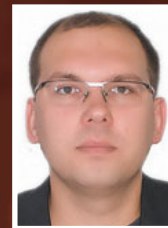


МОДЕЛЬ РАСЧЕТА УДЕЛЬНОЙ АВАРИЙНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ ПО ДАННЫМ ВНУТРИТРУБНОЙ ДИАГНОСТИКИ И УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

ЮДИН Павел Евгеньевич
 Директор по науке
 ООО «НПЦ «Самара», к.т.н.



ПЕТРОВ Сергей Степанович
 Начальник аналитического отдела
 ООО «НПЦ «Самара», к.ф.-м.н.

Н и для кого не секрет, что с каждым годом интенсивность коррозионных процессов в нефтяной промышленности только увеличивается. При этом наблюдается снижение удельной аварийности, что стало возможным благодаря внедрению различных методов антикоррозионной защиты. Несмотря на то, что наиболее широкое распространение на сегодняшний день получили внутренние антикоррозионные покрытия, стандартные стальные трубы без покрытий все еще активно применяются в самых разных условиях.

Металлурги совместно с научно-исследовательскими институтами постоянно ведут разработку новых марок сталей как для трубопроводных, так и для насосно-компрессорных труб (НКТ). При этом задача прогнозирования срока эксплуатации труб из экспериментальных марок сталей на длительный промежуток времени остается актуальной.

В рамках решения данной задачи специалисты ООО «НПЦ «Самара» разработали алгоритм, позволяющий моделировать нелинейные коррозионные процессы внутренней поверхности трубопроводов по данным внутритрубной диагностики и ультразвукового контроля.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА АВАРИЙНОСТИ ТРУБОПРОВОДА

На сегодняшний день существует несколько основных методов расчета удельной аварийности трубопроводов.

В первую очередь это проведение лабораторных испытаний. Главное преимущество данного метода – высокая оперативность получения данных. Как правило, самая длительная экспозиция не превышает 30 суток. Коррозионная среда может быть на основе H_2S и CO_2 , а благодаря автоклавным стендам испытания могут проводиться при повышенных давлениях и температуре.

Однако в лаборатории не всегда возможно смоделировать динамично меняющиеся условия эксплуатации трубопровода. Это делает точное прогнозирование практически не реальным, в связи с чем лабораторные испытания применяются преимущественно

для сравнения различных материалов и экспресс-оценки качества труб.

Альтернативой лабораторным испытаниям могут служить опытно-промышленные испытания (ОПИ) на байпасных стендах, позволяющие получать данные о реальной коррозионной стойкости труб из различных марок сталей. Для изготовления испытательных катушек применяются патрубки длиной около 1 м, а получаемые данные распространяются на всю трубную продукцию.

Однако в данном методе применяются фланцевые соединения, а, как показали результаты многочисленных ОПИ, максимальная скорость коррозии наблюдается именно в зоне фланца, а на удалении 300-500 мм может снижаться до фоновых значений (рис. 1). Это обусловлено тем, что производители арматуры не успевают за производителями труб и для производства экспериментальных катушек приходится использовать фланцы из классических сталей. Даже при незначительной разности потенциалов скорость развития коррозионных процессов может существенно расти.

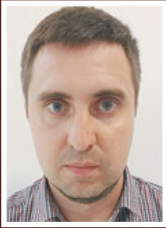
Помимо указанных недостатков, следует учитывать, что байпасные стенды, как правило, строятся на технологических площадках, и еще одним не учитываемым фактором становятся технологические воздействия, например, в виде блуждающих токов.

Таким образом, можно сказать, что самый достоверный (и затратный) метод расчета – испытания экспериментальных промышленных трубопроводов. Для этих целей на выбранном участке строится трубопровод длиной несколько километров, на котором впоследствии проводится периодическая внутритрубная диагностика (ВТД) и позонный ультразвуковой контроль (УЗК) в стационарных шурфах. Такой подход активно реализуется АО «ВМЗ» при испытаниях стали 05ХГБ. К недостаткам данного подхода можно отнести высокую стоимость испытаний, так как необходимо проведение нескольких операций по ВТД и УЗК.

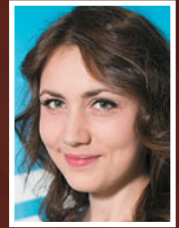
Основная задача, поставленная перед специалистами ООО «НПЦ «Самара», – создание модели, которая позволила бы за короткий промежуток време-

Рис. 1. Фрагменты испытательной катушки после проведения ОПИ





МАКСИМУК Андрей Викторович
Управляющий
ООО «НПЦ «Самара»



КНЯЗЕВА Жанна Валерьевна
Научный сотрудник ООО «НПЦ «Самара»,
аспирант ФГБОУ ВО «СамГТУ»

ни, основываясь на данных ВТД и УЗК, построить прогноз удельной аварийности трубопровода на 25 лет вперед.

