

Г.Х. Самигуллин, В.А. Пыстин

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ
НЕОБХОДИМОСТИ УЧЕТА НАПРЯЖЕННО-
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
МЕТАЛЛА ТРУБОПРОВОДА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ
КОРРОЗИОННОГО МОНИТОРИНГА**

Теоретически обоснована и экспериментально доказана необходимость учета напряженно-деформированного состояния трубопровода при проведении мониторинга коррозионных процессов. Представлена модель датчика скорости коррозии, учитывающая нагрузки, эквивалентные нагрузкам, возникающим при эксплуатации трубопровода. Приведены результаты коррозионных испытаний, доказывающие влияние напряженно-деформированного состояния металла на скорость протекания коррозионных процессов на магистральных трубопроводах.

Ключевые слова: коррозионный мониторинг, датчик скорости коррозии, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, трубопровод.

Основными задачами проектных и эксплуатирующих организаций в трубопроводном транспорте является обеспечение работоспособности действующих магистральных трубопроводов и обоснование рациональных режимов функционирования трубопроводов, строящихся в различных климатических условиях, характеризующихся высокой коррозионной активностью. Одной из главных причин повреждений трубопроводов является коррозия внешней поверхности стенки. С целью минимизации аварий на магистральных трубопроводах по данной причине в настоящее время используется ряд методов: катодная и протекторная защита, новые типы изоляционных покрытий, искусственное снижение коррозионной активности грунта, мониторинг коррозионных процессов [8]. Коррозионный мониторинг – система инструментального и визуального контроля коррозионного состояния металлоконструкций в процессе их эксплуатации, направленная на своевременное выявление и предупреждение развития коррозионных

процессов. Коррозионный мониторинг представляет собой комплекс средств, обеспечивающий снижение вероятности коррозионного разрушения элементов металлической конструкции и включающий в себя автоматизированные системы электрохимической защиты, сенсорные устройства и датчики для контроля параметров коррозии и защиты, измерительное оборудование, а также аппаратуру сбора, обработки и дистанционной передачи информации. Основными целями коррозионного мониторинга являются:

- управление параметрами защиты в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51164;
- своевременное предупреждение об увеличении коррозионной опасности для выявления причин и выполнения профилактических противокоррозионных мероприятий;
- уточнение исходных данных для прогнозирования коррозии магистрального трубопровода [7].

Одним из составных элементов системы коррозионного мониторинга магистральных трубопроводов явля-

ются датчики скорости коррозии. Они представляют собой устройства, которые устанавливаются в грунт на глубину укладки трубопровода и с помощью проводников подключаются к контрольно-измерительному пункту, расположенному на поверхности земли. Основными преимуществами использования данных устройств является то, что при коррозионном исследовании нет необходимости прямого доступа к трубопроводу, есть возможность получать данные о коррозионном состоянии в любой момент времени, по получаемым данным можно управлять режимами работы станций катодной защиты, что минимизирует коррозионные и энергетические потери.

К настоящему времени сложилась следующая классификация устройств контроля скорости коррозии (УКСК) в зависимости от принципа действия, вида (типа) получаемой от устройства информации и способу ее интерпретации [2].

В промышленности наибольшее распространение получили датчики, принцип работы которых основан на изменении сопротивления в цепи датчика скорости коррозии в результате воздействия коррозионной среды на чувствительный элемент датчика [2]. Они отличаются универсальностью использования и простотой интерпретации получаемых данных.

Поскольку основной целью использования датчиков скорости коррозии является передача данных о коррозионной активности среды и скорости коррозионных процессов, возможных на трубопроводе, то необходимо, чтобы конструкция датчика предусматривала возможность воздействия всех факторов, оказывающих влияние на коррозию внешней стенки трубопровода. Анализ разработок в области коррозионного мониторинга показал, что конструкции существующих устройств для определения скорости коррозии не предусматривают влияния напряженно-деформированного состояния трубопровода на скорость коррозии. В ряде работ [3, 4, 5, 6, 8, 10] указано, что конструкции, работающие под давлением и взаимодействующие с коррозионной средой выходят из строя быстрее и напряженно-деформированное состояние является одним из основных параметров, влияющих на скорость развития дефектов.

