

АКТИВИЗАЦИЯ КОРРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Гаррис Н., Аскарлов Г.

*Уфимский нефтяной государственный технический университет,
ООО "Баштрансгаз"*

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Коррозионные процессы, разнообразные в своем проявлении, имеют общую электрохимическую природу. Но на фоне общей коррозии металла газопровода все больше проявляются особые коррозионные процессы, такие, которые происходят при каком – либо дополнительном воздействии. Сейчас, как никогда остро, встает вопрос стресс – коррозии на газопроводах большого диаметра, так как за последние годы число разрушений газопроводов по причине стресс – коррозии составило 82 % от всех аварий, произошедших в результате наружной коррозии, причем 65 % - разрушения газопроводов диаметром 1420 мм.

Большое число аварий приходится на "горячие" участки газопровода (20-30 км после компрессорных станций). Эти участки подвержены коррозионному разрушению из - за воздействия температуры и влажности на тело трубы в местах повреждения изоляции.

Наблюдения показывают, что магистральные газопроводы, компрессорные станции которых оборудованы аппаратами воздушного охлаждения (АВО), работают в нестационарных режимах [1,2], т.к. температура газа, поступающего в газопровод после АВО, практически повторяет суточные и климатические колебания температуры воздуха. Любые другие изменения в режимах работы основного оборудования также очень быстро передаются газовым потоком к критическим сечениям.

Теплогидравлический режим работы магистрального газопровода при эксплуатации меняется. Сочетание импульсного изменения температуры газа и давления в газопроводе с практически синхронным изменением влажности грунта приводят к суммарному эффекту активизации коррозионных процессов [3]. Этот фактор доминирует на газопроводах большого диаметра, где тепловой импульс быстро достигает критического сечения, распространяясь с газовой средой по газопроводу, как по "волноводу" [4]. На нефтепроводах, в том числе и на "горячих", где жидкая среда движется со значительно меньшими скоростями, стресс - коррозия практически не обнаруживается [5].

Считаем, что импульсное, волнообразное, колебательное изменение температуры газопровода можно рассматривать как побудительный момент, активизирующий движение и перераспределение грунтовой влаги в зоне теплового влияния трубопровода, меняющий качество грунтовых электролитов и активизирующий электрохимическую и биокоррозию.

Вместе с температурой меняется и давление газа на выходе из нагнетателей. Поэтому можно считать, что импульсное воздействие температуры на напряженное состояние трубопровода и его надежность проявляется двояко:

- со стороны транспортируемого газа, в виде импульсного воздействия давления;

- со стороны прилегающего к трубопроводу грунта, тоже импульсно, путем активизации коррозионных процессов разрушения, снижающего прочность трубы.

Отметим, что наличие сетки несквозных трещин на поверхности трубы свидетельствует о преобладающем влиянии на развитие коррозионного растрескивания именно внешней среды. Под действием внутреннего давления и дополнительных напряжений происходит только вязкий долом по магистральной трещине.

Цель исследований – определение степени увеличения коррозионной активности грунтов в результате импульсного температурного воздействия на процесс по сравнению со стабильным температурным режимом.

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОПРОВОДА, ПЕРЕСЕКАЮЩЕГО ПОДТОПЛЕННЫЙ ОВРАГ

Предлагается специальный метод исследования коррозионной активности грунтов в условиях, моделирующих взаимодействие участка магистрального газопровода с периодически обводняемым грунтом и склонности трубных сталей к коррозионному разрушению.

Для создания адекватной физической модели смоделированы условия теплообмена с окружающим грунтом участка газопровода, пересекающего овраг, по дну которого протекает ручей.

Согласно теории подобия, при равенстве чисел подобия, характеризующих процесс теплообмена, и соблюдении геометрического подобия, процессы теплообмена можно считать подобными [6].

