

PdM), – в зависимости от полноты, достоверности и преобладающего типа эксплуатационной информации (документальных данных/онлайн-данных дистанционного контроля).

Реализация указанных направлений, объединение их результатов, позволит вплотную подойти к основной цели цифровой трансформации газовой отрасли – созданию активно-адаптивных интеллектуальных «умных сетей» газоснабжения как одного из ключевых компонентов цифровой экономики государства [4].

Литература

1. Струцкий, Н. В. Создание цифрового двойника системы газоснабжения в контексте устойчивого развития городской среды / Н. В. Струцкий // Наука, бизнес и государство: консолидация в направлении обеспечения устойчивости регионального развития : сборник трудов XXII Международной научно-практической конференции. – Чебоксары, 2024. – Вып. 22. – С. 167–172.

2. Романюк, В. Н. Предиктивная аналитика объектов газораспределительной системы Республики Беларусь: текущее состояние и перспективы / В. Н. Романюк, А. М. Нияковский, Н. В. Струцкий // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2024. – № 3 (38). – С. 12–18.

3. Автоматизированные системы управления. Общие требования : ГОСТ 24.104-2023. – М. : Российский ин-т стандартизации, 2023. – 15 с.

4. Национальная стратегия устойчивого развития Республики Беларусь до 2035 года // Министерство экономики Республики Беларусь. – URL: <https://economy.gov.by/uploads/files/ObsugdaemNPA/NSUR-2035-1.pdf> (дата обращения: 23.04.2025).

УДК 622.691.4

Оценка долговечности (остаточного ресурса работоспособности) изоляционных битумных покрытий стальных газопроводов подземного залегания

Рудковский А. Т.¹, Прокопчук Н. Р.²

¹УП «МИНГАЗ»,

²Белорусский государственный технологический университет

Минск, Республика Беларусь

В настоящей работе осуществляется оценка долговечности (остаточного ресурса работоспособности) изоляционных битумных покрытий стальных газопроводов подземного залегания. Цель работы – установить зависимость долговечности (остаточного ресурса работоспособности) битумно-

мастичных изоляционных покрытий стальных газопроводов подземного залегания от энергии активации их термоокислительной деструкции. Установлен максимальный срок эксплуатации покрытий – 72 года.

Эксплуатация объектов газораспределительной системы и газопотребления осуществляется в соответствии с требованиями законодательства в области промышленной безопасности [1] и включает, в том числе, техническое диагностирование газопроводов. Стальные газопроводы подземного залегания с битумными антикоррозионными покрытиями вводились в эксплуатацию в РБ с 1959 г. по 2005 годы. К настоящему времени суммарная протяженность газопроводов, эксплуатирующихся 50 лет и более, составляет более 10 тыс. км. Правильная и своевременная оценка остаточного ресурса работоспособности битумного защитного покрытия крайне важна. По истечении ресурса работоспособности, защитное покрытие теряет свою целостность из-за деструкции битумного связующего. В покрытии появляются трещины, через которые вода, водные растворы (электролиты) проникают к поверхности стальных труб, вызывая их коррозию.

Существует хорошо зарекомендовавший себя за два десятилетия экспресс-метод определения долговечности по энергии активации термоокислительной деструкции полимерных материалов [2; 3]. Метод определения долговечности полимерных материалов основан на взаимосвязи между долговечностью и значением энергии активации, определяемой качеством материала и уменьшающейся под воздействием эксплуатационных факторов. Эксплуатационные факторы (температура и давление жидкости) были жестко зафиксированы соответствующими нормативными документами. Это позволяло оценивать снижение параметра E_d эксплуатационными факторами на величину $\Delta E_{э.ф.}$. В уравнении долговечности использовалась величина: $\Delta E_{расч} = E_d - \Delta E_{э.ф.}$.

В результате расчетов получались реальные значения долговечности, подтверждаемые на практике.