При разработке методики моделирования коррозионных процессов в трубопроводе учитывалось, что скорость коррозии в различных точках трубопровода неравномерна (диапазон скоростей коррозии даже на участке длиной 1 м составляет от нуля до нескольких мм/год). Следовательно, описывать коррозионные разрушения всей поверхности трубопровода с использованием единой скорости коррозии нелогично. Необходимо использовать подход, позволяющий отразить нелинейное распределение коррозионных повреждений по поверхности трубопровода.

В этой связи наиболее логичным на сегодняшний день представляется использование функции Вейбулла, которая, по литературным данным, дает хорошую сходимость с результатами экспериментов. Однако данная функция описывает всю поверхность трубопровода. При этом по данным ВТД общая площадь дефектов на несколько порядков меньше площади поверхности трубопровода (область, описывающая язвенные повреждения, отмечена на рис. 2), что не позволяет использовать функцию Вейбулла с высокой достоверностью. Поэтому было принято решение совместить феноменологический подход и численное математическое моделирование.

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА УДЕЛЬНОЙ АВАРИЙНОСТИ ТРУБОПРОВОДА

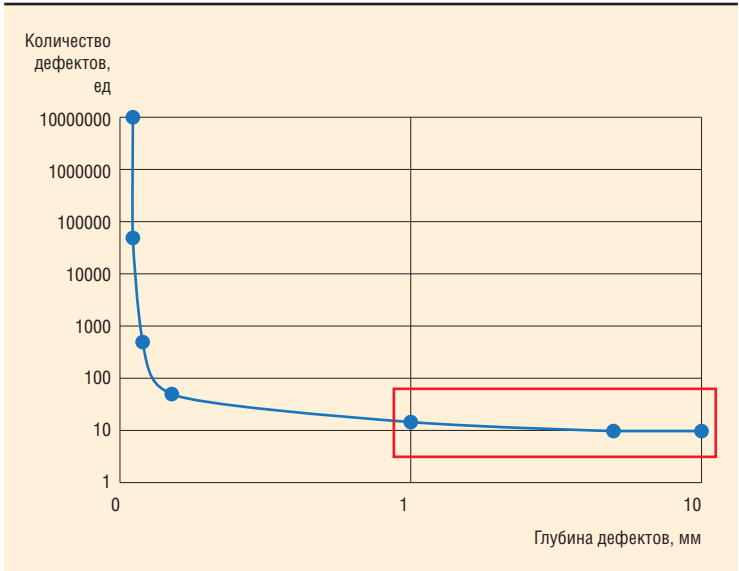
Для расчета удельной аварийности трубопровода выбранный участок разбивается на n элементарных ячеек. Каждой ячейке присваивается собственная координата $x_{i,j}$, характеризующая положение по длине трубы и углу.

Сами дефекты представляют собой полусферические образования, плоскость основания которых совпадает с внутренней поверхностью трубы. Максимальная глубина дефекта привязывается к центру полусферы, при этом за центр принимается элементарная ячейка поверхности трубы 1×1 мм.

Надо отметить, что коррозионные разрушения металла поверхности трубопровода происходят дискретно с фиксированным шагом, то есть за одну единицу времени одна элементарная ячейка может изменить свою глубину на фиксированную величину.

По данным ВТД фиксируется распределение количества дефектов от их глубины с шагом 0,1 мм (рис. 3). С учетом количества групп (i), количества дефектов в i -той группе (n_i) и глубины повреждения i -той группе дефектов (h_i) фиксируется суммарная потеря металла в расчете на элементарную ячейку поверхности ($e = 1 \text{ мм}^2$), равная:

Рис. 2. Характер распределения дефектов поверхности трубопровода по глубине



$$S = e \sum h_i \cdot n_i.$$

Физический смысл величины S заключается в количестве коррозионных процессов (событий) (N) со скоростью коррозии V , приходящихся на всю поверхность трубопровода ($N = S/V$).

Например, фиксируем $V = 0,1$ мм/год.

Следовательно, для зарождения 15 дефектов глубиной 0,1 мм потребуются $n_i \cdot h_i/V = (0,1/0,1) \times 15 = 15$ операций.

