

УДК 620.193.004.2

КОРРОЗИОННОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ ТРАНСПОРТЕ НЕФТИ И ГАЗА

В.И. Хижняков, Ю.А. Кудашкин*, М.В. Хижняков**, А.В. Жилин

Томский политехнический университет

*ООО «Газпром трансгаз Томск»

**ОАО «Центрсибнефтепровод», г. Томск

E-mail: val@tpu.ru

Экспериментально определена остаточная скорость коррозии и интенсивность электролитического наводороживания трубной стали 17ГС в сквозных дефектах и под отслоившейся изоляцией при различных значениях безразмерного критерия: степени превышения плотности тока катодной защиты над плотностью предельного тока по кислороду. Показано, что при превышении плотности тока катодной защиты над плотностью предельного тока по кислороду в 10...100 и более раз пространственное положение образца относительно трубопровода большого диаметра (у верхней, боковой или нижней образующей) не оказывает заметного влияния на степень подавления коррозионного процесса. Остаточная скорость коррозии, независимо от пространственного положения, подавляется до значений 0,005...0,007 мм/год. В то время как количество окклюдированного сталью водорода при этих же значениях безразмерного критерия максимальна у нижней образующей (под трубой) и превышает таковую у верхней и боковой образующих в 1,5...2 раза, что обуславливает формирование стресс-коррозионных трещин под отслоившейся изоляцией преимущественно у нижней образующей напряженно-деформированных трубопроводов большого диаметра.

Ключевые слова:

Коррозия, магистральные нефтегазопроводы, электрохимическая защита, напряженно-деформированное состояние, катодное наводороживание.

Key words:

Corrosion, oil and gas pipeline, cathodic protection system, stressed-deformed state, cathodic hydrogenation.

Анализ стресс-коррозионных разрушений магистральных нефтегазопроводов (НГП) свидетельствует о том, что содержание водорода в очаге стресс-коррозионных разрушений составляет 8...13 см³/100 г при исходном («родословном») содержании водорода вне очаговой зоны 1,2...2,0 см³/100 г. Наблюдаемое явление указывает на протекание процесса катодного наводороживания стенки напряженно-деформированных НГП при их длительной эксплуатации, приводящей к стресс-коррозионному растрескиванию внешней катоднозащищаемой поверхности (КЗП). Процесс наводороживания стенки трубопроводов со стороны внешней КЗП происходит при одновременном воздействии тока катодной защиты $j_{\text{кз}}$ и механических напряжений, вызываемых давлением транспортируемого продукта.

Практика эксплуатации магистральных НГП свидетельствует о том, что процесс наводороживания вызывает образование микротрещин практически повсеместно вблизи КЗП напряженно-деформированных НГП, в местах воздействия локальных напряжений: зоны термического влияния продольных и кольцевых сварных швов, царапин, вмятин, коррозионных язв и т. д. Стресс-коррозия напряженно-деформированных трубопроводов при транспорте нефти и газа представляет собой особый вид разрушения, проявляющегося в виде образования на КЗП колоний трещин, развивающихся во времени как в сквозных дефектах изоляции, так и под отслоившейся изоляцией, что в итоге приводит к отказам.

Статистика отказов, приведенная в таблице, показывает, что с 1997 г. стресс-коррозионные от-

казы преобладают над коррозионными. При этом наблюдается спад и относительная стабилизация коррозионных отказов, а количество стресс-коррозионных отказов, наоборот, возрастает. Стресс-коррозионные отказы происходят на магистральных трубопроводах большого диаметра: 1420, 1220, 1020, 820 и 720 мм, хотя трубопроводы меньших диаметров изготовлены из этих же сталей ферритно-перлитного класса. Анализ статистики стресс-коррозионных отказов за 10 лет (1996–2007 гг.) показывает, что 5 % случаев разрушений произошло по истечении 5...7 лет эксплуатации, подавляющее число – в «возрасте» от 7 до 25 лет.