Однако этот подход применить для битумных антикоррозионных покрытий стальных газопроводов подземного залегания оказалось затруднительным из-за невозможности корректного определения $\Delta E_{э.ф.}$. Оценить эксплуатационные факторы (температуру, механические воздействия, действие химических агрессивных сред и др.) даже в первом приближении возможно с рядом допущений. Температура битумного покрытия +10 °С в значительной степени условная, т. к. не на всех участках глубина залегания газопровода 1,6 м. Очевидно также, что температура газа внутри стальных труб в течение десятков лет в разных районах РБ не может быть постоянной и равной конкретно – 10 °С. Механические напряжения, зависящие от глубины залегания труб, их диаметра и плотно-

сти грунта также разные, трудно учитываемые. Кроме того, применение уравнения долговечности для полиэтилена низкой плотности ПЭНП в случае битумных покрытий в значительной степени условно, т. к. химический состав битума не соответствует химическому составу полиэтилена.

В связи с изложенным возникла необходимость впервые применить другой подход для оценки долговечности (остаточного ресурса работоспособности – ОР) бывших в эксплуатации разное количество лет битумных покрытий. Новый подход основан на установлении зависимости $ОР - E_d$. Аналитический характер этой экспоненциальной зависимости (ее точность) зависит от числа точек на ней, т. е. от числа образцов. Чем больше образцов с разными сроками эксплуатации (СрЭ), тем выше точность построения экспоненты, тем с меньшей погрешностью выводится уравнение зависимости $ОР - E_d$. Долговечность свежего, не бывшего в эксплуатации битума, оцененная при подстановке значения E_d в уравнение для ПЭНП, принимается равной 72 года. Срок эксплуатации: 2024 г. (время отбора образцов) минус год ввода газопровода в эксплуатацию. Тогда остаточный ресурс работоспособности равен $ОР = 72 - СрЭ$. При этом в новом подходе используется универсальность параметра E_d , его способность адекватно понижаться под воздействием эксплуатационных факторов, даже неизвестных для экспериментатора.

В процессе эксплуатации битумных покрытий они стареют тем больше, чем длительнее срок их эксплуатации. В результате воздействия всех видов эксплуатационных факторов постепенно снижается молекулярная масса олигомерных молекул битума, что приводит к адекватному снижению межмолекулярных взаимодействий $E_{м.вз.}$ (чем короче фрагменты молекул битума, тем меньше $E_{м.вз.}$). Изначально пластичный битум постепенно охрупчивается, становясь более хрупким и ломким.

Таким образом, в процессе эксплуатации газопроводов подземного залегания все эксплуатационные факторы, действующие на битумные покрытия, будут понижать межмолекулярные взаимодействия ($E_{м.вз.}$), что будет автоматически учитываться соответствующим понижением параметра E_d . Минимальному значению параметра E_d будет соответствовать образец со значением $E_{м.вз.} = 0$. Построенная зависимость $ОР - E_d$ будет соответствовать реальной кинетике процесса старения защитных битумных покрытий во время их эксплуатации.

Для исключения влияния на значения параметра E_d экспериментальных факторов были предусмотрены идентичные условия проведения термоаналитических исследований для всех образцов битумов:

1. Один принцип отбора проб образцов (проба извлекалась из внутренней части битумного покрытия возле стенки металлической трубы, т. к. внешняя поверхность покрытий была в трещинах и загрязнена).
2. Проба измельчалась до размера частиц ~ 1 мм.

3. Объем пробы, загружаемый в тигель, постоянный равный 15 мг.
4. Тигли с крышкой из одного материала, одинаковой формы и размеров.
5. Все исследования проводились на одном приборе: термоаналитической установке ТА-4000 «Mettler Toledo» (Швейцария) – модуль TGA/DSC 1 HT/1600 319DTA.
6. Интервал температур 20–500 °С.
7. Скорость подъема температуры 5 град/мин.
8. Работа выполнялась одним оператором.

Расчет значений параметра E_d по данным потери массы образцами в определенном интервале температур проводили методом Бройдо согласно приложению В [3]. Результаты расчетов приведены в табл.

