ПОЛИТЕХ
Научно технологический комплекс новые технологии и материалы

ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Современные подходы к физическому моделированию коррозионных и эрозионных процессов в стендовых газогидродинамических комплексах

Демьянов Григорий Владимирович
Голубев Иван Андреевич

НТК Новые технологии и материалы
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого



Подходы к описанию мультифизических процессов в трубопроводе

ПОЛИТЕХ Научно технологический комплекс новые технологии и материалы

ПОЛИТЕХ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Объект

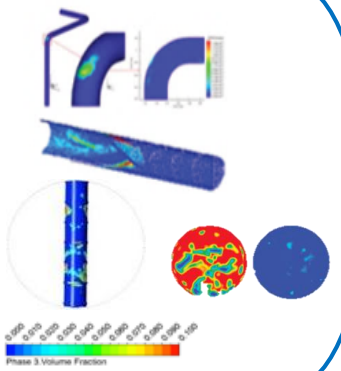
Идентификация объекта

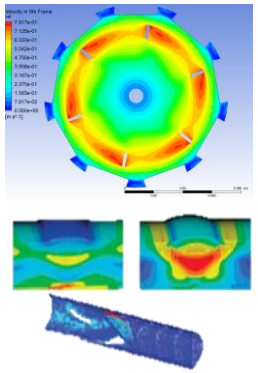
Математическая модель эксперимента

Математическая модель коррозионно-эрозионного износа



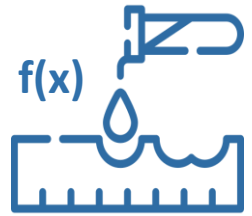












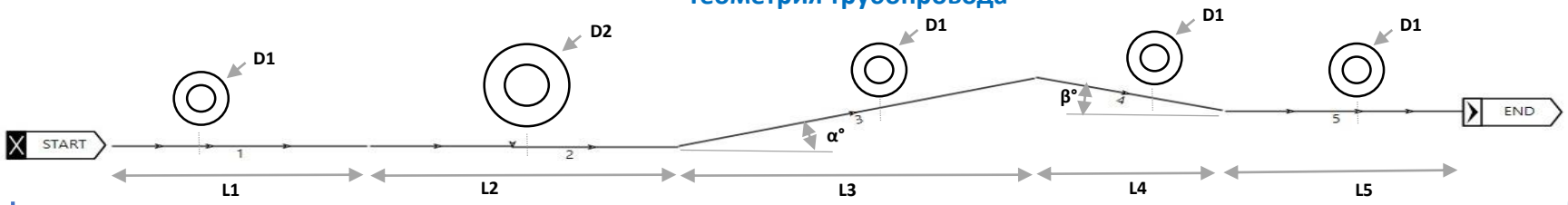
Газогидродинамическая модель объекта

Физические эксперименты

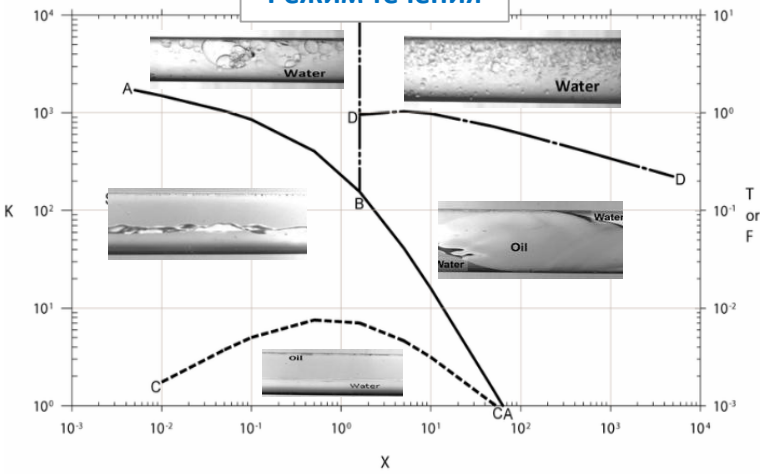
Обеспечение надежности трубопроводов

Полномасштабная газогидродинамическая модель трубопровода

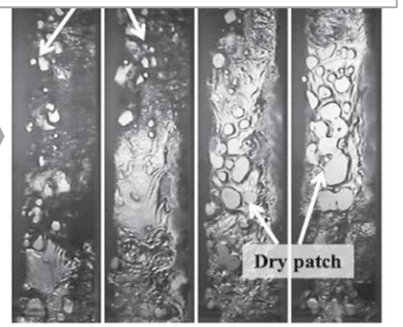
Геометрия трубопровода



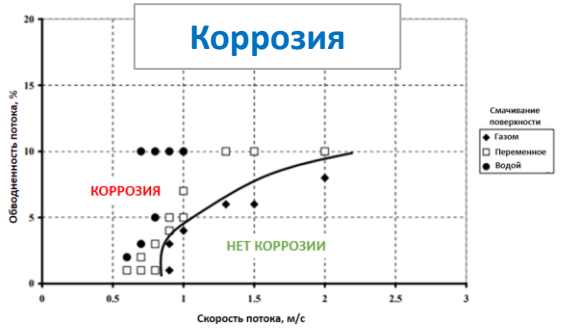
Режим течения



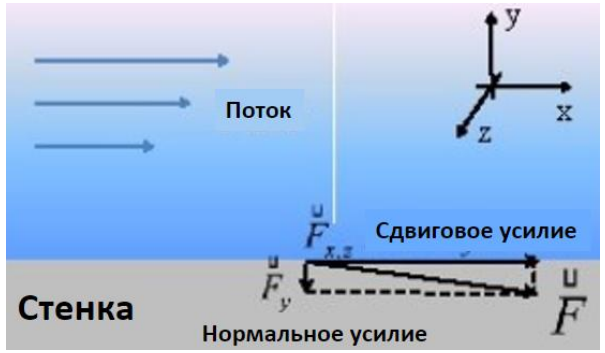
Смачивание поверхности



Коррозия



Касательные напряжения на стенке (КНнС)



