

22

В.И. Хижняков,
д.т.н., Национальный
исследовательский Томский
политехнический университет

Необходимость контроля плотности тока катодной защиты – фактор повышения эффективности защиты трубопроводов от коррозионного и стресс-коррозионного разрушения



Рис. 1. Коррозионные дефекты на внешней КЗП трубопровода после 32 лет эксплуатации



Рис. 2. Механический лом стресс-коррозионной трещины без видимых следов коррозии на внешней КЗП после 18 лет эксплуатации трубопровода [1]

Результаты внутритрубной диагностики и обследований коррозионного состояния трубопроводов в шурфах свидетельствует о том, что на магистральных нефте-газопроводах более 94% коррозионных и стресс-коррозионных дефектов обнаруживаются на внешней катоднозащищаемой поверхности (КЗП), из них 31,7% – коррозионные язвы и питтинги (рис. 1), 68,3% – стресс-коррозионные трещины (рис. 2).

Коррозионные дефекты на внешней КЗП трубопроводов образуются, когда плотность тока катодной защиты $j_{к.з.}$ не достигает плотности предельного тока по кислороду j_{O_2} : $j_{к.з.} < j_{O_2}$ или когда $j_{к.з.} = 0$ (табл. 1).

Представленная в таблице 1 совокупность экспериментальных результатов свидетельствует о том, что, когда $j_{к.з.} = 0$, скорость коррозии образцов из трубной стали 17ГС в 0,5%-ном NaCl достигает

$0,032 \pm 0,005$ мм/год. При $j_{к.з.} = j_{O_2}$ коррозионный процесс подавляется до значений, не превышающих $0,013 \pm 0,003$ мм/год при практически полном отсутствии выделения на КЗП катодного водорода. Заметное выделение водорода на КЗП начинается, когда плотность тока катодной защиты превышает плотность предельного тока по кислороду в 5–7 раз: $j_{к.з.} / j_{O_2} = 5 \dots 7$.

В связи с этим представляет интерес измерить плотность тока катодной защиты при регламентированных значениях защитного потенциала на действующих магистральных нефтегазопроводах. Плотность тока катодной защиты при различных потенциалах катодной защиты определяли на рабочем электроде коррозионно-измерительного зонда, который после погружения в грунт на уровень укладки подземного трубопровода через

Таблица 1. Зависимость остаточной скорости коррозии ($K_{ост.}$) и объема выделившегося водорода (V_{H_2}) от соотношения между плотностью тока катодной защиты и плотностью предельного тока по кислороду: $j_{к.з.}/j_{O_2}$

$j_{к.з.}/j_{O_2}$	$K_{ост.}$, мм/год	V_{H_2} , мл/см ²
0	0,032±0,005	0
0,3	0,03±0,004	0
0,5	0,022±0,005	0
0,7	0,017±0,003	0
1,0	0,013±0,003	0
3,0	0,01±0,003	1±0,5
5,0	0,007±0,002	7±0,5
7,0	0,008±0,003	9±0,5
10,0	0,006±0,003	16±0,5
20,0	0,008±0,002	33±0,5
50,0	0,007±0,003	49±0,5
100,0	0,006±0,003	58±0,5

контрольно-измерительный пункт (КИП) подключали к трубопроводу (рис. 3).