Таблица. Динамика коррозионных и стресс-коррозионных отказов на внешней КЗП магистральных НГП

Годы	Относительное число отказов		Распределение числа стресс-коррозионных отказов по диаметрам магистральных нефтегазопроводов, мм			
	стресс-коррозионных	коррозионных	720	1020	1220	1420
1996	0,27	0,38	–	–	–	0,27
1997	0,36	0,30	–	–	0,25	0,11
1998	0,23	0,27	–	–	0,08	0,15
1999	0,27	0,26	–	0,04	–	0,23
2000	0,30	0,20	–	–	0,10	0,20
2001	0,60	0,25	–	0,10	0,25	0,25
2002	0,50	0,18	–	0,05	0,10	0,35
2003	0,40	0,18	0,05	–	0,20	0,15
2004	0,50	0,20	–	0,05	0,25	0,20
2005	0,50	0,17	–	–	0,35	0,15
2006	0,53	0,18	0,08	–	0,20	0,25
2007	0,61	0,20	0,05	0,06	0,20	0,30

Стресс-коррозия повсеместно появляется и развивается на внешней КЗП трубопроводов и к настоящему времени превратилась в серьезную проблему. Субструктура излома стенки трубы, подверженной стресс-коррозионному разрушению, свидетельствует о том, что вблизи КЗП, на расстоянии 2,0...2,5 мм сталь разрушается хрупко, с последующим вязким доломом [1. С. 700]. При этом в колониях стресс-коррозионных трещин на внешней КЗП коррозионные язвы, как правило, отсутствуют (рис. 1).



Рис. 1. Субструктура излома стенки толщиной 12 мм напряженно-деформированного трубопровода, подверженного стресс-коррозионному разрушению после 20-ти лет эксплуатации

По нашему мнению наличие хрупкого излома вблизи КЗП свидетельствует о формировании здесь зоны наводороживания структуры трубной стали в процессе эксплуатации трубопровода при катодной перезащите. Согласно действующим ГОСТ Р 51164-98 и 9.602-2005 нормированные значения поляризационных потенциалов при эксплуатации подземных стальных трубопроводов составляют $-0,85...-1,15$ В по медносульфатному электроду сравнения (МЭС). На действующих стальных трубопроводах при отсутствии возможности измерений поляризационных потенциалов допускается осуществлять катодную поляризацию таким образом, чтобы суммарные защитные потенциалы $\phi_{\text{защ}}$, включающие поляризационную и омическую составляющие, находились в пределах $-0,9...-2,5$ В по МЭС для трубопроводов с мастичным и ленточным покрытиями и в пределах $-0,9...-3,5$ В по МЭС — для трубопроводов с покрытием на основе экструдированного полиэтилена.

При проведении комплексных обследований режимов работы средств электрохимической защиты действующих магистральных нефтегазопроводов центральной части Западной Сибири нами установлено, что при нормированных значениях защитных потенциалов с омической составляющей плотность тока катодной защиты превышает плотность предельного тока по кислороду в 10...100 и более раз [2]. То есть, при нормированных значениях защитных потенциалов на КЗП подземных трубопроводов одновременно протекают две и более реакции: электровосстановление кислорода и поверхностно-активных компонентов почвенного электролита, выделение водорода из воды и осаждение металлов. На рис. 2 представлены катодные поляризационные кривые, снятые на стальных образцах во влагонасыщенных грун-

тах центральной части Западной Сибири [3]. Катодные поляризационные кривые были сняты на рабочем электроде из стали 17ГС диаметром 5 мм в потенциостатическом режиме с выдержкой каждого потенциала в течение минуты с помощью потенциостата Р-150.