Модель коррозии

PVT

- Фазовое состояние
- Вязкость
- Плотность

Возможность использования результатов сторонних PVT симуляторов

Текущие подходы к лабораторным испытаниям

Испытания в ячейках



Учитывает: атмосферное давление, стационарная среда, концентрация CO_2 до 1,7 г/л

Не учитывает: T, $P_{общ}$, P_{CO2},

НТД: ТТТ-01.02.04-01 ПАО «Газпром нефть»; методика ЗАО НИПЦ «НефтеГазСервис»; методика АО «РусНИТИ»

Стандартизированные лабораторные испытания при приемо-сдаточном контроле продукции

Моделирование механизмов ***общей коррозии***

U-образная ячейка



Учитывает: атмосферное давление, динамическая среда

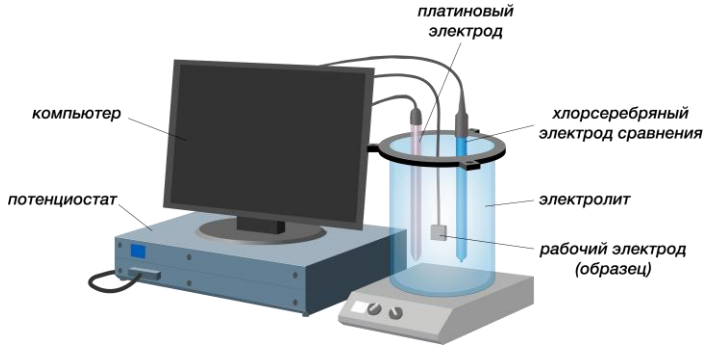
Не учитывает: T, $P_{общ}$, $P_{CO2.}$ многофазный поток

НТД: СТО Газпром 9.3-007-2010

Лабораторные испытания ингибиторов коррозии

Моделирование механизмов ***общей коррозии***

Электрохимическая ячейка



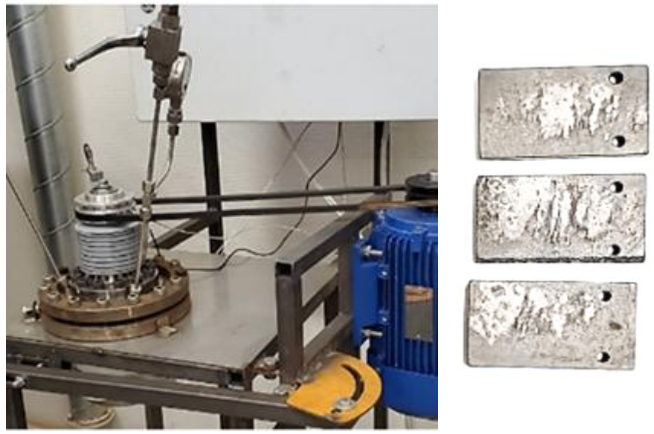
Учитывает: атмосферное давление, стационарная среда

Не учитывает: T, $P_{общ}$, P_{CO2}

НТД: ASTM G59

Лабораторные испытания ингибиторов коррозии, ранжирование материалов по коррозионной стойкости, ***оценка максимально возможной скорости коррозии для данного материала*** *в данных условиях, определение электрохимического потенциала материала*

Автоклавные испытания



Учитывает: повышенное давление, стационарная/динамическая среда, повышенная температура

Недостатки: Используется ряд технических допущений, приводящих к низкой достоверности и сходимости результатов с реальными объектами.

НТД: ASTM G170

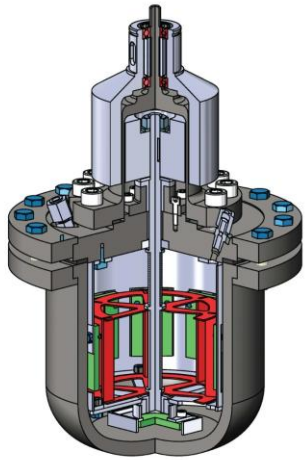
Лабораторные испытания, моделирующие условия эксплуатации

Моделирование ***механизмов общей, локальной (язвенной, питтинговой, мейза-коррозии)***

Подходы к стендовым испытаниям

ОБЩАЯ КОРРОЗИЯ

Динамический автоклав



- Высокие температуры и давления
- Воссоздание процессов гидродинамики и скорости потока
- Воссоздание КНнС
- Гравиметрические исследования



TOL

Стенд «flow-loop» коррозионно-эрозионных испытаний



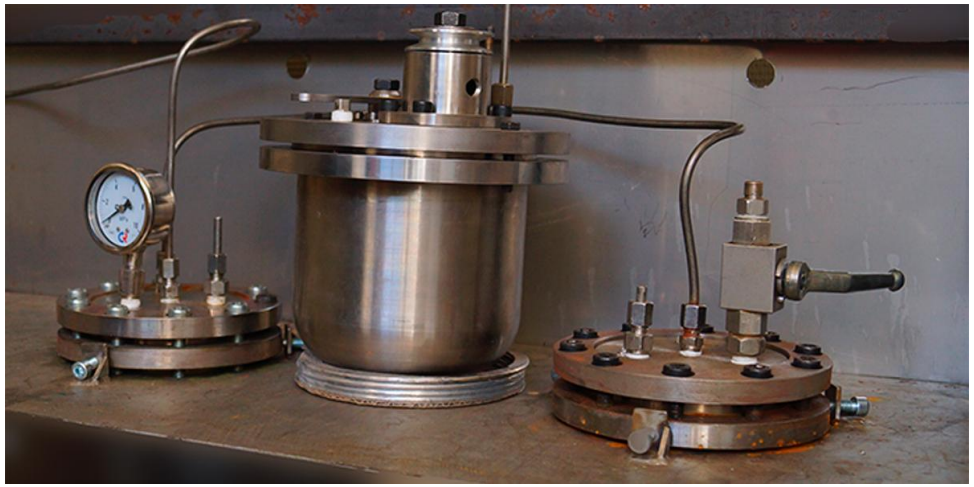
- Высокие температуры
- Низкое давление
- Воссоздание процессов эрозионного и коррозионного износа одновременно
- Воссоздание процессов конденсации
- Электрохимические исследования
- Гравиметрические исследования