Коррозионно-измерительный зонд состоит из свинчивающегося из отдельных частей стального корпуса 1 с центральным каналом. Верхняя часть стального корпуса зонда оканчивается колпаком 2 с ручками 3, а нижняя – острым наконечником 4 с встроенным в его боковую поверхность рабочим электродом в виде плоского торца диаметром 3–6 мм из трубной стали 17ГС – 5. Именно при этих диаметрах рабочего электрода реализуется при прочих равных условиях в толще грунта максимальное значение предельного тока по кислороду. Рабочий электрод встроен в стальной корпус зонда с изолирующей фторопластовой втулкой 6 толщиной 0,1–0,5 мм. Нижний предел расстояния между рабочим электродом и вспомогательным, которым является вся наружная поверхность зонда, ограничен тем, что при меньших расстояниях может наблюдаться пробой изоляционной втулки, и рабочий и вспомогательный электроды окажутся короткозамкнутыми, а верхний – тем, что при больших расстояниях полярографическая волна кислорода в грунтах, имеющих большое омическое сопротивление, сглаживается и даже исчезает. Вспомогательный электрод, которым является вся наружная поверхность коррозионно-измерительного зонда, превышает в 100000 раз. Это сделано для того, чтобы полностью устранить влияние поляризации вспомогательного электрода на кинетику электрохимического восстановления кислорода на рабочем электроде.

На основе выполненных экспериментальных и теоретических исследований разработан аппаратно-программный комплекс «Магистраль» (рис. 4).

Аппаратно-программный комплекс «Магистраль» содержит коррозионно-измерительный зонд и измерительный модуль. Измерительный модуль содержит матричный дисплей, трехкнопочный интерфейс, кабель для подключения к сенсору. Модуль оборудован солнечной батареей, что обеспечивает работу прибора в течение всего рабочего дня без подзарядки. Прибор позволяет производить измерение, хранение в памяти и перегрузку в базовый компьютер следующих данных:

- плотность предельного тока по кислороду в толще грунта, А/м²;
- максимально возможную скорость коррозии трубопровода в конкретных условиях прокладки в отсутствие катодной защиты, мм/год;
- плотность тока катодной защиты, А/м²;
- остаточную скорость коррозии трубопровода при различных потенциалах катодной защиты, мм/год;
- степень электролитического наводороживания стенки трубопровода при заданном режиме катодной защиты.

Измерение и расчет данных производится в автоматическом режиме, что облегчает эксплуатацию прибора в трасовых условиях и исключает возможность субъективных ошибок. Для определения j_{O_2} и $j_{к.з.}$ зонд устанавливают над трубопроводом и погружают на требуемую глубину в грунт до верхней образующей подземного трубопровода путем вращения за ручки 3 или легкими ударами по колпаку 2 и подключают к прибору. В отсутствие тока поляризации прибор регистрирует разность стационарных потенциалов рабочего и вспомогательного электродов. При пропускании тока катодной поляризации потенциал вспомогательного электрода практически остается постоянным из-за ничтожно

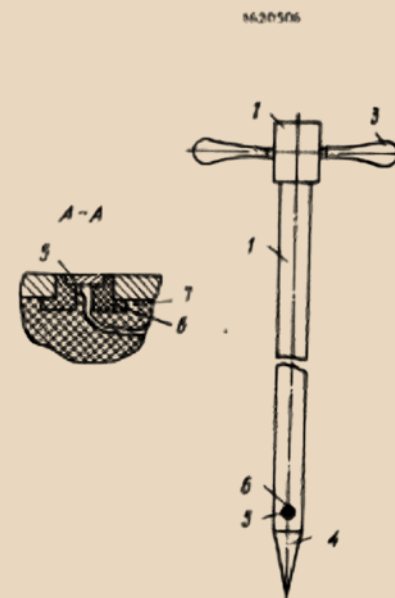


Рис. 3. Схема коррозионно-измерительного зонда (А.С. № 1620506)

малой плотности тока на нем (его поверхность в 10⁵ раз превосходит площадь рабочего электрода), и изменение разности потенциалов между электродами происходит практически только за счет поляризации рабочего электрода. При катодной поляризации рабочего электрода снимается полярограмма кислорода, высота которой зависит от физико-химических свойств грунта в данной точке подземного стального трубопровода и характеризует величину коррозионного тока в язвах, имеющих максимальную глубину. Проведенные исследования показали, что плотность тока коррозии в язвах с максимальной глубиной как в высокоомных грунтах, когда макрокоррозионные пары дифференциальной аэрации не оказывают практического влияния на максимальную глубину проникновения коррозии к участкам трубопровода, доставка кислорода к которым наиболее облегчена, так и в низкоомных, где за счет токов дифференциальной аэрации происходит некоторое (до 40%) перераспределение убыли массы от катодных участков к анодным, никогда не превышает плотность предельного тока по кислороду. В процессе дальнейшей работы не обя-