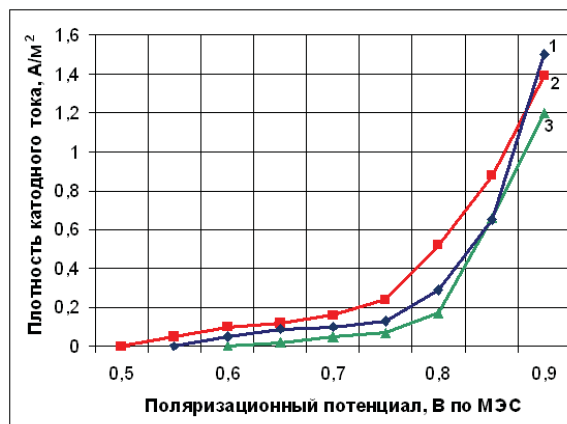


Рис. 2. Катодные поляризационные кривые на стали 17ГС во влагонасыщенных грунтах центральной части Западной Сибири при 20 °С: 1) в песке с влажностью 16 %; 2) в торфе с влажностью 120 %; 3) в глине с влажностью 9 %

Ход катодных поляризационных кривых, представленных на рис. 2, свидетельствует о том, что при нормированных значениях защитных (поляризационных) потенциалов основными на КЗП подземных трубопроводов в нейтральных и слабощелочных грунтах с рН 5...7, где проложены большинство российских НГП, являются реакции: электровосстановления кислорода: $O_2 + 4e + H_2O \rightarrow 4OH^-$, о чем на кривых рис. 2 свидетельствует площадка предельного тока по кислороду, и выделения водорода из воды: $2H_2O + 2e \rightarrow 2H_{\text{адс}} + 2OH^-$ — восходящие ветви кривых.

Следует подчеркнуть, что первая реакция протекает как в отсутствии тока катодной защиты (коррозия с кислородной деполяризацией), так и в присутствии тока катодной защиты (протекание реакции электровосстановления кислорода на КЗП под действием тока катодной защиты, в результате чего происходит торможение коррозионного процесса). А вторая реакция катодного разложения воды с выделением водорода протекает только под воздействием тока катодной защиты и ее протекание на КЗП к «подавлению» коррозионного процесса, как показали наши исследования [2, 3], не имеет практически никакого отношения. По нашему мнению водород является одной из основных причин коррозионного растрескивания высоконапорных (напряженно-деформированных) трубопроводов со стороны внешней КЗП. Однако систематических исследований по влиянию j_k на степень подавления коррозии и одновременное диффузионное накопление водорода в структуре трубной стали непосредственно в сквозном дефекте изоляции и под отслоившейся изоляцией до настоящего времени практически не проведено.

Целью работы является экспериментальное определение степени «подавления» коррозии и наводороживания трубной стали непосредственно в сквозном дефекте изоляции и под отслоившейся изоляцией, в зоне контакта защищаемой поверхности с электролитом при различных значениях предложенного нами [4] безразмерного критерия η : $\eta = j_{\text{кз}}/j_{\text{пр}}$, где $j_{\text{пр}}$ – плотность предельного тока по кислороду.

Для проведения исследований была изготовлена специальная конструкция рабочего электрода, представляющая собой пластину из метилметакрилата с размерами $150 \times 100 \times 10$ мм, в которую на равном расстоянии друг от друга вставляли в специальные гнезда круглые образцы из стали 17ГС диаметром 10 мм с контактными выводами от торцевой поверхности. Обратную и торцевую поверхности образцов изолировали химически стойким лаком. После установки образцов в гнезда пластины из метилметакрилата, проверяли наличие электрического контакта между стальными выводами и образцами. Затем пластины изолировали полимерной пленкой «Nitto», толщиной 0,5 мм. Напротив среднего образца в изоляционной пленке наносили сквозное повреждение. В условиях эксперимента адгезионное взаимодействие стальных образцов с изоляцией исключалось. Все образцы в зоне отслаивания изоляции контактировали с пленкой электролита, используемого для коррозионных испытаний. В качестве электролита использовали 0,5%-й раствор NaCl с добавкой 1,5...3 г/л $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$. Контактные выводы от рабочих электродов закорачивали через микроамперметры таким образом, чтобы можно было измерять общий ток катодной защиты и ток катодной защиты, протекающий через каждый образец под отслоившейся изоляцией на различном расстоянии от края сквозного дефекта.