ЛОКАЛЬНАЯ КОРРОЗИЯ

BOL

Автоклавный комплекс

Статические автоклавы



Характеристики:

- Температура до 300°С
- Давление до 150 бар
- Объем от 1.5 до 10 л

Автоклав изгиб с вращением



Характеристики:

- Температура до 300°С
- Давление до 150 бар
- Объем 1.5 л

Динамический автоклав



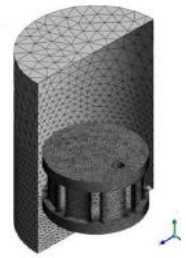
Характеристики:

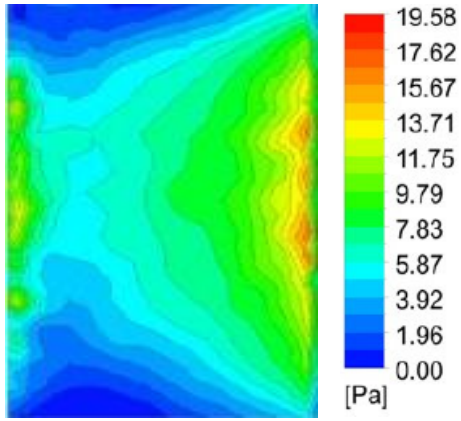
- Температура до 150°С
- Давление до 150 бар
- Объем 2 л
- Скорость потока 1–20 м/сек
- Воспроизводимый уровень КНнС до 50 Па

Эквивалентность условий испытаний с объектом

Стандартная конструкция автоклава с мешалкой из ASTM G170-06







С неравномерным распределением КННС по образцу

Единообразие условий от эксперимента к эксперименту

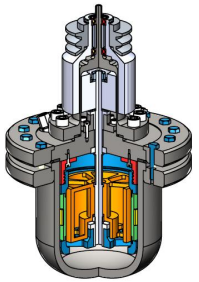
Не отображают реальных условий работы трубопровода

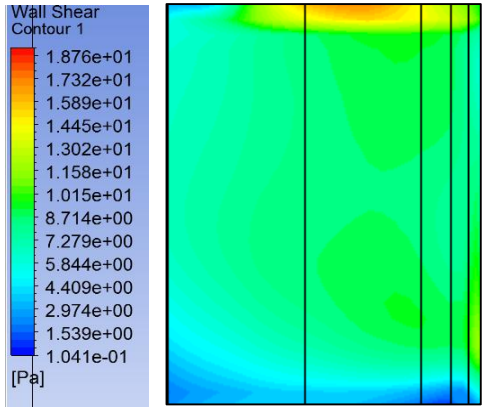
Реальные условия эксплуатации трубопроводов -
равномерное распределение КННС в трубопроводе



КННС в трубопроводе ~ КННС в стенде ASTM G170 – 06

Улучшенная конструкция автоклава с мешалкой



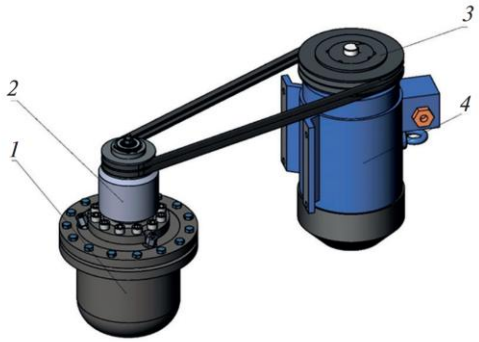


С равномерным распределением КННС по образцу

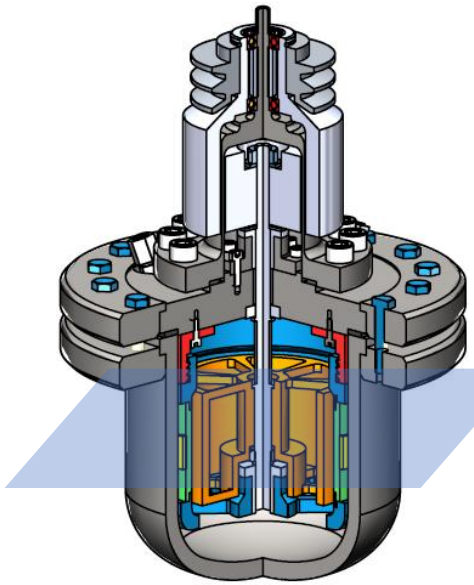
Единообразие условий от эксперимента к эксперименту

Отображают реальные условия работы трубопровода

Стенд Динамический автоклав

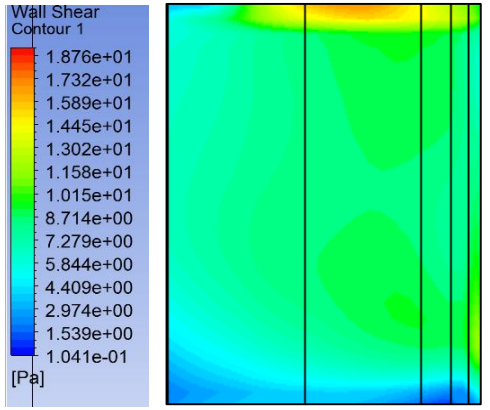


1 - автоклав, 2 - магнитная муфта,
3 - клиноременная передача,
4 - электродвигатель