Рис. 4. Аппаратно-программный комплекс «Магистраль»

КАТОДНАЯ ЗАЩИТА

Таблица 2. Соотношение между плотностью тока катодной защиты и плотностью предельного тока по кислороду при различных значениях защитного потенциала МГ диаметром 1020 мм в различных грунтах

$j_{к.з.}/j_{O_2}$	Величина защитного потенциала магистрального газопровода Ду1020 мм (с омической составляющей) В по м.с.э.						
	0,85	0,95	1,0	1,5	2,5	3,0	3,5
В торфе	1,13	3,2	6,5	12	52	67	116
В глине	1,5	3,2	12	26	69	83	110
В песке	1,2	2,5	7,4	9	31	62	93

Таблица 3. Зависимость коэффициента полезного использования тока катодной защиты η от соотношения

$j_{к.з.}/j_{O_2}$	0,3	0,5	0,7	1	3	5	7	10	20	50	100
η	0,98	0,96	0,95	0,92	0,42	0,36	0,27	0,17	0,1	0,05	0,03

зательно каждый раз снимать катодную полярограмму восстановления кислорода на рабочем электроде. Достаточно на рабочий электрод подать потенциал, соответствующий середине площадки предельного тока кислорода (при катодной поляризации $\Delta\varphi=200...250$ мВ) и зафиксировать значение j_{O_2} после его установления во времени (в толще грунта – в течение 3 минут). Затем коррозионно-измерительный зонд следует отключить от коррозиметра, рабочий электрод зонда через КИП подключить к катоднозащищаемому трубопроводу и измерить $j_{к.з.}$.

В таблице 2 представлены результаты измерений плотности тока катодной защиты при различных защитных потенциалах, проведенных на трассе магистрального газопровода (МГ), Ду, 1020 мм.

Результаты трассовых электрохимических измерений свидетельствуют о том, что, например, в торфе на глубине укладки МГ (у верхней образующей трубы, на глубине 1,2 м) плотность предельного тока по кислороду $j_{O_2}=0,21$ А/м², а плотность тока катодной защиты при потенциале минус 1,79 В по м.с.э. $j_{к.з.}^{-1,79В} = 6,42$ А/м², то есть превышает плотность предельного тока по кислороду в 30,6 раз: $j_{к.з.}/j_{O_2}=30,6$. При защитном потенциале минус 2,24 В по м.с.э. $j_{к.з.}^{-2,24В} = 11,43$ А/м², $j_{к.з.}/j_{O_2}=54,43$.

В связи с этим закономерно возникает вопрос: на какие процессы расходуется ток катодной защиты на внешней КЗП трубопровода, если для эффективного подавления коррозионного процесса необходимо, чтобы плотность тока катодной защиты превышала плотность предельного тока по кислороду не более чем в 3–7 раз (табл. 1). Для этого был рассчитан коэффициент полезного использования тока катодной защиты (η): $\eta=(K_{\max}-K_{\text{ост.}})/gj_{к.з.}$, где K_{\max} – скорость коррозии трубной стали в отсутствие катодной защиты; $K_{\text{ост.}}$ – остаточная скорость коррозии при заданном защитном потенциале; g – электрохимический эквивалент Fe²⁺. В таблице 3

представлена экспериментальная зависимость коэффициента η от соотношения $j_{к.з.}/j_{O_2}$.