Грунт для эксперимента взят при производстве вскрышных работ магистрального газопровода Ду 1400 (Поляна – Москово) с позиций 3 часа и 6 часов по ходу газа, поэтому теплофизические свойства грунта, использованного в лабораторном эксперименте и в натуральных условиях, были одинаковы. Следовательно, автоматически выполнялось равенство чисел Лыкова Lu и Ковнера Kv для "натуры" и "модели":

$$Lu = Lu'; \quad (1)$$

$$Kv = Kv'; \quad (2)$$

При соблюдении равенства температурных напоров $t_{тр}-t_e$, идентичности грунтов и одинаковом уровне их влажности выполнялось равенство чисел Коссовича Ko и Постнова Pn .

$$Ko = Ko'; \quad (3)$$

$$Pn = Pn'; \quad (4)$$

Таким образом, задача моделирования условий тепломассообмена сводилась к такому подбору параметров установки, при котором обеспечивалось равенство чисел Фурье Fo и Кирпичева Ki для "натуры" и "модели".

$$Fo = Fo'; \quad (5)$$

$$Ki = Ki'. \quad (6)$$

При соответствии чисел Фурье

$$Fo = \frac{a\tau}{R^2}$$

годовому периоду эксплуатации газопровода с радиусом $R = 0,72$ м, и равенстве коэффициентов температуропроводности $a = a'$, на основании (5) получаем для модели:

$$\tau' = \tau \frac{R'^2}{R} = 365 \cdot 24 \cdot \frac{0,01^2}{0,72^2} \approx 1,7 \text{ час.} \quad (7)$$

Так, при радиусе опытной трубы $R' = 0,01$ м годовой период на установке должен проходить за 1,7 ч.

Условия теплообмена моделировались критерием Кирпичева

$$Ki = \frac{qR_p}{\lambda (t - t_e)}, \quad (8)$$

где λ – коэффициент теплопроводности грунта, прилегающего к трубопроводу.

Учитывая, приближенно, удельный тепловой поток

$$q = \frac{\lambda(t - t_e)}{R \ln \frac{4H_0}{R}}, \quad (9)$$

получим:

$$Ki = \frac{1}{\ln \frac{4H_0}{R}}. \quad (10)$$

При глубине заложения газопровода до оси трубы $H_0 = 1,7$ м и $H_0/R = 2,36$ (относительная глубина заложения газопровода Поляна - Москово), на основании равенства (6), для модели получим:

$$H_0' = H_0 \frac{R'}{R} = 1,7 \cdot \frac{0,01}{0,72} = 0,0236 \approx 0,024 \text{ м.} \quad (11)$$

Для моделирования "ручья" необходимо было выдержать равенство чисел Рейнольдса для "натуры" и "модели":

$$Re = Re'. \quad (12)$$

Соответствующие расчеты показали, что подача воды, имитирующей ручей на данной установке, должна быть капельной.

В качестве управляющего параметра была выбрана температура t наружной поверхности стальной трубки – образца.

Таблица 1

Параметры стальных трубок - образцов, ст. 3.

№ п/п	Диаметр, мм	Длина, мм	Поверхность, мм ²	Масса, г	Примечание
1	20,1	106,3	6709,0	96,360	без шлифовки
2	20,9	106,8	7008,9	112,105	без шлифовки
3	20,0	109,55	6879,7	102,562	шлифованы; царапины (30 мм) на поз-х 4 ⁰⁰ , 6 ⁰⁰ и 7 ⁰⁰
4	20,0	109,35	6867,2	95,284	шлифованы; царапины (30 мм) на поз-х 4 ⁰⁰ , 6 ⁰⁰ и 7 ⁰⁰

Для определения относительной коррозионной активности грунта при импульсном температурном воздействии, по сравнению со стабильным температурным воздействием, был выбран ускоренный метод испытания [7, 8], на основании которого коррозионная активность грунтов определялась по потере массы стальных образцов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КОРРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ГАЗОПРОВОДАХ

Схема опытной установки изображена на рис. 1. Жестяная емкость 1, размерами 90 x 80 x 128 мм, заполнялась специально подготовленным грунтом 11 до высоты $H = 5$ см. Стальная трубка 2 изолирована от жестяной коробки с помощью резиновых пробок 7.

Каждая из проб высушивалась в сушильном шкафу. Сухой грунт измельчался и увлажнялся до влажности $W = 20...25$ %, которая соответствует естественной влажности грунта.

Необходимым условием коррозионных испытаний является ускорение контролирующей ступени процесса. В нейтральных электролитах процесс коррозии лимитируется скоростью кислородной деполяризации, поэтому для ускорения коррозионного процесса необходимо увеличивать скорость катодного процесса. В опыте этот эффект достигался за счет обратного переключения схемы электрозащиты, т.е. трубка – образец становилась анодом, а жестяная емкость катодом. Источник постоянного тока напряжением 6 В.