3D модель конструкции

Цифровая копия стенда



Используемое ПО:
Ansys CFX

Размерность модели:
3Д

Управляемые параметры:
- **свойства флюида**
- **скорость вращения мешалки**

Учет параметров:
турбулентность в пристеночной области

Характеристики

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

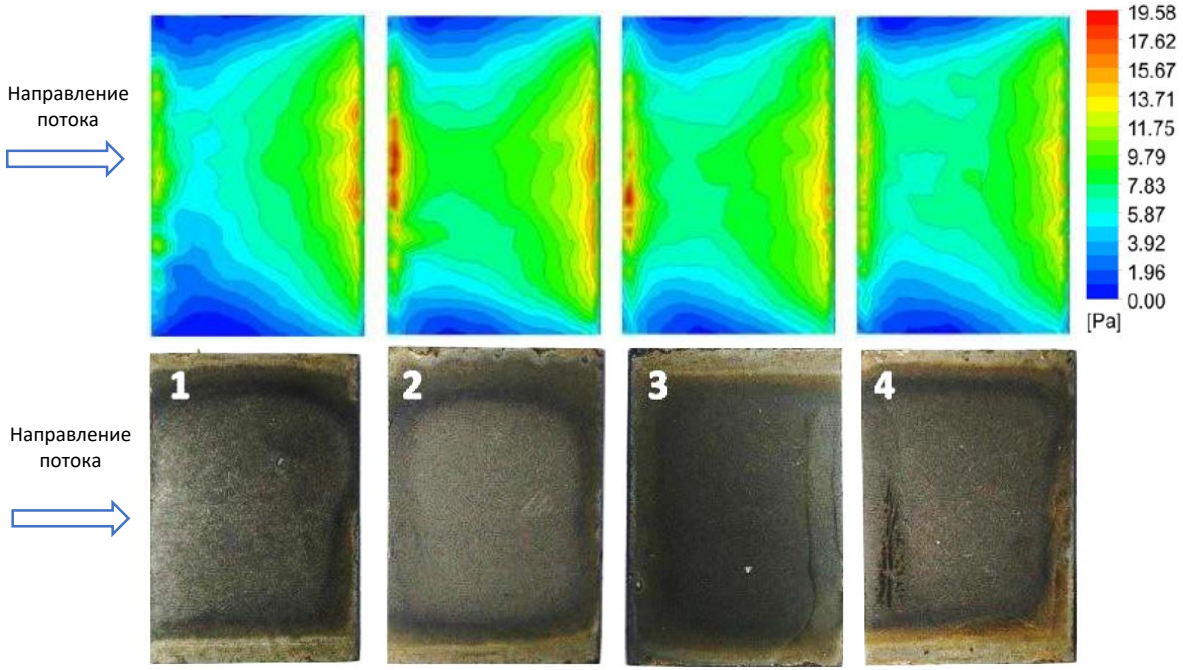
Решаемые задачи

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

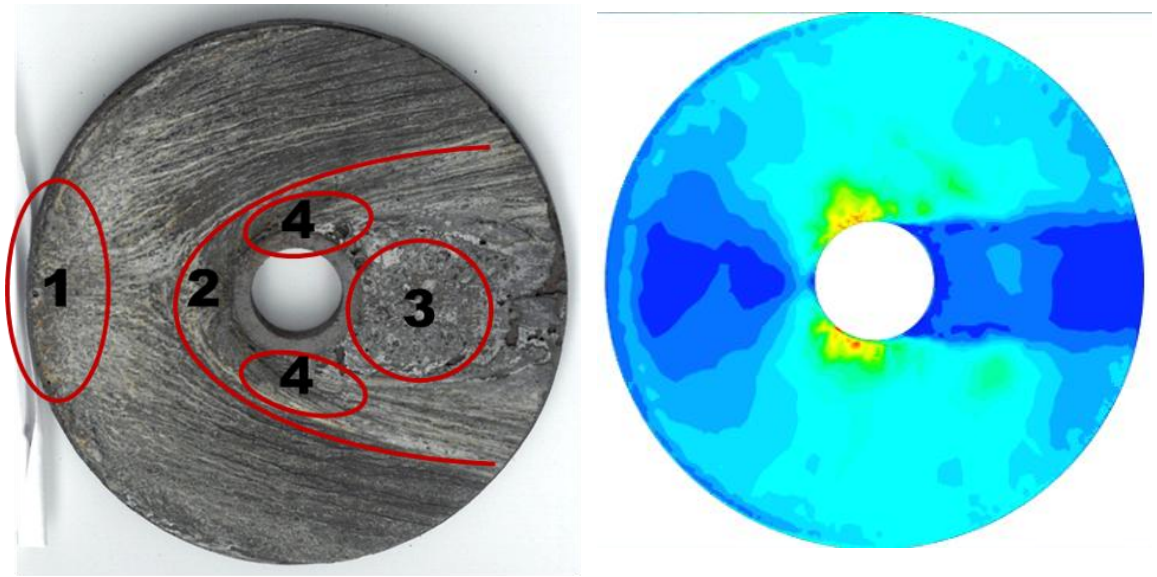




Взаимосвязь касательных напряжений и распределения продуктов коррозии



Качественная сходимость распределения КНнС в модели с износом поверхности после испытаний*

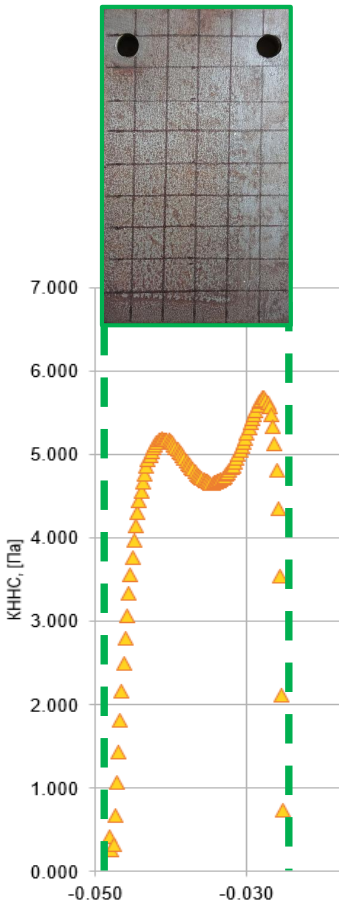


Количественная сходимость коррозионных потерь на образцах УКК с распределением КНнС по поверхности

*Souza R. C. et al. The Influence of Rotating Cage Geometry and Baffles on the Wall Shear Stress Equation in Sweet/Sour Corrosion //Materials Research. – 2022. – Т. 25. – С. e20210487.