В ходе эксперимента в ячейку с электролитом помещали три изолированных пластины со стальными образцами. По образцам первой пластины определяли скорость коррозии без катодной защиты за время установления потенциала коррозии. После установления во времени значения потенциала коррозии на рабочие электроды второй и третьей изолированной пластины в гальваностатическом режиме от потенциостата Р-150 подавали ток катодной защиты при различных значениях безразмерного критерия $\eta = j_{\text{кз}}/j_{\text{пр}}$, принимающего значения от 0 до 100. По истечении 140 ч потенциостат отключали и по образцам второй пластины определяли остаточную скорость коррозии трубной стали в сквозном дефекте изоляционного покрытия и под отслоившейся изоляцией на различных расстояниях от края сквозного дефекта при катодной защите. Для этого образцы извлекали из пластины, взвешивали на аналитических весах WA-31 с точностью до 0,1 мг, вычитали убыль массы образцов за время установления потенциала коррозии и, далее, весовым методом определяли скорость их коррозии под катодной защитой при различных значе-

ниях безразмерного критерия $\eta = j_{\text{кз}}/j_{\text{пр}}$. Полученные значения массового показателя коррозии пересчитывали в глубинный, мм/год (рис. 3).

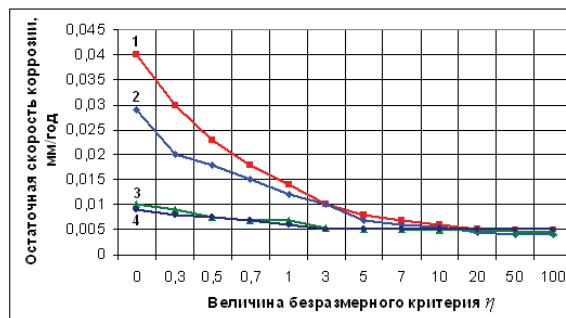


Рис. 3. Зависимость остаточной скорости коррозии от безразмерного критерия η . Образец: 1) напротив сквозного дефекта изоляции, 2) на расстоянии 20 мм в обе стороны от сквозного дефекта; 3) на расстоянии 40 мм; 4) на расстоянии 60 мм

Ход экспериментальных результатов, представленных на рис. 3, свидетельствует о том, что когда $\eta = j_{\text{кз}}/j_{\text{пр}} = 1...3$, на образцах, находящихся как напротив сквозного дефекта изоляции, так и под отслоившейся изоляцией на различных расстояниях от края сквозного дефекта, скорость коррозии подавляется до значений, не превышающих 0,01...0,013 мм/год. Дальнейшее увеличение плотности тока катодной защиты не приводит к заметному подавлению коррозии, но, по визуальным наблюдениям, сопровождается резким увеличением объема водорода, отделяющегося от КЗП образцов. В связи с этим представляло интерес определить объем окклюдируемого сталью водорода при различных значениях критерия η . Для этого определяли объем водорода, поглощенного образцами третьей пластины за время катодной поляризации методом анодного растворения при плотности анодного тока 15...25 А/дм², исключающего выделение кислорода [5]. Выделяющийся при растворении стали водород собирали в газовой бюретке, помещенной над образцом. При катодном наводороживании стали водород концентрируется преимущественно в тонком приповерхностном слое. В условиях эксперимента толщина анодно растворимого слоя образца составляла 0,1...0,3 мм.

Электролитическое наводороживание стальных образцов при перезащите, когда $\eta = j_{\text{кз}}/j_{\text{пр}} > 1...3$, происходит вследствие диффузии адсорбированных на КЗП атомов водорода в структуру трубной стали. На начальной стадии происходит взаимодействие между адатомами водорода H_{ads} и поверхностными атомами стали, в результате чего водород в структуре стали (решеточный водород) находится в ионизированном состоянии в форме протона. Решеточный водород легко дегазируется, а водород, сегрегированный в виде молекул в дефектах кристаллической решетки практически не дегазируется. Это обстоятельство вызвало при определении объема окклюдируемого сталью водорода применить метод анодного растворения.