Импульсный температурный режим создавался за счет периодического включения и выключения ТЭНа 3, установленного внутри трубки – образца. Термопара 8, установлена над верхней образующей трубки, без нарушения целостности поверхности образца.

В процессе эксперимента обеспечивалась капельная подача воды через воронку в грунт на уровне оси трубки. Создавался барражный эффект, характерный для поперечных по отношению к трубопроводу водостоков. Слив воды осуществляется через перфорированные отверстия (10) на боковой стенке коробки.

Время проведения каждого опыта 24 часа. Этот период эквивалентен $24/1,7 = 14,1$ годам в "натурных" условиях. Можно считать, что этого времени достаточно для развития и полного проявления последствий коррозионного разрушения металлической конструкции.

Таким образом, оборудование данной экспериментальной установки позволяет изучать различные аспекты проявления коррозионной активности грунтов с учетом ГОСТ [7, 8], и в то же время, учесть особенности трассовых условий и изменения технологических режимов эксплуатации магистральных газопроводов.

Схема экспериментальной установки для изучения импульсного температурного влияния на коррозионную активность грунтов

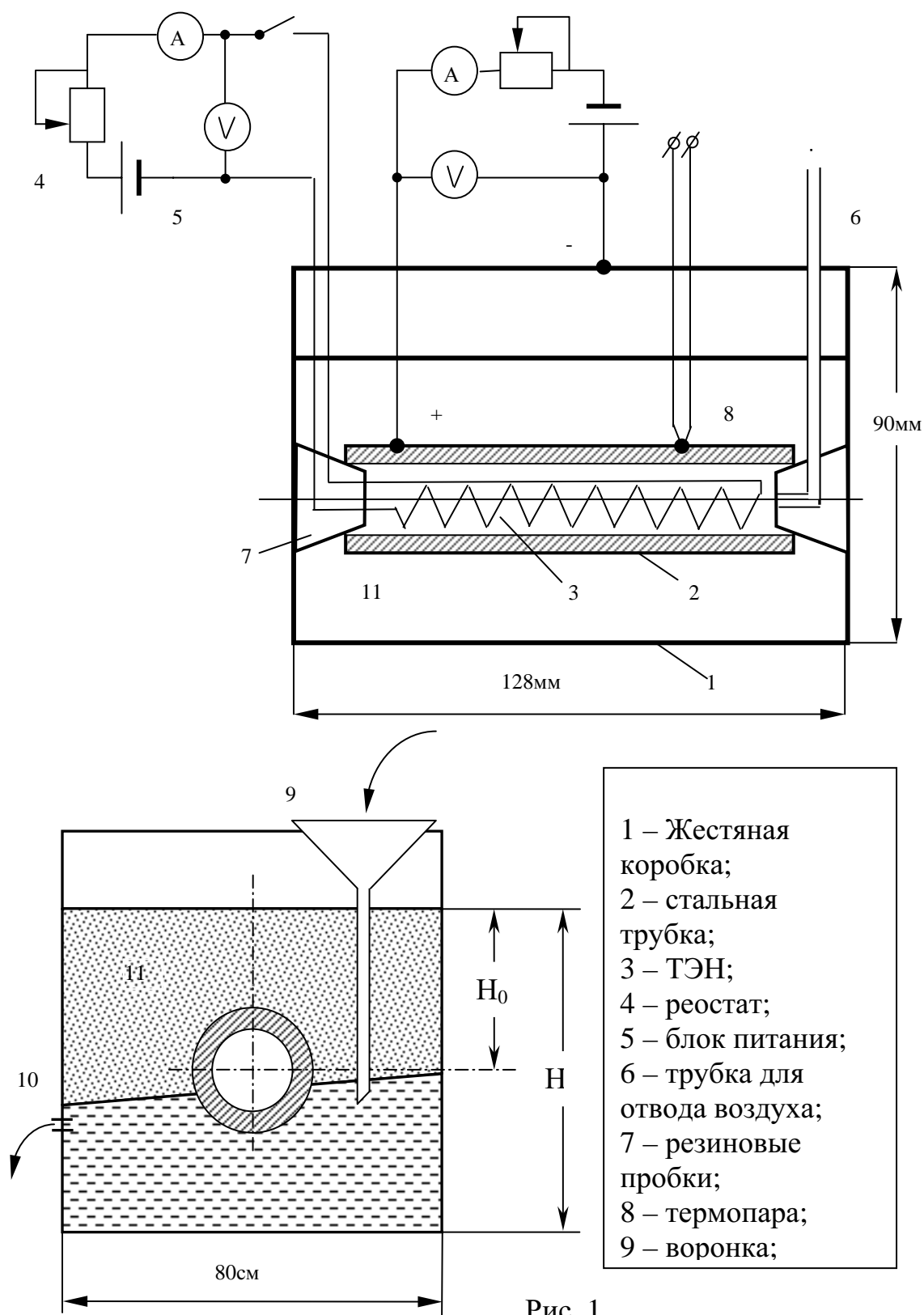


Рис. 1.

**УВЕЛИЧЕНИЕ КОРРОЗИОННОЙ АКТИВНОСТИ ГРУНТА
В ИМПУЛЬСНОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ РЕЖИМЕ
(1 – Я СЕРИЯ ОПЫТОВ)**

1-я серия опытов предусматривает сопоставление коррозионной активности системы труба – грунт (капиллярно – пористое тело) в режимах с импульсным температурным воздействием по схеме t_H/t_0 и стабильным температурным режимом со средней температурой t_{cp} :

$$t_{cp} = \frac{\sum \tau_{ni} \cdot t_{ni} + \sum \tau_{oi} \cdot t_{oi}}{\sum (\tau_{ni} + \tau_{oi})}. \quad (13)$$

При температуре окружающей среды в естественном состоянии $t_e = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ и температуре трубки $t = 30...40 \text{ }^\circ\text{C}$ на установке создается температурный напор $\Delta t = t - t_e = 10...20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Такой температурный напор соответствует Δt в натуральных условиях осенне – весеннего и летнего режимов эксплуатации газопровода, когда температура грунта на глубине заложения трубопровода поднимается до уровня $18 \text{ }^\circ\text{C}$.