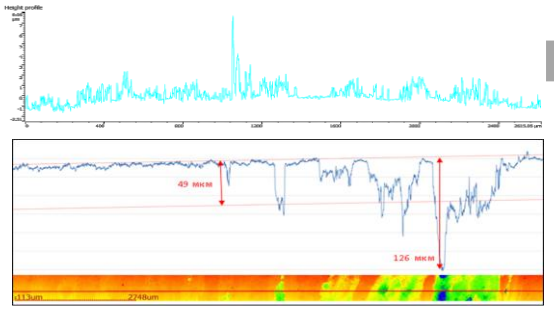
1 Распределение КНнС

Моделирование

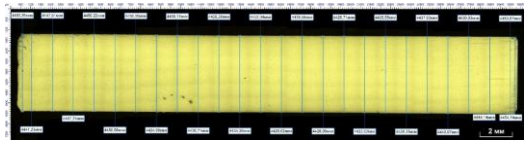


2 Анализ рельефа поверхности после испытаний

Оптический профилометр



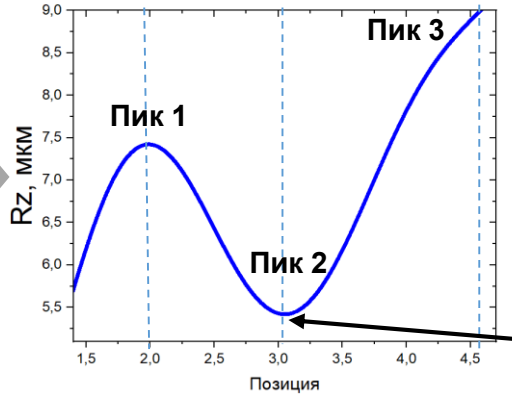
Металлография



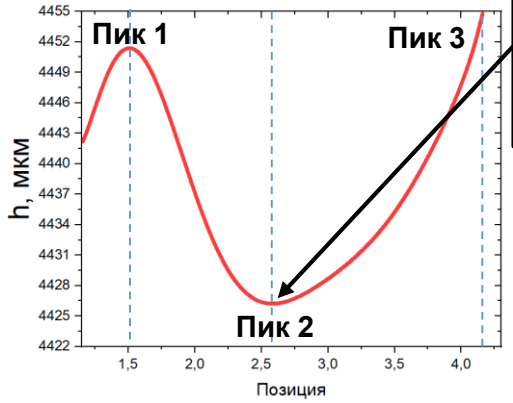
Внешний вид рельефа поверхности

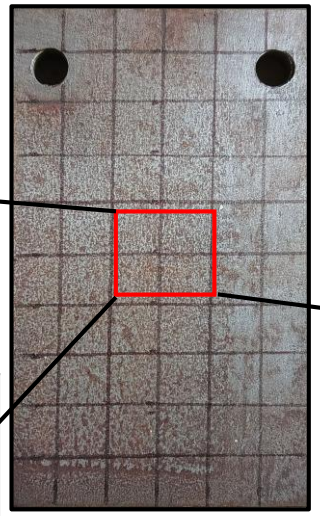
3 Сопоставление результатов и установление взаимосвязи

Оптический профилометр

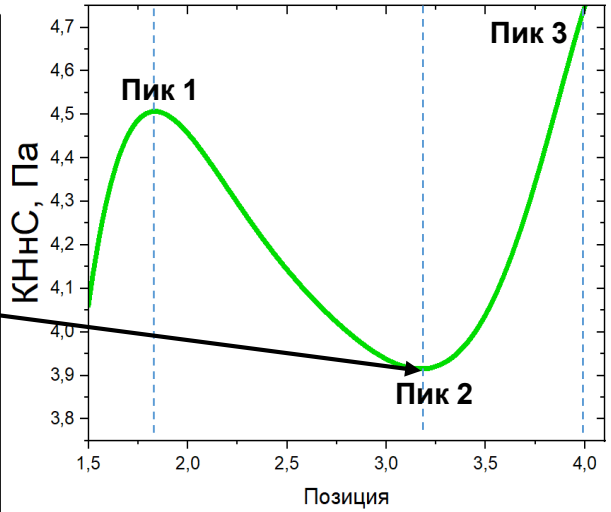


Металлография





МОДЕЛИРОВАНИЕ



92%

Совпадение модели и рельефа поверхности

Распределение КНнС совпадает с рельефом поверхности образца после испытаний на **92%**

Стенд коррозионно-эрозионного износа



Технические характеристики

- давление - атмосферное
- расход до 10 $м^3$/ч

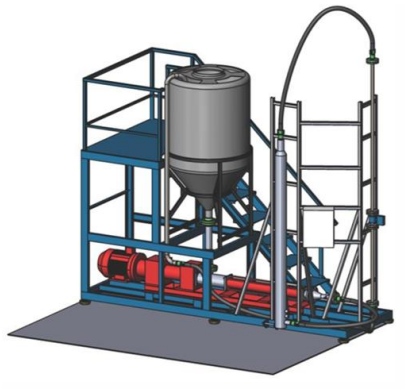
Достоинства:

- испытания с контролем гидродинамики
- моделирование режима течения
- контроль эрозионных частиц