Результаты, приведенные в таблице 3, свидетельствуют о том, что, когда $j_{к.з.} \rightarrow j_{O_2}$, практически весь ток катодной защиты (92–98%) расходуется на подавление коррозионного процесса, а когда $j_{к.з.}/j_{O_2}=10...100$, на подавление коррозионного процесса расходуется 17–3% тока катодной защиты. Остальные 83–97% расходятся на «посадку» на КЗП адатомов водорода $H_{\text{адс.}}$: $H_2O+2e \rightarrow 2H_{\text{адс.}}+2OH^-$. Ток катодной защиты является сильнейшим восстановителем, и процесс диссоциативного захвата электронов молекулами воды на внешней КЗП аналогичен действию водорода, диссоциированного при давлении в тысячи атмосфер. В условиях постоянной во времени катодной перезащиты, когда $j_{к.з.}/j_{O_2}=10...100$, твердофазная диффузия подповерхностных адатомов водорода $H_{\text{адс.}}$ приводит к адсорбционному понижению прочности сталей вблизи катоднозащищаемой поверхности (эффект Ребиндера). Трубная сталь вблизи КЗП, на глубине $\approx 0,15...0,3$ мм под воздействием катодного водорода охрупчивается. Очаги стресс-коррозионного предразрушения практически повсеместно находятся вблизи КЗП, на глубине $\approx 0,15...0,3$ мм, там, где обнаруживается максимальная концентрация водорода. При одновременном воздействии катодной перезащиты и пульсирующего давления в трубопроводе на КЗП появляется сетка стресс-коррозионных трещин без видимых следов коррозии (рис. 2). Излом стенки трубы вблизи КЗП всегда хрупкий с последующим вязким доломом. Длительное отсутствие стресс-коррозионных трещин на КЗП магистральных нефтепроводов (МН), выполненных из аналогичных труб и эксплуатирующихся в одном коридоре с МГ, при сопоставимых механических напряжениях в металле может быть объяснено тем, что при транспорте газа, в отличие от нефти, труба подвержена еще вибрации, частота

которой зависит от часто меняющегося рабочего давления газа. Но это обстоятельство не исключает образование стресс-коррозионных трещин при перезащите и на МН. Первая авария от стресс-коррозии в системе магистральных нефтепроводов произошла в 2002 г. на нефтепроводе Нижневартовск – Курган – Куйбышев диаметром 1220 мм [2]. Все случаи коррозионного разрушения под напряжением (КРН) были зарегистрированы на катоднозащищаемых трубопроводах, имеющих значение защитного потенциала с омической составляющей от 1,5 до 3,0 В по м.с.э., то есть когда $j_{к.з.}/j_{O_2}=10...100$.

Рассмотренные факты указывают на необходимость при выборе потенциалов катодной защиты напряженно-деформированных подземных трубопроводов дополнительно определять величину безразмерного критерия $j_{к.з.}/j_{\text{пр}}$. Дополнительные электрохимические измерения позволяют исключить или свести к минимуму образование коррозионных дефектов, когда $j_{к.з.} < j_{\text{пр}}$, и предотвратить образование стресс-коррозионных дефектов, когда $j_{к.з.} > 10j_{\text{пр}}$. При $3 \leq j_{к.з.}/j_{\text{пр}} \leq 7$ коррозионный процесс подавляется до значений 0,005–0,007 мм/год при практическом отсутствии электролитического наводороживания стенки трубопровода, что дает основание рекомендовать этот критерий для практической реализации.

Литература:

1. Мазур И.И., Иванцов О.М. *Безопасность трубопроводных систем*. – М.: Елима, 2004. – 703 с.
2. Гумеров К.М., Гулятинов А.А., Черкасов Н.М., Кудакеев С.М., Абдульманов А.М., Мокроусов С.Н. *Стресс-коррозия – один из источников опасности на высоконагруженных подземных стальных трубопроводах, изолированных плочными материалами* // *Нефтепромысловое дело*. – 2005. – № 4. – С. 42–46.