Поэтому целью данной работы является усовершенствование конструкции датчика скорости коррозии таким образом, чтобы чувствительный элемент датчика находился в напряженном состоянии, эквивалентном напряженному состоянию исследуемого трубопровода. Это позволит с более высокой точностью определять функ-

Классификация устройств контроля скорости коррозии

Тип УКСК	Классификация УКСК		Контролируемый параметр	Оснащенность блоком обработки и индикации данных
	Стационарные	Переносные		
Гравиметрические	+	-	масса, глубина единичного коррозионного повреждения	нет
Резистивные	+	+	сопротивление	возможна
Электрохимическая ячейка	+	+	плотность тока коррозии	обязательна
Комбинированные	+	+	не нормируется	возможна

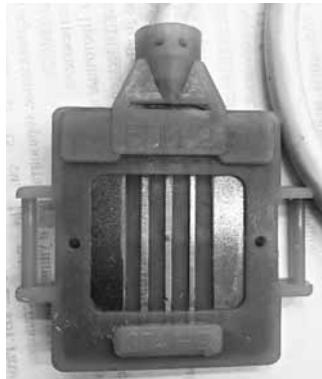


Рис. 1. Датчик скорости коррозии БПИ-2

циональное состояние объекта контроля, что приведет с снижению аварийности по причине коррозии внешней стенки трубопроводов.

Для проведения исследований использовались датчики скорости коррозии БПИ-2 (рис. 1). Датчик имеет три чувствительных элемента толщиной 0,3, 0,4, 0,5 мм, по потере электрической проводимости которых судят о скорости коррозионных процессов. Чувствительные элементы выполнены из низколегированной стали с условным пределом текучести $\sigma_{0,2} = 360$ МПа.

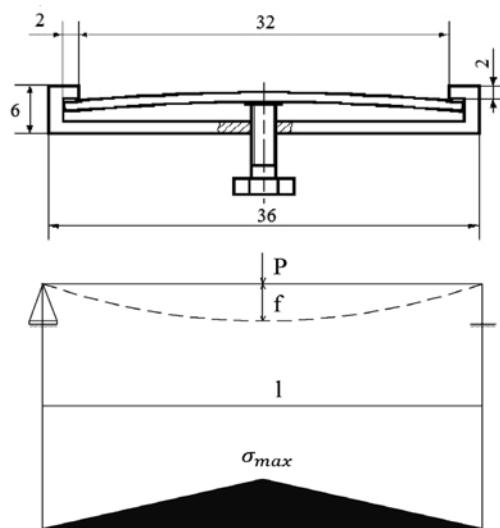


Рис. 2. Схема нагружения чувствительного элемента датчика

Поскольку известно, что рабочие напряжения в трубопроводе достигают $0,7 \sigma_{0,2}$, то в чувствительных элементах датчика нам необходимо создать нагрузку, равную 252 МПа. Для этого воспользуемся разработанной в [9] схемой нагружения образца (рис. 2) и рассчитаем величину перемещения болта для каждого из чувствительных элементов [1].

Для образца без трещин и пропилов расчет величины стрелы прогиба в точке максимального напряжения вычисляется по формуле:

$$f = \frac{\sigma_{\max} \cdot l^2}{6 \cdot E \cdot h} \quad (1)$$

где σ_{\max} – напряжения, которые необходимо создать; l – длина образца; E – модуль упругости стали; h – толщина образца.