В зимний период температурный напор Δt увеличивается до $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Для моделирования зимнего режима необходимо учитывать, что условия теплообмена и почвенной коррозии в зимний период отличаются: "ручьи" замерзают, а над трубопроводом снежный покров частично подтаивает, увлажняя почву. Тем не менее, есть все основания полагать, что в силу достаточного увлажнения почвы, в зимние периоды коррозионные процессы протекают также активно.

Результаты коррозионных испытаний приведены в табл. 2 и на рис.2-5. Пробы грунта повторно не использовались. Температура окружающей среды (воздуха) не выходила за пределы $18...20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Таблица 2

Результаты 1-й серии опытов по определению коррозионной активности
грунтов с подвижной влагой

№ п/п	Масса образца, г		Потеря массы образцов (без отмывки)		Характер поражений	Грунт с пози- ций
	до опыта	после опыта	г	г/см ²		
$t_r: 30/40 \text{ }^\circ\text{C}$ ($t_{cp} = 33 \text{ }^\circ\text{C}$); водосток 6...10 капель/мин						
1	96,360	91,650	4,710	0,0702	Обширные язвенные очаги поражения, глубокие язвы	3 час
$t_r = 33^\circ\text{C}$;						
2	112,105	111,350	0,755	0,0102	Поверхностная коррозия	3 час
$t_r = 33^\circ\text{C}$; водосток 6...10 капель/мин						
3	112,562	112,250	0,312	0,0045	Поверхностная коррозия	6 час
$t_r: 31/42 \text{ }^\circ\text{C}$ ($t_{cp} = 34 \text{ }^\circ\text{C}$); водосток 6...10 капель/мин						
4	95,284	91,890	3,39	0,0494	Язвенная, глубокие язвы	6 час



Рис. 2. Образец № 1. Импульсный температурный режим 30/40°C (поз. 3 ч.)



Рис. 3. Образец № 2. Контрольный. Температура $t=33^{\circ}\text{C}$ (грунт с поз. 3 ч.)



Рис. 4. Образец № 3. Контрольный. Температура $t=34^{\circ}\text{C}$ (грунт с поз. 6 ч.)



Рис. 5. Образец № 4. Импульсный температурный режим $31/42^{\circ}\text{C}$ (поз. 6 ч.)