Для получения корректных значений параметра E_d является важным правильным выбором интервала температур, в котором определяются значения Δm %. Для большинства образцов битума был установлен интервал температур 370–410 °С.

Таблица

Результаты полученных измерений с указанным остаточным сроком эксплуатации

№ п/п	Шифр образца	Год начала эксплуатации	E_d , кДж/моль	OR, лет
1	2	3	4	5
1	№ 8	1991	113	39
2	№ 2	1995	117	43
3	№ 3	1995	116	43
4	№ 9	1997	116	45
5	№ 4	1999	118	47
6	№ 5	1999	114	47
7	№ 1	2000	118	48
8	№ 6	2004	118	52
9	№ 7	2004	119	52
10	№ 10	2004	119	52
11	Гр 3	1963	95	11
12	Гр 1	1965	95	13
13	Гр 8	1972	104	20
14	Гр 6	1975	106	23
15	Гр 9	1983	109	31
16	Гр 5	1987	112	35
17	Гр 2	1988	111	36
18	Гр 10	1992	115	40
19	Гр 7	1993	114	41
20	Гр 4	1996	116	44
21	3/1	1963	94	11
22	11/1	1985	108	33
23	12/1	1985	112	33
24	1/1	2004	117	52

Окончание табл.

1	2	3	4	5
25	2/1	2004	117	52
26	4/1	2004	118	52
28	6/1	2004	119	52
29	7/1	2004	117	52
30	8/1	2004	117	52
31	9/1	2004	117	52
32	10/1	2004	119	52
33	7M	1972	103	20
34	6M	1974	107	22
35	4M	1984	111	32
36	1M	1986	112	34
37	3M	1986	112	34
38	5M	1986	113	34
39	2M	1988	113	36
40	10M	1988	112	36
41	9M	1992	114	40
42	8M	1992	114	40
43	8/3	1967	99	15
44	1/3	1968	100	16
45	10/3	1974	105	22
46	9/3	1975	105	23
47	7/3	1977	107	25
48	3/3	1986	112	34
49	2/3	1990	113	38
50	6/3	1992	114	40
51	4/3	1994	115	42
52	5/3	1996	116	44
53	12/2	1965	99	13
54	11/2	1965	96	13
55	5/2	1991	114	39
56	6/2	1991	91	39
57	16/2	1991	113	39
58	1/2	1998	117	46
59	2/2	1998	117	46
60	13/2	1999	114	47
61	14/2	1999	115	47
62	3/2	2002	117	50
63	4/2	2002	119	50
64	7/2	2001	119	49
65	8/2	2001	119	49
66	свежий битум	2024	124	72

Анализ полученных результатов показывает, что:

1. В каждой серии образцов наблюдается четко выраженная тенденция: чем позже начало эксплуатации битумных покрытий (меньше срок их эксплуатации), тем выше значение параметра E_d . Это закономерно связано со

временем старения образцов битумных покрытий под воздействием комплекса эксплуатационных факторов. Чем глубже протекают процессы старения битумов во времени, тем меньше молекулярная масса олигомерных молекул, ниже энергия межмолекулярных взаимодействий и ниже значение параметра E_d , т. к.: $E_d = E_{x.cb} + E_{m.vz}$.

2. Для значительного числа образцов с одним годом начала эксплуатации битумных покрытий значения параметра E_d совпадают с точностью их определения ± 1 кДж/моль. Например, образцы № 24–32, введенные в эксплуатацию в 2004 г., характеризуются значениями параметра E_d равными 117–119 кДж/моль. Это характерно не только для образцов из одной серии III, но и для образцов из разных серий, например, для образцов № 11 и № 21, введенных в эксплуатацию в 1963 г., значения параметра E_d составляют 95 и 94 кДж/моль, соответственно. Это указывает на то, что район залегания газовых трубопроводов не оказывает существенного влияния на процесс старения битумных покрытий, т. е. на то, что условия их эксплуатации за долгие годы выровнялись, оказались близкими, что подтверждается одинаковыми значениями параметра E_d . Это имеет место и на других образцах из разных серий, например, № 1 (113 кДж/моль), № 18 (115 кДж/моль), № 2 (117 кДж/моль), № 3 (116 кДж/моль), № 20 (116 кДж/моль).