Рассчитаем величину стрелы прогиба для чувствительных элементов датчика толщиной 0,3, 0,4, 0,5 мм соответственно:

$$f = \frac{252 \cdot 10^6 \cdot 0,032^2}{6 \cdot 200000 \cdot 10^6 \cdot 0,0003} = 0,72 \text{ мм}$$

$$f = \frac{252 \cdot 10^6 \cdot 0,032^2}{6 \cdot 200000 \cdot 10^6 \cdot 0,0004} = 0,54 \text{ мм}$$

$$f = \frac{252 \cdot 10^6 \cdot 0,032^2}{6 \cdot 200000 \cdot 10^6 \cdot 0,0005} = 0,43 \text{ мм}$$

Для проверки расчетной схемы в среде Ansys была разработана численная модель датчика (рис. 3) содержащая элементы 3, создающие напряжения в чувствительных элементах 2 вследствие приложения расчетного перемещения (рис. 4).

Распределение напряжений в чувствительных элементах изображено на рис. 5. Красным цветом обозначена величина нагрузки, равная 252 МПа.

С целью испытаний полученной конструкции датчика и определения влияния напряженно-деформирован-

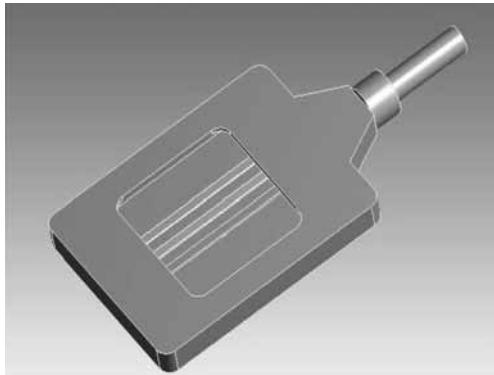


Рис. 3. Модель датчика БПИ-2 в программном комплексе Ansys: 1 – корпус датчика; 2 – чувствительный элемент датчика; 3 – болт, создающий нагрузку в чувствительном элементе

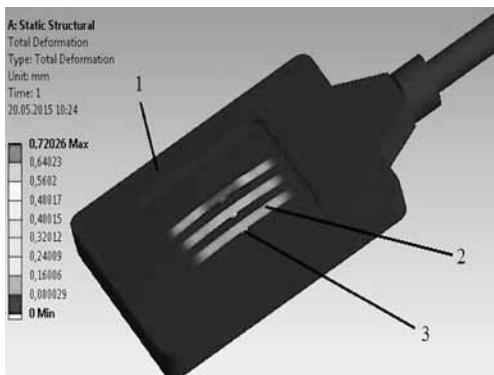


Рис. 4. Моделирование расчетных перемещений болтов в программном комплексе Ansys

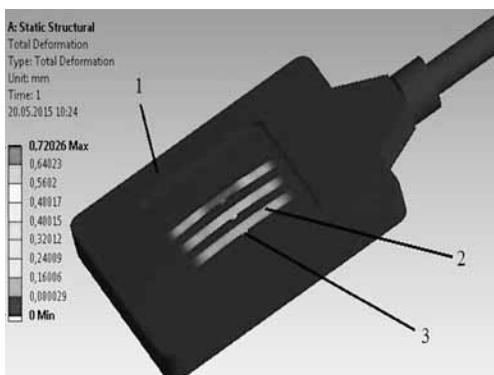


Рис. 5. Распределение напряжений в чувствительных элементах датчика

ного состояния на протекание коррозионных процессов была собрана лабораторная установка (рис. 6).

Датчик скорости коррозии 1, который будет являться катодом в данном эксперименте, подключаем к отрицательному полюсу источника тока 6. К положительному полюсу подключаем анод – металлическую пластину 3 площадью 128 см². Контроль потенциала датчика скорости коррозии осуществляется с помощью хлорсеребряного электрода сравнения 2. Показания напряжения и силы тока в цепи будут регистрироваться с помощью вольтметра 9 и амперметра 8. Величину силы тока в цепи можно регулировать при помощи реостата 7. Для предотвращения образования окисных пленок, тормозящих коррозионные процессы, к датчику будет подводиться кислород с помощью компрессора 5. Модельной средой 4 являлся 3% раствор NaCl. Для проведения исследований была выбрана величина силы тока 1 А, величина напряжения 12 В.