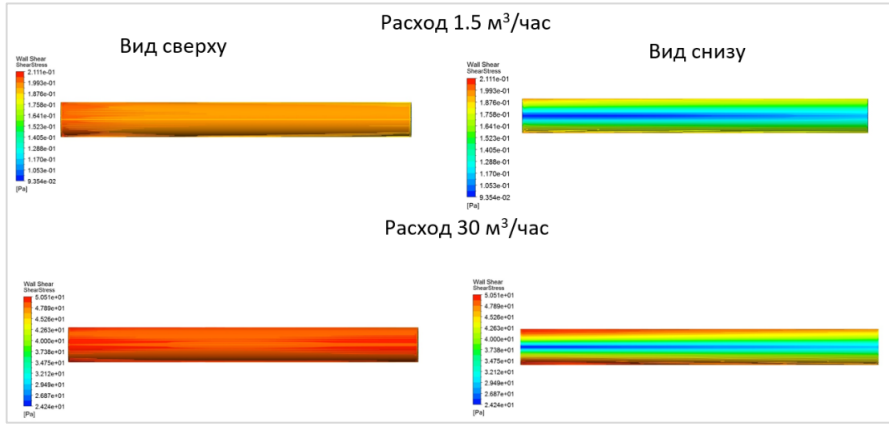
Недостатки:

- негерметичный контур
- нет участка контроля деградации в процессе испытаний
- нет участка контроля режима потока

Модель стенда коррозионно-эрозионного износа

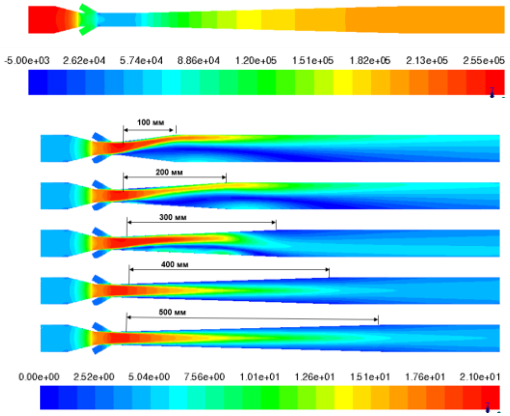


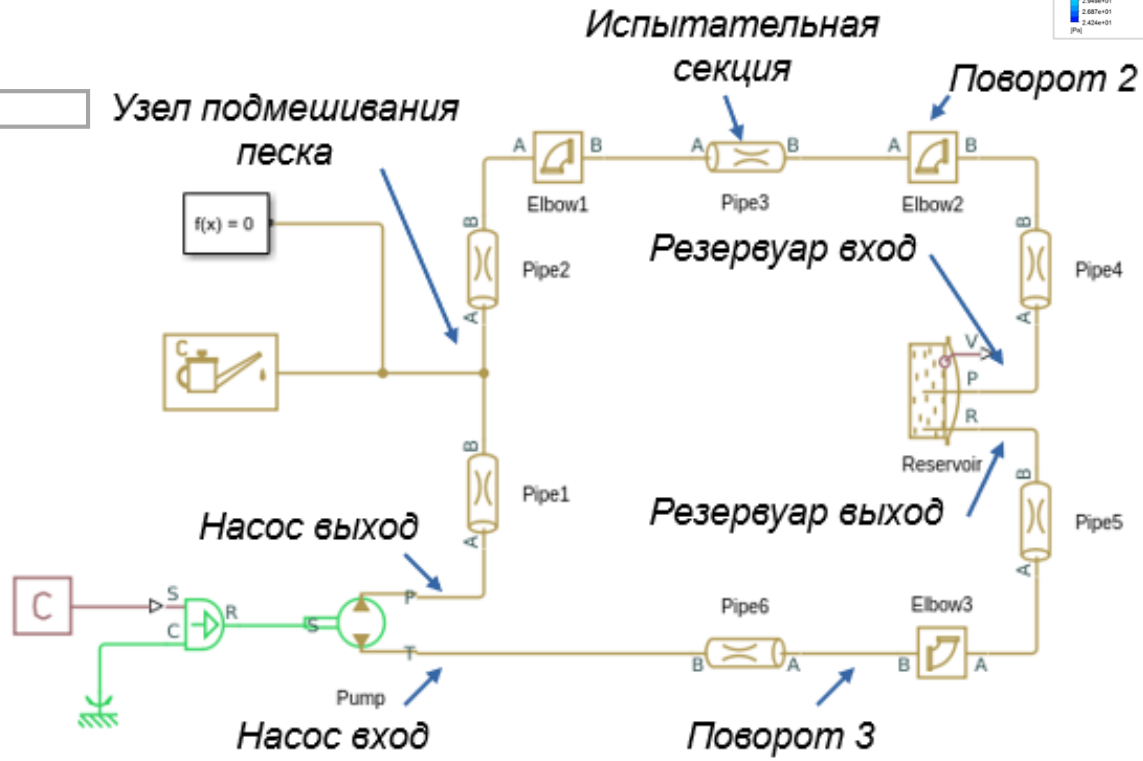
Создание параметрических моделей для оценки и контроля параметров. Получение сходимости испытаний с условиями объекта