Образцы № 1 и № 4, подвергались импульсному температурному воздействию. Фактический режим определялся температурой стальных образцов, которая менялась в пределах: $t_{ni} \dots t_{oi}$. Температура нагрева t_n – это температура, до которой повышалась температура стенки образца за время нагрева τ_n . Температура остывания t_o – это температура, до которой снижалась температура образца за время τ_o . Время i – го цикла $\tau_i = \tau_{ni} + \tau_{oi}$; число циклов за время опыта – 66. За время испытания, 24 час 30 мин, моделировался процесс, протекающий в натуральных условиях за 14 лет.

На поверхности образцов № 1 и № 4 (фото 2 и 5) преобладают обширные и глубокие очаги язвенной коррозии. Максимальная глубина язвенного поражения отмечается в местах водотока. Вследствие барражного эффекта и повышенной влажности с подпруживающей стороны эрозия более глубокая и обширная.

Хорошо видно принципиальное отличие характера поражения испытанных в импульсном режиме образцов № 1 и № 4, имеющих обширные и глубокие язвы, от контрольных образцов № 2 и № 3 с поверхностной коррозией.

Условия опыта с образцами № 2 и № 3 (фото 3 и 4), отличаются постоянным температурным режимом и отсутствием эффекта "ручья" в опыте № 2. Преобладает общая коррозия, поверхности образцов поражены равномерно. Скорость коррозии при стабильном температурном режиме значительно меньше. Из табл. 1 видно, что потери массы контрольных образцов меньше в 6,9...11,2 раза.

Увеличение потери массы образца № 4 ($11,2 > 6,9$) объясняется следующими причинами:

- в опыте использовался грунт, прилегавший к газопроводу по нижней образующей, т. е. с позиции б час.;
- грунт имел выраженные признаки оглеения;
- опыт проводился при более высокой средней температуре t_{cp} : $34^\circ\text{C} > 33^\circ\text{C}$.

ЭФФЕКТ ФОРМИРОВАНИЯ УЛУЧШЕННЫХ КАПИЛЛЯРОВ

Повышению активности коррозионных процессов способствует то, что "раскачивание" влаги, которое происходит в импульсном режиме, под действием термодвижущих сил, со временем приводит к сглаживанию бугорков и подвижке частиц пылеватой фракции в капиллярах. В результате образуются улучшенные протоки, по которым легко движется грунтовый электролит.

Этот факт установлен при проведении опыта № 4, в котором использовался грунт с ярко выраженными признаками оглеения. В ходе опыта № 4 (температурный режим импульсный), двигаясь в безнапорном режиме, вода преодолела сопротивление грунта примерно через 8 - 9 часов с начала эксперимента. Еще через 1 час установился баланс: приток воды стал равен оттоку. На ночь установка была отключена. Утром, после включения установки, вода закапала из дренажных отверстий уже через 50 минут, что свидетельствует о наличии сформированных капиллярных протоков.

Для сравнения. В контрольном опыте № 3, температура в процессе которого поддерживалась постоянной, наблюдалось застаивание воды, которая не просачивалась через точно такой же плотный грунт даже к концу эксперимента.

Особо отметим, что эффект уменьшения гидравлического сопротивления капилляров и формирования протоков при импульсном температурном режиме

несомненно способствует коррозии металла, так как обеспечивает обновление почвенного электролита проточной водой.

Этот факт свидетельствует об уменьшении гидравлического сопротивления капилляров и формирования протоков. В такой среде ионы электролита более подвижны. Это, несомненно, способствует коррозии металла, так как обеспечивает обновление почвенного электролита проточной водой.

При этом каждый импульс обеспечивает смену 1-го и 2-го этапов формирования очагов коррозии, как бы подгоняя дискретное подрастание коррозионных трещин в случае КРН.

Естественно, что при этом усиливается не только развитие коррозионных трещин, но интенсифицируется очаговая коррозия, точечная и поверхностная, так как они характеризуются общими электрохимическими процессами.

РОСТ КОРРОЗИОННОЙ АКТИВНОСТИ ГРУНТА С УВЕЛИЧЕНИЕМ ЧИСЛА КОЛЕБАНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ (2 – Я СЕРИЯ ОПЫТОВ)

Число колебаний температуры магистрального газопровода велико. В течение месяца только число включений вентиляторов АВО на площадках охлаждения природного газа достигает 30...40. В течение года, с учетом технологических операций (остановка компрессорного цеха, ГПА и т.п.) и климатических факторов (дождь, паводки и т.д.), это сотни колебаний, а в течение всего срока эксплуатации - тысячи и десятки тысяч.