3. Вместе с тем, наблюдаются редкие случаи, когда образцы, введенные в эксплуатацию в один год, характеризуются разными значениями параметра E_d : образцы № 4 и № 5 (эксплуатируются с 1999 г.) имеют значения параметра E_d равные 118 и 114 кДж/моль соответственно; образцы 22 и 23 (эксплуатируются с 1985 г.) – значениями параметра E_d равными 108 и 112 кДж/моль. Это указывает на то, что образцы, взятые из этих газопроводов, эксплуатировались не в одинаковых условиях или эти образцы изначально отличались своим качеством до начала их эксплуатации. Несовпадение значений параметра E_d у образцов с одним годом ввода в эксплуатацию ярко свидетельствует о том, что теоретически учесть все эксплуатационные факторы, действующие на битумные покрытия за долгие годы невозможно. На образцы со значениями параметра E_d ниже усредненных действуют более жесткие эксплуатационные факторы, а на образцы с большими значениями параметра E_d – более легкие. По значениям остаточного ресурса работоспособности битумных покрытий (OR) и параметра E_d , представленных в табл., построена зависимость (рис. 1), имеющая вид экспоненты с 66 точками.

Потенциальная устойчивость битумных покрытий воздействию эксплуатационных факторов, характеризуемая значением $\Delta E_{\text{экс.ф.}}$, со временем их старения убывает практически до нуля.