При режиме катодной перезащиты, когда $\eta=100$, в образцах, находящихся в нижнем положении (у верхней образующей трубопровода), количество поглощенного водорода различалось в пределах 30...60 % и практически, в пределах разброса результатов эксперимента, не превышало содержания «родословного» водорода 1,3...1,6 мл/г, как в образце, находящемся напротив сквозного повреждения изоляции, так и под отслоившейся изоляцией, в зоне контакта образцов с электролитом, на различном расстоянии от края сквозного дефекта изоляции. Когда катодную поляризацию образцов осуществляли в потолочном положении, соответствующему положению сквозных дефектов изоляции под трубой, количество выделившегося водорода после катодной поляризации возросло в 1,5...2 раза, что обусловлено зависимостью электролитического наводороживания от степени заполнения КЗП адатомами водорода H_{ads} .

Наблюдаемое явление обусловлено тем, что при перезащите, когда $\eta=100$, КЗП и прилегающий электролит достигают определенной степени пересыщения и возникновение водородного пузырька становится возможным, то он растет до размеров, необходимых для его отрыва от защищаемой поверхности. В нижнем положении (у верхней образующей трубы) первый пузырек появляется сразу после включения перезащиты при $\eta=100$ и, достигая диаметра 100...120 мкм отделяется от защищаемой поверхности. В потолочном положении (под трубой) первый пузырек появляется с задержкой и, появляясь, практически не увеличивается в диаметре, который остается равным 20...30 мкм, что свидетельствует о том, что в потолочном положении скорость посадки адатомов водорода при перезащите превышает скорость их удаления.

Длительное присутствие адатомов водорода на КЗП приводит к адсорбционному понижению прочности сталей (эффект Ребиндера) и ее электролитическому наводороживанию. В нижнем положении (у верхней образующей трубы) при появлении пузырьки водорода при перезащите увеличиваются в диаметре до 100...120 мкм и отделяются от КЗП, снижая концентрацию H_{ads} . В потолочном положении (под трубой) диаметр пузырьков не превышает 20...30 мкм, они практически не отделяются от КЗП при краевом угле смачивания, равном $20\pm 0,5^\circ$.

Согласно представлениям А.Н. Фрумкина и Б.Н. Кабанова [6, 7] работа образования зародыша водородного пузырька на стенке при краевых углах $90...110^\circ$ меньше таковой при 0° в 4 раза. По этой причине вероятность образования зародыша пузырька водорода у нижней образующей трубы в несколько раз меньше, чем у верхней образующей, по нашим данным в 3...6 раз. Замедленный переход H_{ads} в газовую фазу в виде H_2 : $H_{ads} + H_{ads} \rightarrow H_2$, в потолочном положении (под трубой) приводит при перезащите к интенсивному электролитическому наводороживанию стенки труб D_y 720...1420 мм у нижней образующей. Диаметр во-

дородных пузырьков на КЗП зависит от краевого угла смачивания и кривизны стенки трубопровода. Кривизна стенки труб (в условиях эксперимента стального обруча) диаметром менее 720 мм приводит к увеличению краевого угла смачивания водородных пузырьков и на КЗП от $20\pm 0,5^\circ$ до $110\pm 0,5^\circ$, что приводит к росту их диаметра d и отделению от КЗП, благодаря чему мы на практике не наблюдаем очагов стресс-коррозионных разрушений на трубах малого диаметра (менее 720 мм) при перезащите, когда $j_{кз}/j_{пр} \gg 10$.