А для получения пяти дефектов глубиной 0,4 мм – $n_i \cdot h_i/V = (0,4/0,1) \times 20$ операций.

Рис. 3. Распределение дефектов по глубине повреждений

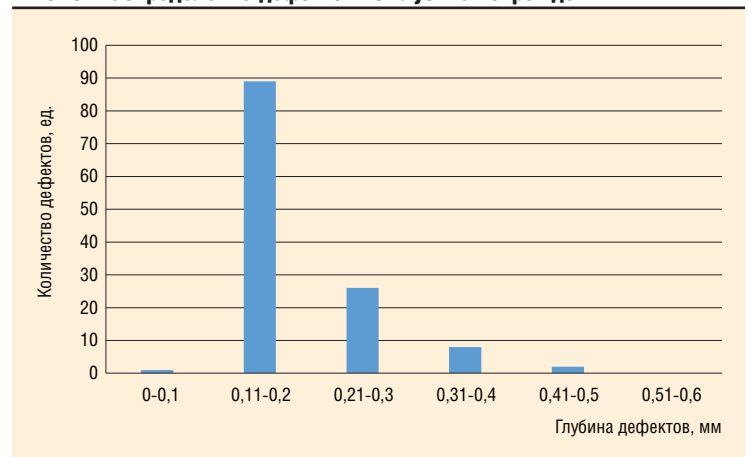
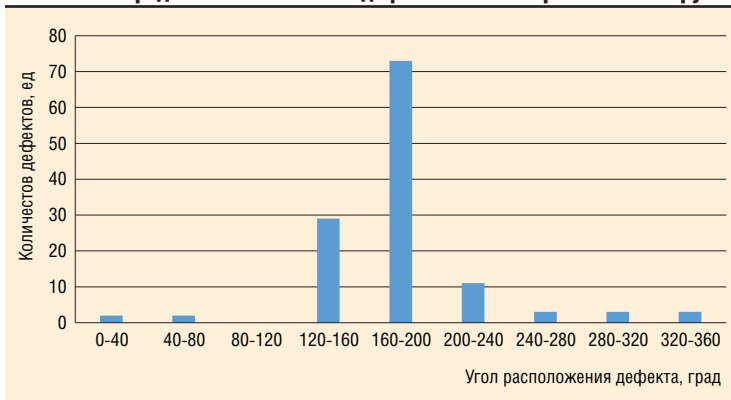


Рис. 4. Распределение количества дефектов по секторам сечения трубы



Зная из данных ВТД количество дефектов, их глубину и время их образования, можно вычислить отношение скорости коррозии к необходимому количеству дискретных потерь металла:

$$N \cdot V = \text{const} = S = e \sum h_i \cdot n_i.$$

При этом можно четко зафиксировать, какая часть процессов расходуется на зарождение дефектов ($e \cdot \sum n_i$), а какая – на увеличение дефектов ($e \sum h_i \cdot n_i - e \cdot \sum n_i$). За равные промежутки времени количество коррозионных процессов на длину трубопровода фиксировано.

Следовательно, за фиксированное время может зародиться определенное количество дефектов, а оставшееся не распределенным количество коррозионных процессов будет затрачено на их рост.

Скорость локальной коррозии фиксируется в численном значении как сумма скоростей всех зафиксированных повреждений, умноженная на их количество:

$$V_{\text{pit}} = (\sum h_i \cdot n_i / \sum n_i) \times 365 / T,$$

где T – временной интервал от начала эксплуатации до получения данных по ВТД (сут).

Скорость общей коррозии фиксируется в численном значении:

$$V_{\text{gen}} = h_{\text{min}} \cdot 365 / T, \text{ м/год},$$

где h_{min} – минимальная глубина зафиксированных дефектов, либо по данными УЗК.

При получении дополнительных данных ВТД либо УЗК данные параметры подлежат корректировке.

По данным ВТД фиксируется распределение количества дефектов по сектору трубы с шагом 40° (рис. 4).

Влияние распределения дефектов по сечению на удельную аварийность проявляется при начальной плотности дефектов выше 100 шт./км в год, так как возникает вероятность пересечения дефектов между собой с суммирующимся показателем скорости коррозии.

Минимальная толщина стенки, при которой фиксируется порыв, рассчитывается по РД 39-132-94 «Правила по эксплуатации, ревизии, ремонту и отбраковке нефтепромысловых трубопроводов».