Поэтому вторая серия опытов проводилась с целью изучения влияния числа тепловых импульсов на коррозионную активность грунта.

Предполагалось, что с увеличением числа температурных импульсов потери массы образцов должны увеличиваться. Основанием явилось то, что грунтовые электролиты в коррозионно - активном слое грунта вокруг газопровода большого диаметра ведут себя совершенно особым образом [8], а именно:

1. Они работают в пористой среде. Поэтому передвижению ионов препятствуют скелетные формы грунта.

2. Грунтовые электролиты находятся в колебательном движении под действием термодвижущих сил, так как температурные градиенты непрерывно меняются. При этом влага "пробивает" себе оптимальный путь в пористой среде, сглаживает неровности и бугорки в капиллярном протоке, что значительно уменьшает гидравлическое сопротивление капилляров.

3. Увеличение подвижности грунтовой влаги и ее колебательное движение активизируют коррозионные процессы. При наличии водостоков (овраги, балки и т.п.) происходит активная эвакуация продуктов коррозии из активного слоя грунта к периферии и обновление электролита.

В таком режиме микротрещины развиваются стремительно, сливаются, и в результате, по некоторому "оптимальному руслу" формируют магистральную трещину. Увеличение числа циклов должно способствовать этому процессу.

Опыты №№ 5-8 проводились на смеси глинистых и суглинистых грунтов, отобранных при производстве вскрышных работ на магистральном газопроводе диаметром Ду = 1400 мм с позиций 3 ч. и 6 ч. Температурный режим устанавливался импульсный по схеме 45/35 °С. Результаты представлены в табл. 3, 4 и на рис. 6.

Потери массы образцов второй серии опытов, с циклическим режимом нагрева по схеме 45/35 °С

Таблица 3

№ образца	Вес образцов, г			Потери массы образцов		
	до опыта	после опыта	после отмывки	г	г/см ²	г/см
5	98,564	95,690	95,550	3,014	0,04314	0,2709
6	95,364	92,600	92,480	2,884	0,04108	0,2580
7	99,480	96,614	96,560	2,920	0,04144	0,2602
8	94,620	91,710	91,578	3,042	0,04358	0,2716

Параметры нагрева образцов в циклическом режиме 45/35 °С

Таблица 4

№ образца	Длительность опыта, час	Число циклов	Время цикла (нагрев–остывание), мин	Время нагрева, мин	Время остывания, мин
5	24,6	82	18	6,0	12,0
6	24,0	14	102,9	89,9	13,0
7	24,1	60	24,1	14,1	10,0
8	24,1	76	19,0	3,9	15,1