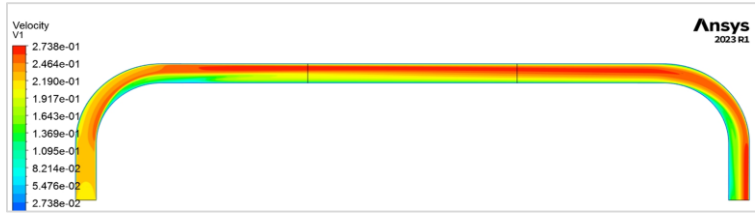
Испытательная секция

Узел подмешивания песка

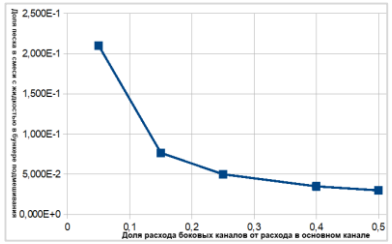




Моделирования КННС



Оптимизация конструкции



Определение режима подачи песка

Испытательная секция

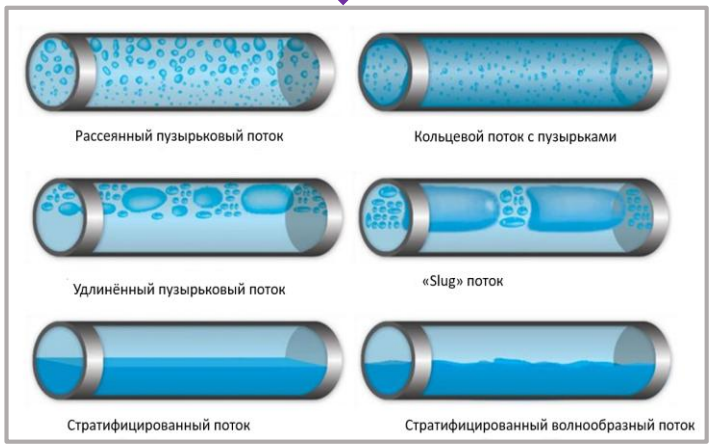
Узел контроля течения

Верхняя образующая

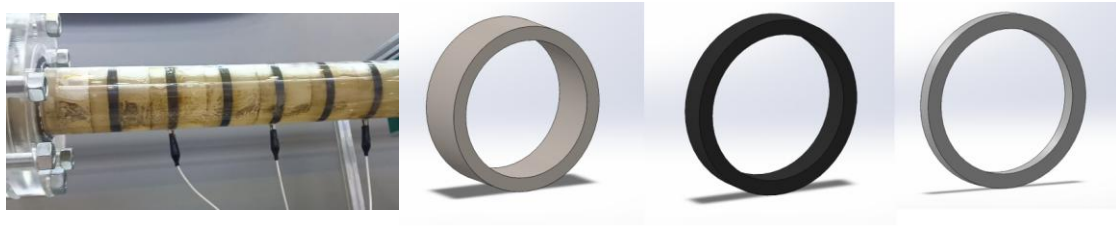


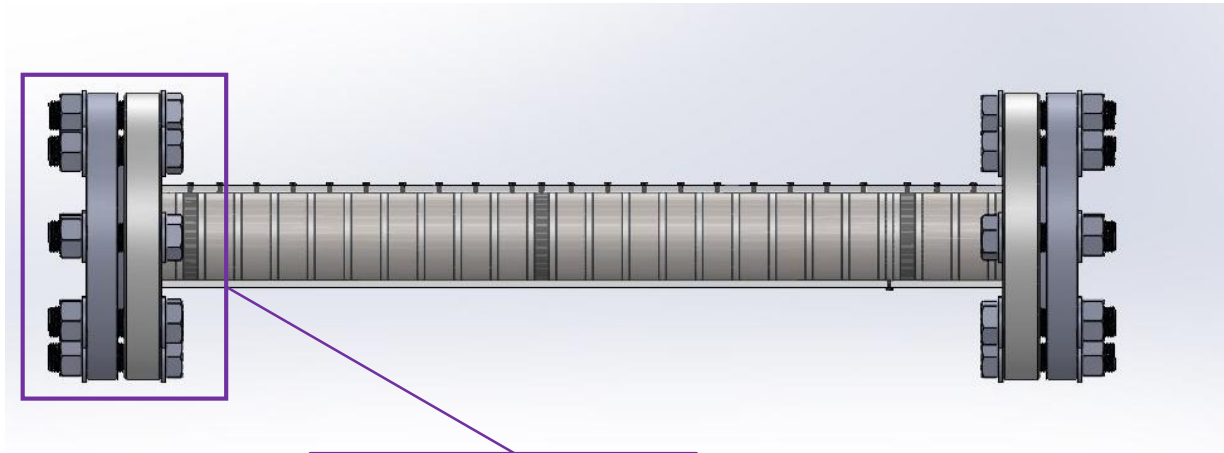
Нижняя образующая

Режимы течения



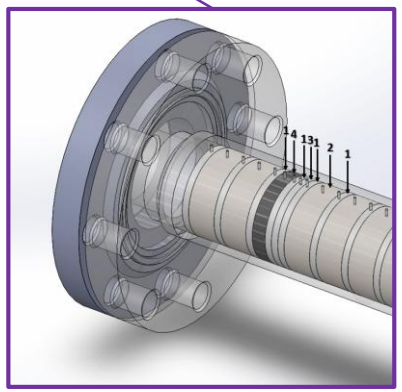
LPR секция





Технические характеристики стенда:

- давление до 3 бар
- максимальный расход - 10 м^3/ч
- проточная часть – нержавеющая сталь, органическое стекло, участки трубопровода



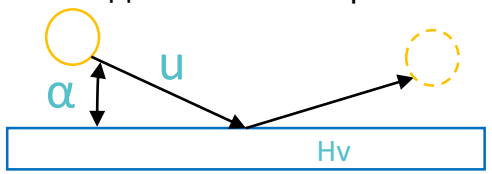
Получаемые данные:

- Расход
- Давление
- Температура
- Потеря массы образца
- Режим течения
- Скорость коррозии через LPR

Разработка модели эрозии

Базовая модель эрозии Ока

для 1-й частицы



Общая эрозия

$$\mathrm{E}(\alpha) = g(\alpha) \cdot E_{90}$$

Эрозия под углом 90°

$$E_{90} = K(\alpha H_V)^{k_1} \cdot \left(\frac{u}{u_{ref}}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{D}{D_{ref}}\right)^{k_3}$$

Эрозия под произвольным углом

$$g(\alpha) = (\sin\alpha)^{n_1} \cdot \left(1 + H_V(1 - \sin\alpha)\right)^{n_2}$$