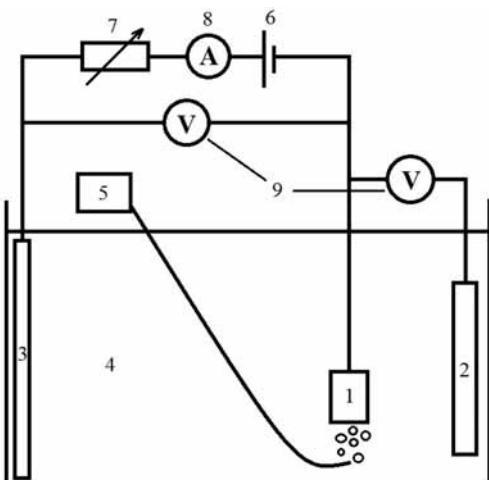


Рис. 6. Схема установки для проведения ускоренных коррозионных испытаний:
1 – датчик скорости коррозии; 2 – электрод сравнения; 3 – вспомогательный электрод; 4 – модельная среда; 5 – компрессор; 6 – источник питания; 7 – реостат; 8 – амперметр; 9 – вольтметр

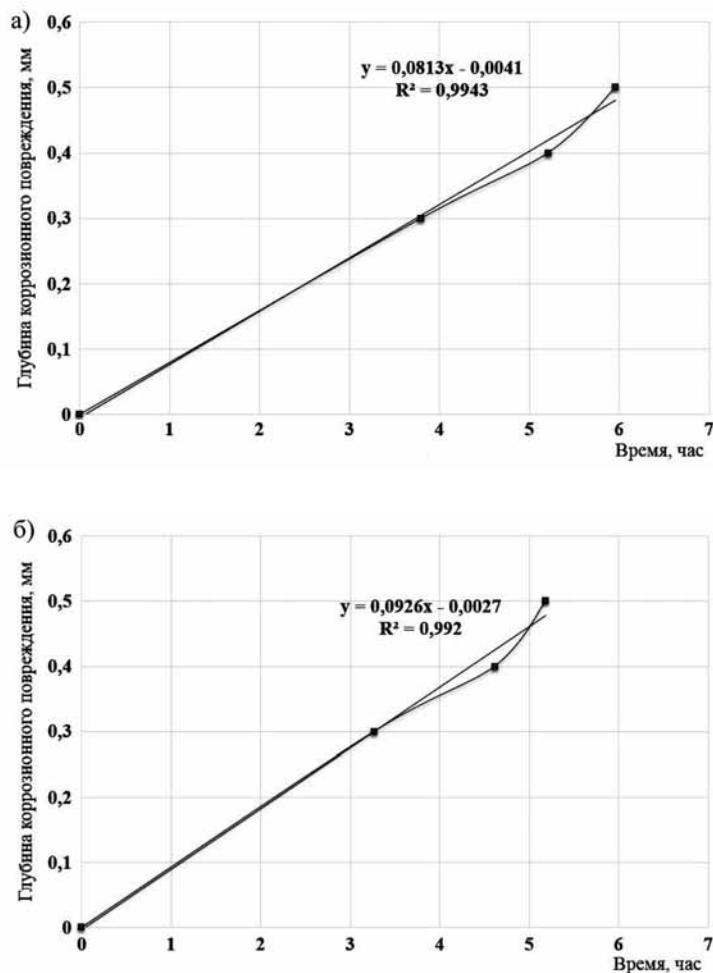


Рис. 7. График зависимости скорости коррозии датчика от времени: ненагруженный датчик (а); нагруженный (б)

Эксперимент проводился в два этапа: первый – чувствительные элементы датчика находились в ненагруженном состоянии, второй – чувствительные элементы датчика находились под нагрузкой. Результаты исследований представлены на рис. 7 а, б.