В условиях эксперимента диаметр пузырьков водорода в потолочном положении (под трубой) в 3...5 раз меньше, чем в нижнем положении (у верхней образующей трубопровода), то есть размер отрывающихся от КЗП трубопровода пузырьков тем меньше, чем меньше краевой угол смачивания θ . Можно полагать, что пересыщение, необходимое для образования жизнеспособного зародыша пузырька водорода у верхней образующей меньше по сравнению с нижней образующей в 3...5 раз, что способствует длительному пребыванию адатомов водорода у нижней образующей трубопровода. Пребывание адатомов водорода у нижней образующей по сравнению с верхней приводит к интенсивному электролитическому наводороживанию стенки трубы и образованию там колоний стресс-коррозионных трещин при одновременном воздействии адатомов водорода и растягивающих кольцевых напряжений, создаваемых рабочим давлением в трубопроводе.

Результаты наших обследований коррозионного состояния внешней КЗП магистральных НГП центральной части Западной Сибири, а также результаты коррозионных обследований других авторов, которые провели обследование напряженно-деформированных магистральных трубопроводов в других регионах страны [8, 9], свидетельствуют о том, что очаг предразрушения находится практически повсеместно вблизи КЗП, на глубине 0,17...0,3 мм, там, где концентрация водорода, в очаге стресс-коррозионного разрушения, максимальна. Для проверки этого факта была изготовлена специальная экспериментальная установка, позволяющая определять скорость набора давления водорода при его прохождении через напряженно-деформированный образец из стали 17ГС при различных значениях критерия η [10].

Было установлено, что при механических напряжениях σ , равных $(0,55...0,75)\sigma_{0,2}$, когда $\eta=16...20$, скорость набора давления под напряженно-деформированным образцом трубной стали толщиной 0,3 мм в обескислороженном электролите составила 0,048 МПа/мес (0,016 атм/сут); когда $\eta=75...100$ — соответственно 0,1 МПа/сут (0,033 атм/сут); когда $\eta=125...150$, скорость набора давления составила 0,2 МПа/мес (0,066 атм/сут).

Известно, что эквивалентные напряжения, а значит и прочность напряженно-деформированного трубопровода, в основном определяются кольцевыми растягивающими напряжениями

в стенке трубы. Зная скорость набора давления водорода вблизи КЗП при различных значениях критерия η и величину кольцевых растягивающих напряжений при заданном рабочем давлении в трубопроводе было рассчитано время до появления на КЗП стресс-коррозионной трещины. [10]. Это время было сопоставлено с реальным временем образования стресс-коррозионных трещин на магистральных газопроводах при заданном рабочем давлении в трубе и величины безразмерного критерия η .

На рис. 4 представлена стресс-коррозионная трещина, выявленная по результатам внутритрубной диагностики магистрального газопровода «Парабель-Кузбасс» диаметром 1020 мм, на 107 км, по истечении 32-х лет с начала эксплуатации при рабочем давлении, равном 3,5 МПа, при $\eta=120...132$. Видно, что при перезащите процесс коррозии на КЗП практически полностью подавлен. Следов коррозии за 32 года эксплуатации трубопровода нет.



Рис. 4. Стресс-коррозионная трещина, выявленная по результатам внутритрубной диагностики у нижней трети образующей магистрального газопровода «Парабель – Кузбасс» по истечении 32-х лет эксплуатации

Согласно методике, приведенной нами в работе [10], при $P_{\text{раб}}=3,5$ МПа и $\eta=132$ водородный надраз на КЗП должен появиться через 21 ± 2 года. По-видимому это так и произошло. За последующие 10 лет этот водородный надраз превратился в стресс-коррозионную трещину глубиной до 6 мм, то есть скорость распространения трещины в глубь стенки трубы в рассматриваемом случае составила 0,6 мм/год, что согласуется с данными по скорости распространения стресс-коррозионных трещин в глубь стенки трубы [11, 1. С. 703]. По данным цитируемых авторов отказы по причине КРН трубных сталей происходят у нижней образующей (под трубой) на газопроводах большого диаметра: 1420, 1220, 1020, 820 и 720 мм и практически никогда на трубопроводах малых диаметров, менее 720 мм, хотя они изготовлены из тех же сталей и эксплуатируются в одинаковых условиях, таблица.

