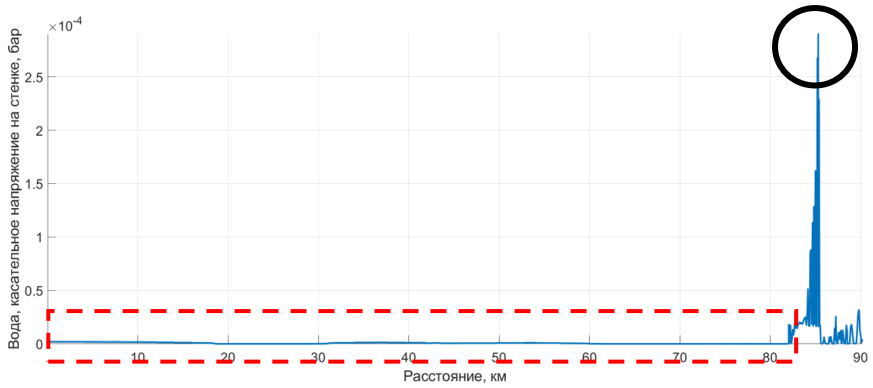
Расчет скоростей течения фаз



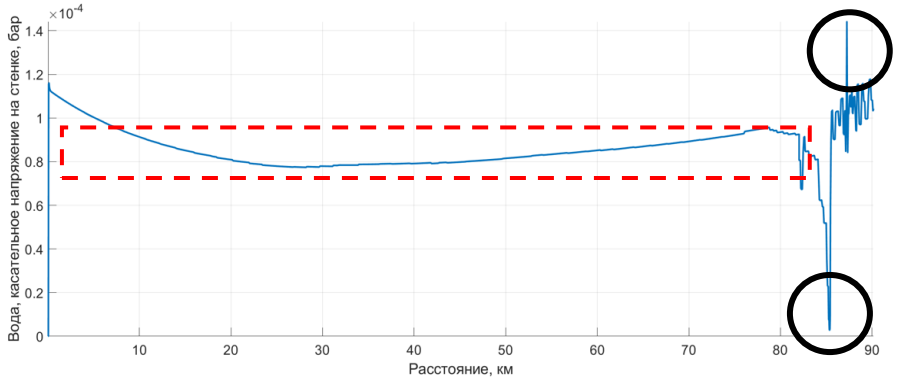
Степень накопления жидкости

Моделирование: Гидродинамика. КННС

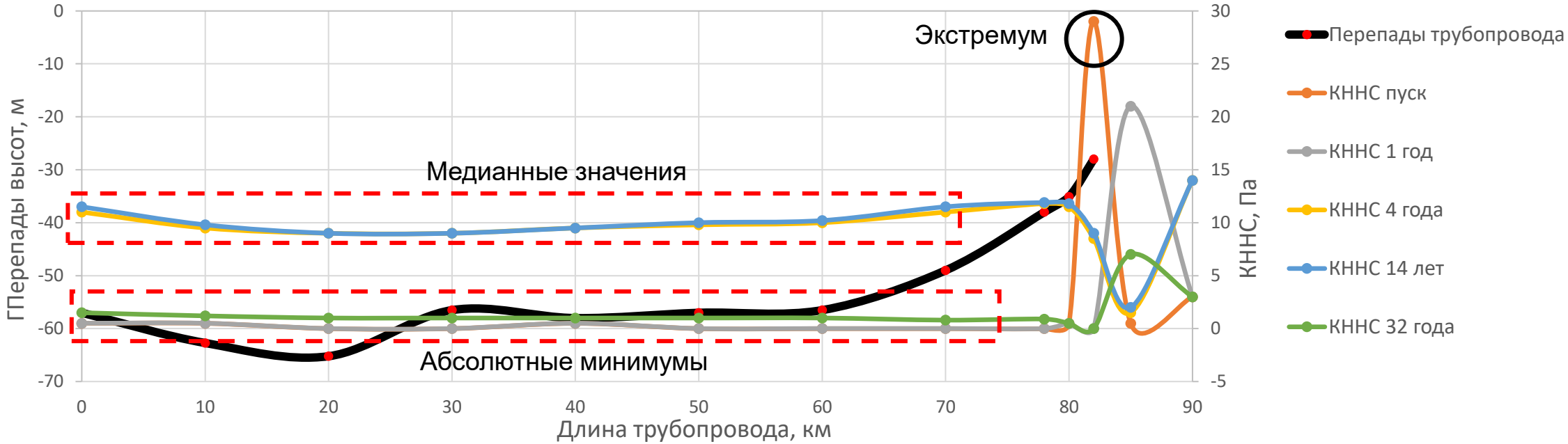
Расчет КННС выполнялся для разного времени эксплуатации, времени года и срока.
По результатам моделирования оценивались КННС для водной фазы в трубопроводе.



Первые годы



4-5 год эксплуатации



Заключение

Проведены масштабные сравнительные испытания материалов в стандартных и модельных средах.

Результаты испытания материалов: 08Х18Н10Т; AISI 317L; Incoloy 825; Incoloy 825; Incoloy 625; AISI 904L; AISI 316L; SMO 254 показали, что:

- Все материалы соответствуют требованиям к химическому составу, описанным в API 5LD;
- Результаты испытаний на стойкость к общей коррозии показывают низкие значения.

Выполнено математическое моделирование процессов гидродинамики потока;
Выбраны условия для динамических испытаний.

Спасибо за внимание!