Эрозионные испытания

Настройка модели с помощью эмпирических коэффициентов

$n_1, n_2, k_1, k_3, k_2, u_{ref}, D_{ref}, K$

Оптимизированная модель эрозии

Сходимость эксперимента и модели более 90%

Новый алгоритм расчета эрозии

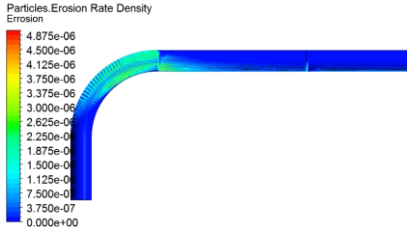
Данные по трубопроводам с объекта:

- геометрия
- расход
- концентрация частиц

База данных CFD

	zone	speed	tube_length	particle_diameter	particle_concentration
1	5.0	2.3	100.0	0.00015	9.999851158711 08e-06
2	4.0	2.3	100.0	0.00015	9.999851158711 08e-06
3	6.0	1.3	100.0	0.00015	.000091574027 0223e-05
4	3.0	2.3	100.0	0.00015	9.999851158711 08e-06
5	5.0	2.3	100.0	0.00015	0.000799926583 5401359
6	4.0	2.3	100.0	0.00015	0.000799926583 5401359
7	1.0	2.3	100.0	0.00015	9.999851158711 08e-06
8	6.0	1.3	100.0	0.00015	0.000800127671 167974
9	5.0	2.3	100.0	0.00015	0.009999851158 711081
10	4.0	2.3	100.0	0.00015	0.009999851158 711081
11	3.0	2.3	100.0	0.00015	0.000799926583 5401359

Расчет скорости эрозионного износа



Границы применимости модели:

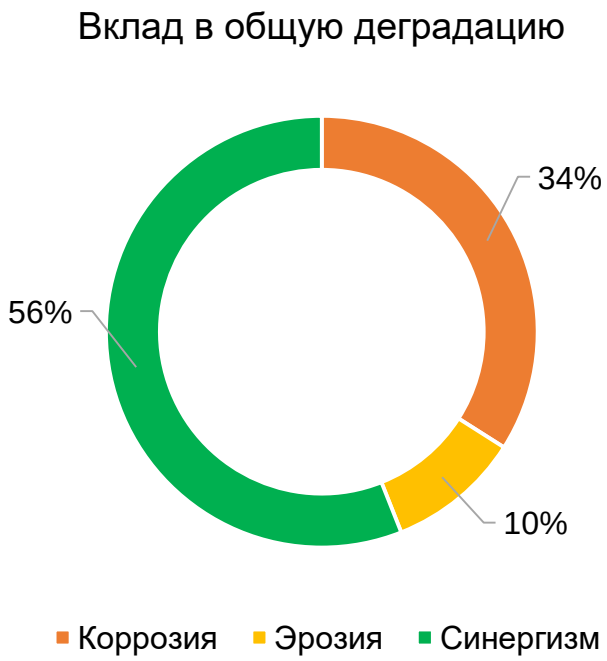
Скорость потока от 0,3 до 15 м/с

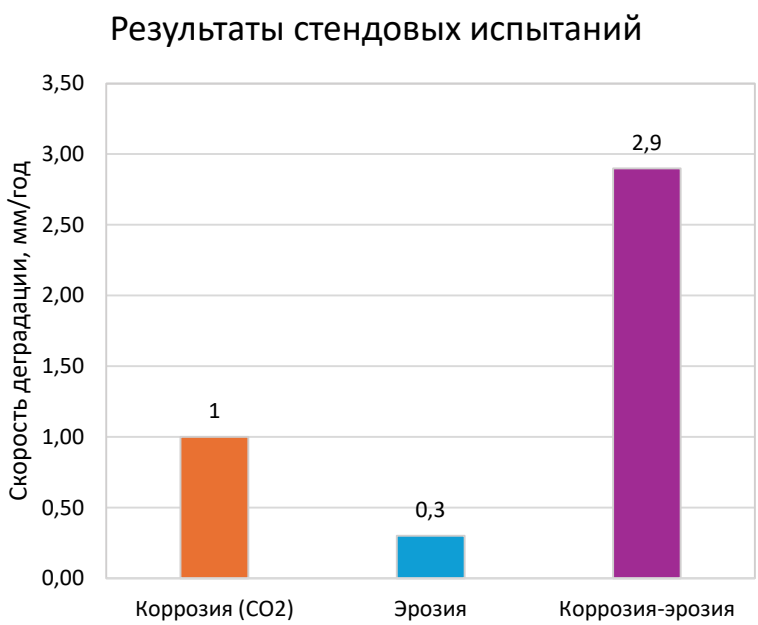
Концентрация частиц от 0,00001 до 7 г/л

Диаметр частиц от 150 до 700 мкм

Коррозия-эрозия. Синергетический эффект







Общая деградация = Чистая коррозия + Чистая эрозия + Эффект влияния эрозии на коррозию + Эффект влияния коррозии на эрозию

Синергизм

$$WL_{EC} = CR_{PC} + ER_{PE} + \Delta Syn$$

WL_{EC} – общая деградация материала при коррозии-эрозии
CR_{PC} – значение коррозии, полученное из модели коррозии
ER_{PE} – значение эрозии, полученное из модели эрозионного износа
ΔSyn – коэффициент синергии, полученный по результатам испытаний

Заключение

ПОЛИТЕХ
Научно технологический комплекс новые технологии и материалы

ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

- Представленный подход к физическому моделированию в стендовых газогидродинамических комплексах позволяет максимально приближенно воспроизводить реальные условия эксплуатации трубопровода

- Комбинация гидродинамического подбора режимов и учета ключевых факторов — давления, температуры, касательных напряжений, pH, концентрации коррозионно агрессивных компонентов — обеспечивает достоверную оценку коррозионной и эрозионной стойкости материалов

- В совокупности это дает возможность не только прогнозировать сроки службы трубопровода, но и формировать научно обоснованные рекомендации по выбору материалов и защитных технологий