Наблюдаемое явление связано с тем, что на трубопроводах диаметром менее 720 мм кривизна трубы начинает оказывать влияние на величину краевого угла смачивания водородного пузырька. На трубопроводах диаметром 720 мм и более угол смачивания пузырьков водорода под трубой $\theta < (20...30^\circ)$, пузырьки в течение длительного времени не увеличиваются в диаметре и не отделяют-

ся от КЗП, то есть процесс молизации водорода здесь существенно заторможен. Рост краевого угла смачивания до $90...110^\circ$ и заметное отделение «сидящих» под трубой пузырьков водорода начинается когда радиус трубы (в условиях эксперимента стального обруча) уменьшали до 320...520 мм. При этом происходит увеличение угла смачивания, что сопровождается увеличением диаметра водородного пузырька d , и пузырек начинает подниматься вверх по образующей трубы, что приводит к снижению степени заполнения КЗП адатомами водорода, чего не наблюдается на трубопроводах диаметром более 720 мм.

На КЗП напряженно-деформированных трубопроводов диаметром более 720 мм стресс-коррозионные трещины под воздействием $P_{\text{раб}}$ и степени перезащиты η формируются преимущественно у нижней образующей, в области локальных остаточных структурных напряжений в стенке трубы, например, в зоне термического влияния продольных заводских швов, царапин, вмятин, задигов и коррозионных язв. То есть наличие концентраторов напряжений способствует развитию стресс-коррозионных трещин при одновременном воздействии кольцевых растягивающих напряжений и катодного водорода, вызываемого перезащитой. Повреждение на внешней КЗП трубопровода имеют комплексный коррозионно-стресс-коррозионный характер. То есть, наличие у нижней образующей трубы концентраторов напряжений, в условиях затруднения процесса молизации выделяющихся при перезащите адатомов водорода, приводит к интенсивному наводороживанию трубной стали под трубой. Именно поэтому стресс-коррозионные трещины не всегда обнаруживаются в точках дренажа установок катодной защиты, а там, где в процессе эксплуатации трубопровода имеются концентраторы напряжений.

Экспериментально установлено, рис. 3, что когда $\eta > 10$ остаточная скорость коррозии трубной стали не превышает 0,007 мм/год. Коррозионные дефекты на КЗП трубопровода образуются при $\eta < 1$, или когда средства катодной защиты не работают: $j_{\text{кз}}=0$. Анализ микроструктуры трубной стали в районе конца стресс-коррозионной трещины (рис. 1) показывает, что по линии продвижения трещины имеются продукты коррозии, что свидетельствует о неравномерности режима катодной защиты в процессе эксплуатации магистрального трубопровода. Продукты коррозии распределены вдоль трещины неравномерно. Это означает, что в процессе эксплуатации режим катодной защиты не обеспечивал полного подавления коррозии трубной стали, когда $\eta < 1$ или когда средства электрохимической защиты простаивали: $j_{\text{кз}}=0$.

На внутренней катоднотезащищаемой стенке трубопровода, как показали проведенные обследования, стресс-коррозионные трещины отсутствуют, а обнаруженная там единственная трещина, по мнению авторов работы [12], вероятнее всего существовала изначально. Факт того, что влияние

водорода (например, обезуглероживания трубной стали) в окрестности трещины, развивающейся от внутренней катоднонезащищаемой поверхности трубы не наблюдается, является прямым подтверждением влияния режимов катодной перезащиты на электролитическое наводороживание наружной КЗП напряженно-деформированных трубопроводов, сопровождаемой образованием коллоидных стресс-коррозионных трещин на КЗП при перезащите, когда $\eta \geq 10$.