Расчет удельной аварийности происходит по следующему алгоритму:

В качестве входных для проведения расчета служат следующие данные: n – количество дефектов в пересчете на 1 км; скорость локальной и общей коррозии; T – время от начала эксплуатации до проведения ВТД; J – количество циклов расчета, которое выбирается на основании учета скорости локальной коррозии при соблюдении условия, что скорость единичного коррозионного процесса меньше скорости локальной коррозии, а общее время моделирования должно охватывать не менее 20 лет эксплуатации; фиксируется доля коррозионных процессов, ед./год (N_z), отвечающая за зарождение новых повреждений:

$$N_z \cdot T / 365 = \sum n_i.$$

При этом распределение по длине поверхности трубопровода носит случайный характер. Кроме того, фиксируется количество коррозионных процессов, направленных на рост дефектов, шт./год (N_r):

$$N_r \cdot T / 365 = e \sum h_i \cdot n_i.$$

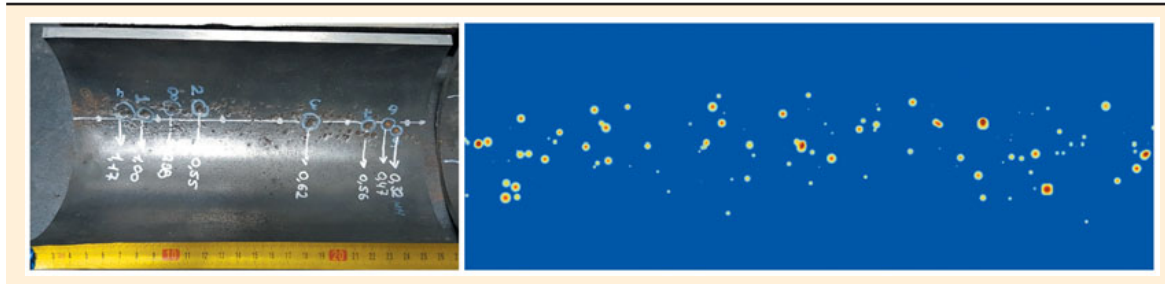
Также надо отметить, что распределение процессов, а, следовательно, и рост дефектов происходит случайным образом, что при большом наборе статистических данных (для расчета необходимо моделировать не менее 100 км трубопровода) приводит к образованию распределения дефектов с различной глубиной.

При каждой итерации происходят три независимых друг от друга события:

- распределение зарождения новых дефектов;
- распределение событий роста дефектов;
- распределение событий общей коррозии, которое распространяется на все элементарные участки трубопровода с одинаковой скоростью равной V_{gen} .

После каждой итерации проводятся суммирование всех событий для каждой элементарной ячейки и сравнение глубины дефектов с максимально допустимой потерей металла равной $t_0 - t_{\text{min}}$ (t_0 – начальная толщина стенки трубопровода, t_{min} – минимально допусти-

Рис. 5. Визуализация результатов моделирования и внешний вид после ОПИ двух катушек из различных марок сталей, испытанных на одном байпасном стенде



мая толщина стенки трубопровода, рассчитанная в соответствии с РД 39-132-94 или СП 284.1325800.2016).

При достижении дефектом глубины, равной или превышающей минимальное значение толщины стенки, фиксируется порыв, добавляемый в соответствующую сумму за временной период, равный количеству итераций. Данные дефекты в дальнейшем расчете не рассматриваются. Сумма дефектов, достигших критического значения глубины, формирует удельную аварийность за соответствующий период времени.

Визуализация результатов моделирования для двух различных марок сталей и сравнительный вид внутренней поверхности испытательных катушек после ОПИ представлены на рис. 5.

ВЫВОДЫ

Подводя итоги, можно сказать, что сформулирован алгоритм, позволяющий моделировать нелинейные коррозионные процессы внутренней поверхности тру-

бопроводов по данным внутритрубной диагностики и ультразвукового контроля.

Предлагается внедрение данного алгоритма расчета для прогноза удельной аварийности при проведении промысловых испытаний труб из различных марок сталей. Для удобства пользователей модель получила оболочку, позволяющую вводить данные ВТД и УЗК и корректировать следующие параметры:

- скорость общей коррозии (по данным УЗК и внутритрубной диагностики);
- функцию распределения вероятности зарождения язв в каждой зоне (по данным внутритрубной диагностики);
- скорость язвенной коррозии (по данным УЗК и внутритрубной диагностики);
- функцию распределения вероятности развития язвы (по данным внутритрубной диагностики);
- общую потерю металла на единичную длину (по данным внутритрубной диагностики). ◆