По результатам эксперимента установлено, что датчик, чувствительные элементы которого находятся под нагрузкой корродирует быстрее, чем датчик с ненагруженными чувствительными элементами. Для определения

отношения скоростей протекания коррозионных процессов на разных этапах проведения эксперимента необходимо определить отношение тангенсов углов наклона прямых (рис. 7 а, б) к оси абсцисс, которые равны: для датчика, чувствительные элементы которого находятся под нагрузкой – 0,0926, для датчика с ненагруженными чувствительными элементами – 0,0813. Из этого следует, что датчик с нагруженными чувствительными элементами корродирует на 14% быстрее. Таким образом

экспериментально доказана необходимость учета напряженно-деформированного состояния металла при проведении коррозионного мониторинга.

Выводы

Усовершенствованная конструкция датчика скорости коррозии позволяет достоверно определять скорость коррозионных процессов металла, находящегося в напряженно-деформированном состоянии и расположенного в коррозионно-активной среде. Используемый метод создания напряжений в датчике позволит применять полученную конструкцию для мониторинга свойств коррозионно-активной среды и скорости возможных коррозионных процессов на трубопроводах, изготовленных из различных марок стали,

имеющих разные механические характеристики, находящихся в различном напряженно-деформированном состоянии при эксплуатации.

Экспериментально установлено, что конструкция датчика, учитывающая напряженно-деформированное состояние металла, корродирует на 14% быстрее, что обуславливает необходимость учета напряженно-деформированного состояния при проведении коррозионного мониторинга.

Данная разработка повышает точность проведения коррозионного мониторинга магистральных трубопроводов, снижает вероятность разрушения конструкции за счет своевременного регулирования режимов работы станций катодной защиты и, при необходимости, вывода в ремонт дефектного участка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асадуллин М.З., Усманов Р.Р., Аскarov Р.М. Коррозионное растрескивание труб магистральных газопроводов // Газовая промышленность. – 2000. – № 2. – С. 38–39.
2. Временные технические требования к устройствам контроля скорости коррозии. – М.: ОАО «Газпром», 2011. – 16 с.
3. Ибрагимов А.А. Методы прогнозирования долговечности трубопроводов с учетом коррозии и переменных напряжений / Под науч. ред. А.Б. Шабарова, С.Ю. Подорожникова. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. – 76 с.
4. Мирошниченко Б.И. Роль напряженного состояния в формировании дефектов стресс-коррозии в трубопроводах // Дефектоскопия. – 2008. – № 6. – С. 42–51.
5. Носков С.В. Исследование влияния напряженно-деформированного состояния на стресс-коррозионные процессы в трубопроводах: дис. канд. техн. наук. – Тюмень: – 2003. – 163 с.
6. Рудаченко А.В., Саруев А.Л. Исследования напряженно-деформированного состояния трубопроводов: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 136 с.
7. СТО Газпром 9.4-023-2013 [Текст]: Мониторинг и прогноз коррозионного состояния объектов и оборудования. Система сбора, обработки и анализа данных.
8. Теплинский, Ю.А., Быков И.Ю. Управление эксплуатационной надежностью магистральных газопроводов. – М.: ЦентрЛитНефтегаз, 2007. – 390 с.
9. Юшманов В.Н. Совершенствование методов предотвращения стресс-коррозии металла труб магистральных газопроводов: дис. канд. техн. наук. – Ухта: – 2012. – 176 с.
10. Яковлев А.Я. Стресс-коррозия на магистральных газопроводах. – Киров: Кировская областная типография, 2009. – 320 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Самигуллин Гафур Халафович – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой, e-mail: samigullin_gch@spmi.ru
Пыстын Владимир Александрович – аспирант, e-mail: vapystin@mail.ru,
Национальный минерально-сырьевый университет «Горный».