Выводы

Показано, что при выборе потенциалов катодной защиты напряженно-деформированных подземных стальных трубопроводов следует помимо измерения величины защитного потенциала, регламентируемого ГОСТ 51164-98 и 9.902-2005, дополнительно определять плотность тока катодной защиты и сопоставлять ее с плотностью предельного

тока по кислороду в условиях прокладки трубопроводов. При режиме катодной защиты, когда плотность тока превышает плотность предельного тока по кислороду в 3...5 раз и более, остаточная скорость коррозии сталей трубного сортамента в грунтах с рН 5,5...7,5 не превышает 0,01...0,013 мм/год при практическом отсутствии электролитического наводороживания стенки трубопровода. Дальнейшее увеличение плотности тока не приводит к заметному уменьшению остаточной скорости коррозии, интенсифицируя процесс электролитического насыщения приповерхностного слоя стенки трубопровода катодным водородом, способствующий появлению и развитию на катоднозащищаемой поверхности напряженно-деформированных трубопроводов стресс-коррозионных трещин.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. ГК № П1404 от 03.09.2009 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мазур И.И., Иванцов О.М. Безопасность трубопроводных систем. – М.: Изд-во «Елима», 2004. – 1024 с.
2. Хижняков В.И. Предупреждение выделения водорода при выборе потенциалов катодной защиты подземных стальных трубопроводов // Коррозия: материалы, защита. – 2009. – № 9. – С. 7–10.
3. Хижняков В.И., Глазов Н.П., Налесник О.И. Исследование коррозии трубной стали во влажных грунтах Среднего Приобья // Коррозия и защита скважин, трубопроводов и морских сооружений в газовой промышленности. – М.: ВНИИОЭГазпром, 1982. – № 4. – С. 12–14.
4. Хижняков В.И. Новый критерий выбора режимов катодной защиты подземных стальных трубопроводов // Практика противокоррозионной защиты. – 2009. – № 4. – С. 13–15.
5. Белоглазов С.М. Об определении водорода в стали методом анодного растворения // Заводская лаборатория. – 1961. – № 12. – С. 1468–1469.
6. Фрумкин А.Н., Багоцкий В.С., Иофа З.А., Кабанов Б.Н. Кинетика электродных процессов. – М.: МГУ, 1952. – 328 с.
7. Кабанов Б.Н. Электрохимия металлов и адсорбция. – М.: Наука, 1966. – 279 с.
8. Воронин В.Н., Мамаев Н.И., Ахтимиров Н.Д. Бурдинский Э.В. Анализ стресс-коррозионного состояния магистральных газопроводов ООО «Севергазпром» на основе результатов внутритрубной дефектоскопии и обследований в шурфах, пути решения проблемы КРН // Особенности проявления КРН на магистральных газопроводах ОАО «Газпром». Методы диагностики, способы ремонта дефектов и пути предотвращения КРН: Матер. отраслевого совещания ОАО «Газпром», г. Ухта, 11–15 ноября 2002 г. – Ухта, 2002. – С. 69–83.
9. Волгина Н.И., Илюхина М.В., Сергеева Т.К. Изучение распределения водорода в аварийных трубах, разрушившихся в результате стресс-коррозии // Матер. II Междунар. конф. по водородному охрупчиванию металлов. – Донецк, 1998. – С. 245.
10. Хижняков В.И., Жилин А.В. Определение инкубационного периода образования дефектов КРН на катоднозащищаемой поверхности подземных стальных трубопроводов // Практика противокоррозионной защиты. – 2009. – № 4. – С. 44–48.
11. Абдуллин И.Г., Гареев А.Г., Мостовой А.В. Коррозионно-механическая стойкость нефтегазовых трубопроводных систем: диагностика и прогнозирование долговечности. – Уфа: Гилем, 1997. – 120 с.
12. Гумеров К.М., Гулятьдинов А.А., Черкасов Н.М., Кудакеев С.М., Абдулманов А.М., Мокроусов С.Н. Стресс-коррозия – один из источников опасности на высоконагруженных подземных стальных трубопроводах, изолированных пленочными материалами // Нефтепромышленное дело. – 2005. – № 4. – С. 42–46.

Поступила 17.11.2010 г.