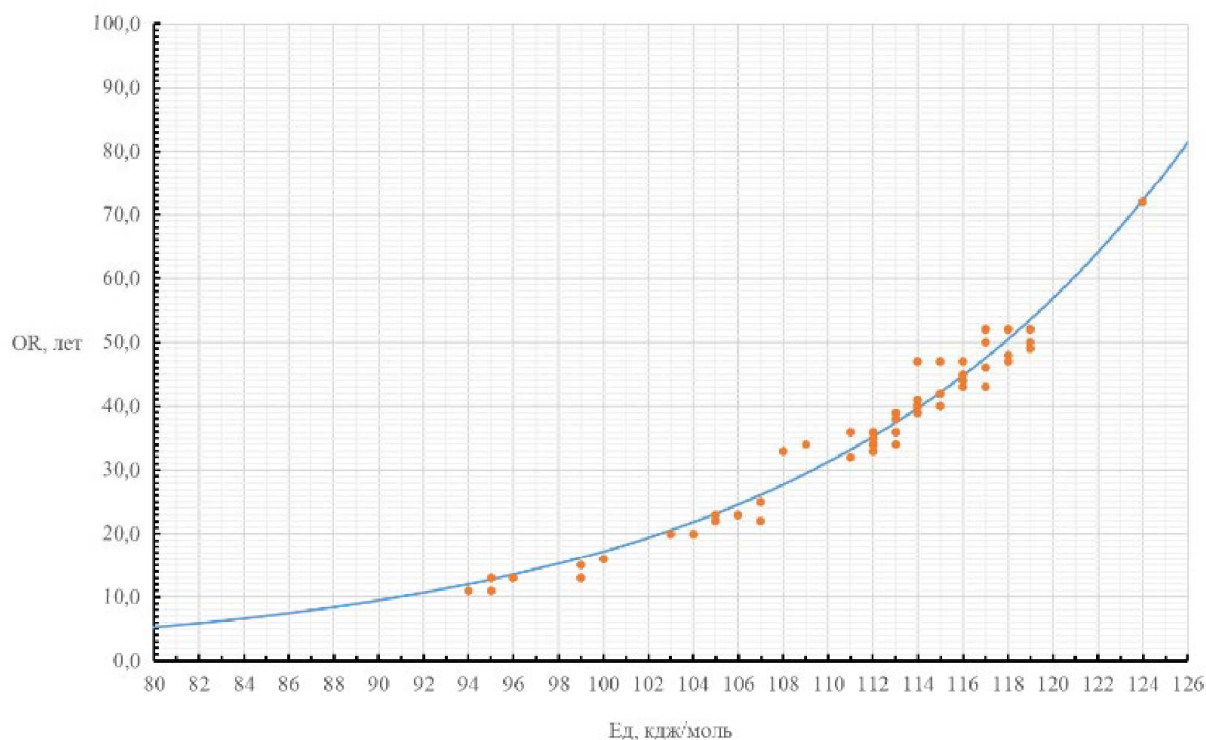


Рис.1. Графическая зависимость ожидаемой долговечности от энергии активации термоокислительной деструкции битумных покрытий

Впервые теоретически обоснован и экспериментально подтвержден универсальный характер параметра энергия активации термоокислительной деструкции (E_d) в процессе старения битумных антикоррозионных покрытий стальных газопроводов подземного залегания. Показано, что с течением времени эксплуатации газопроводов, характер E_d битумных покрытий снижается. Процесс старения обусловлен снижением молекулярной массы олигомерных молекул битума, что приводит к снижению энергии межмолекулярных взаимодействий в битумах $\Delta E_{м.вз.}$ и как следствие к адекватному понижению параметра E_d . Построена экспоненциальная зависимость OR от E_d , где OR – остаточный ресурс работоспособности (долговечность) битумного покрытия. Математической обработкой этой зависимости, минимизируя сумму квадратов ошибок между экспериментальными и модельными значениями, выведено уравнение:

$$OR = 0,541e^{0,059012 \cdot E_d}.$$

Это уравнение позволяет с достаточной точностью оценить долговечность (OR) экспресс-методом, взяв пробу битумного покрытия с газопровода и определив значение параметра E_d . Стальные газопроводы с битумантискоррозионным покрытием, введенные в эксплуатацию в начале 60-х годов прошлого сто-

летия, эксплуатируются уже около 65 лет. Максимальная долговечность битумных покрытий 72 года, поэтому остаточный ресурс работоспособности таких покрытий не более 5–7 лет. Очевидно, что уже сейчас следует планировать работы по оценке ОР битумных покрытий газопроводов, введенных в эксплуатацию до 70-х годов в конкретных районах РБ, и очередность замены газопроводов с битумными покрытиями на газопроводы из полиэтилена высокой плотности или на стальные с полиэтиленовым покрытием.

Литература

1. Техническое диагностирование и продление назначенного ресурса (назначенного срока службы) безопасной эксплуатации технических устройств, оборудования и сооружений : ТКП 054-2007. – Введ. 01.05.2007. – М. : Министерство по чрезвычайным ситуациям РБ, 2007. – 37 с.

2. Изделия полимерные для строительства. Метод определения долговечности труб полимерных для инженерно-технических систем : СТБ 1333.2-2002. – Введ. 28.06.2002. – Минск : Министерство архитектуры и строительства РБ, 2002. – 8 с.

3. Изделия полимерные для строительства. Метод определения долговечности по энергии активации термоокислительной деструкции полимерных материалов : СТБ 1333.0-2002. – Введ. 28.06.2002. – Минск : Министерство архитектуры и строительства РБ, 2002. – 8 с.

УДК 697.9; 621.638

Особенности изменения содержания кислорода в газгольдере при дегазации с применением дегазационно-вентиляционного устройства

Пехота Е. А., Романюк В. Н.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Анализируются ключевые стадии исследования разработанной технологии дегазации газгольдера с применением дегазационно-вентиляционного устройства. Отражены ключевые аспекты исследования режимов дегазации, связанных с контролем изменения содержания кислорода в процессе дегазации в условиях подготовки технологического оборудования СУГ к техническому диагностированию.

В сфере газоснабжения дегазация оборудования играет ключевую роль в поддержании промышленной безопасности и требует неукоснительного соблюдения установленных нормативов. Обеспечение качественной дегазации