Зависимость потерь массы образцов от числа тепловых импульсов

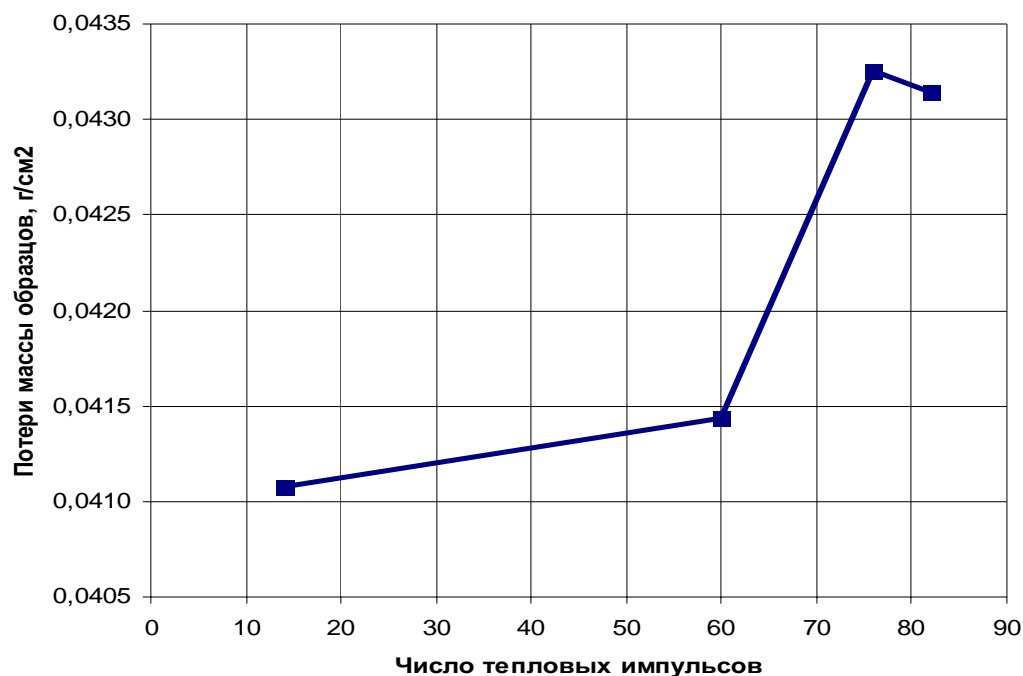


Рис. 6

Из рис. 6 видно, что с увеличением числа циклов за один и тот же период времени активность коррозионных процессов возрастает, о чем свидетельствует рост относительных потерь массы образцов. Эта зависимость нелинейная и носит прогрессирующий характер. Отсюда следует вывод, что для снижения коррозионной активности грунта, окружающего трубопровод, необходимо стабилизировать температурный режим магистрального газопровода.

Чем стабильнее условия теплообмена газопровода с окружающим его грунтом, тем меньше возможность активизации стресс – коррозионных процессов.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Экспериментально доказано, что импульсное температурное воздействие повышает коррозионную активность грунта в 6,9...11,2 раза

2. Рост коррозионной активности грунта с увеличением температурных циклов доказывает, что эффект "раскачивания" при импульсном воздействии способствует образованию в массиве грунта оптимальных (с гидравлической точки зрения) каналов, по которым отводится отработавший электролит, унося с собой продукты коррозии и уступая место новой порции грунтового электролита.

3. Рекомендуется рассматривать стабилизацию теплогидравлического режима газопровода как меру борьбы со стресс – коррозией. Данная задача должна решаться как на этапе проектирования новых газотранспортных систем, путем принятия новых проектных решений, так и при эксплуатации, путем совершенствования способов регулирования режимов работы основного и вспомогательного оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ismagilov I., Garris N., Asadullin M., Askarov R. // New facts of ground water influence on stress-corrosion cracking of big diameter gas main / Proceeding "Intellectual Service for Oil and Gas Industry. Analysis, Solution, Perspectives".- Vol 2. / edit. A. Shammassov, L. Besenyei et all. - Miskolc (Hungary): University-Press, 2002.- P. 46 – 53.

2. Габдрахманов А.А., Гаррис Н.А. Корреляционно-регрессионный анализ условий работы аппаратов воздушного охлаждения на КС МГ. / Материалы Новоселовских чтений: Сб. науч. тр. Вып 2. Уфа. 2004 г. С. 173-180.

3. Исмагилов И.Г., Асадуллин М.З., Гаррис Н.А., Аскаров Р.М. Импульсное влияние влажности на скорость коррозии магистрального газопровода, протекающей по типу КРН // Наука и техника в газовой промышленности. Научно-технич. журн. 2002, № 2. С. 45 – 47.

4. Абдуллин И.Г., Гареев А.Г., Мостовой А.В. Диагностика коррозионного растрескивания трубопроводов. Изд-во "Гилем". Уфа – 2003. 99с.

5. Гаррис Н.А., Исмагилов И.Г., Аскаров Г.Р. и др. Коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) – синергетическое явление. Прикладная синергетика - II. Труды международной научно-техн. конференции, посвященной памяти Ильи Пригожина (25.01.1917 - 28. 05.2003) Том 2. 20-22 окт. 2004 г. Уфа: Изд. УГНТУ, 2004. С. 130-133

6. Лыков А.В. Тепломассообмен // Справочник. – М.: Энергия, 1978. –480с.

7. Фокин М.Н., Жигалова К.А. Методы коррозионных испытаний металлов. Защита металлов от коррозии. – М.: Металлургия, 1986. 80 с.

8. Дизенко Е.И., Новоселов В.Ф., Тугунов П.И. и др. Противокоррозионная защита трубопроводов и резервуаров. Учебник. М., 1968. 199 с.

9. Гаррис Н.А., Асадуллин М.З., Аскарлов Г.Р. Формирование микро- и макрокоррозионных элементов на наружной поверхности газопровода // Сооружение, ремонт и диагностика трубопроводов /Сб. науч. тр. УГНТУ. М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2003. - С. 219 - 225.