EXPERIMENTAL STUDY OF NECESSITY TO INTRODUCE THE METAL PIPE'S STRESS-STRAIN STATE DURING THE CORROSION MONITORING

Samigullin G.Kh.¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,

Head of Chair, e-mail: samigullin_gch@spmi.ru,

Pystin V.A.¹, Graduate Student, e-mail: vapystin@mail.ru,

National Mineral Resource University «University of Mines»,
199106, Saint-Petersburg, Russia.

The necessity of taking into account the stress-strain state of the pipeline in monitoring of corrosion processes are been theoretically substantiated and experimentally proved. The model of the speed corrosion-sensitive load's sensor is present in this paper. Loads in the sensor are equivalent to the loads occurring during operation of the pipeline. The results of corrosion tests, proving the influence of the stress-strain state of metal on the rate of corrosion on pipeline, are given.

Key words: corrosion monitoring, speed corrosion sensor, the stress-strain state, finite element method, pipeline.

REFERENCES

1. Asadullin M.Z., Usmanov R.R., Askarov R.M. *Gazovaya promyshlennost'*. 2000, no 2, pp. 38–39.
2. *Vremennye tekhnicheskie trebovaniya k ustroystvam kontrolya skorosti korrozii* (Temporary specifications for corrosion rate monitors), Moscow, OAO «Gazprom», 2011, 16 p.
3. Ibragimov A.A. *Metody prognozirovaniya dolgovechnosti truboprovodov s uchetom korrozii i pere-mennykh napryazheniy*. Pod red. A.B. Shabarova, S.Yu. Podorozhnikova. Methods of prediction of pipeline durability, considering corrosion and alternate stresses. Shabarov A.B., Podorozhnikov S.Yu. (Eds.), Tyumen, TyumGNGU, 2011, 76 p.
4. Miroshnichenko B.I. *Defektoskopiya*. 2008, no 6, pp. 42–51.
5. Noskov S.V. *Issledovanie vliyaniya napryazhенно-deformirovannogo sostoyaniya na stress-korrozionnye protsessy v truboprovodakh* (Analysis of stress-strain state influence on stress-corrosion processes in pipelines), Candidate's thesis, Tyumen, 2003, 163 p.
6. Rudachenko A.V., Saruev A.L. *Issledovaniya napryazhенно-deformirovannogo sostoyaniya truboprovodov*: uchebnoe posobie (Analysis of stress-strain state of pipelines: Educational aid), Tomsk, Izd-vo TPU, 2011, 136 p.
7. STO Gazprom 9.4-023-2013. *Monitoring i prognoz korrozionnogo sostoyaniya ob'ektori oborudovaniya. Sistema sbora, obrabotki i analiza dannykh* (Gazprom Standard 9.4-023-2013. Monitoring and forecasting of corrosion of objects and equipment. Data acquisition, processing and analysis).
8. Teplinskiy, Yu.A., Bykov I.Yu. *Upravlenie ekspluatatsionnoy nadezhnostyu magistral'nykh gazoprovodov* (Functional reliability control at main pipes), Moscow, TsentrLitNeftegaz, 2007, 390 p.
9. Yushmanov V.N. *Sovershenstvovanie metodov predotvratshcheniya stress-korrozii metalla trub magistral'nykh gazoprovodov* (Improvement of methods for preventing stress-corrosion of metal of main pipes), Candidate's thesis, Ukhta, 2012, 176 p.
10. Yakovlev A.Ya. *Stress-korroziya na magistral'nykh gazoprovodakh* (Stress-corrosion of gas main pipes), Kirov, Kirovskaya oblastnaya tipografiya, 2009, 320 p.



Инженеры, не надо пугаться своих нетривиальных идей, они могут оказаться эффективными.