

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЕЙ НА КОРРОЗИЮ АЛЮМИНИЕВЫХ ОБОЛОЧЕК СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

А.В. Коржов, А.Г. Рябухин

Экспериментально показано увеличение скорости коррозии защитных алюминиевых оболочек силовых кабелей (6 (10) кВ) под действием электрического поля, обусловленного подключением силового кабеля к источнику напряжения и магнитного поля ($4 \cdot 10^3 \text{ А} \cdot \text{м}^{-1}$). Зависимости приращения массы продуктов коррозии описаны линейными трендами, наибольшая скорость коррозии наблюдалась во вращающемся магнитном поле.

Ключевые слова: коррозия, магнитное поле, электрическое поле, силовой кабель с алюминиевой оболочкой.

Введение

В системе электроснабжения потребителей городских электрических сетей одним из самых протяжённых элементов являются силовые кабели напряжением 6 (10) кВ. Необходимо отметить, что коррозионные воздействия зачастую являются первопричиной развития пробоя изоляции, так как при разрушении металлических оболочек кабелей начинается процесс диффузии и сорбции влаги с различными ионами солей из грунта в изоляцию.

Анализ статистики повреждаемости кабелей и их причин, проведённый нами в городских сетях Челябинска и Нефтекамска, показал, что существует разница в процессе повреждений изоляции кабельных линий (КЛ), находящихся под напряжением (т. е. под воздействием электрического поля КЛ), но без нагрузки и нагруженных КЛ (т. е. под воздействием магнитного поля КЛ) [1]. Данные поля, как показывает практика эксплуатации, и статистика повреждаемости являются дополнительными факторами, влияющими на скорость коррозии металлических оболочек кабелей (нами проводилось сравнение процесса коррозии кабелей, работающих в разных условиях – на холостом ходу, под напряжением, под напряжением и нагрузкой) по отношению к процессу коррозии, например от блуждающих токов.

Целью данных исследований стало определение интенсивности процесса коррозии металлических оболочек кабелей в трёх режимах работы: 1) без воздействия электрического и магнитного полей; 2) под воздействием электрического поля; 3) кабель под воздействием магнитного поля.

Методика исследований

В качестве образцов использовались отрезки трёхжильного кабеля, сечением жил 120 мм^2 в алюминиевой оболочке (типа ААШв) диаметром 40 мм и длиной 500 мм. Для удобства наблюдения процесса коррозии алюминиевой оболочки во времени с образцов кабеля был снят наружный защитный покров в виде выпрессованного шланга – оболочки из поливинилхлорида. С одной стороны, образец был плотно изолирован концевой муфтой, с другой – три жилы раздвинуты для подключения к установке – источнику электрического и магнитного полей. Образцы помещались в 3 % мас. раствор NaCl объёмом 1 л, находящийся в прозрачном полиэтиленовом цилиндре. Глубина погружения образцов 22 см. Температура $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Исследовались три типа образцов: 1 – холостой, контрольный (К-образец); 2 – под напряжением 6 кВ (Е-образец); 3 – под действием однофазного вращающегося магнитного поля напряжённостью до $50,2 \text{ Э} (4 \cdot 10^3 \text{ А} \cdot \text{м}^{-1})$ (М-образец).

Для проведения испытаний была разработана и создана установка (рис. 1), состоящая:

1) из стандартного испытательного прожигающего аппарата по испытанию диэлектриков синусоидальным электрическим напряжением частотой 50 Гц (АИД-70) для подключения кабеля под высоковольтное напряжение 6 кВ;

2) *L*-ячейки для создания кругового вращающегося магнитного поля с напряжённостью до $4 \cdot 10^3 \text{ А} \cdot \text{м}^{-1}$. *L*-ячейка представляет собой статор, в пазах которого уложены 3 одинаковые обмотки, начало которых сдвинуто по окружности на угол 120 градусов. Схема соединения обмоток – звезда. Для получения переменного вращающегося магнитного поля на обмотки подавалось трёхфазное напряжение, через трёхфазный ЛАТР (0–380) В. Для получения однофазного переменного магнитного поля обмотки собирались последовательно и на них подавалось однофазное напряжение через ЛАТР (0–220) В. В ячейку помещался цилиндр с раствором, в котором находился М-образец.

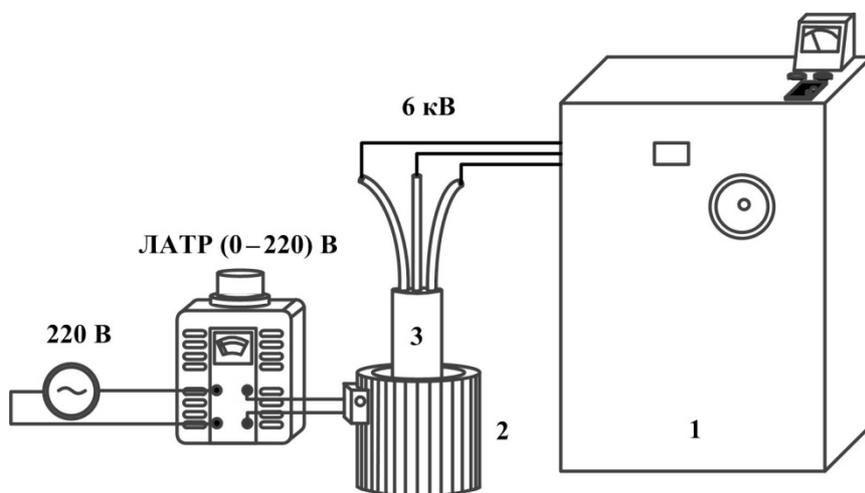


Рис. 1. Экспериментальная установка испытаний на коррозию 1 – высоковольтная установка (до 70 кВ) для подключения экспериментальных образцов кабеля под напряжение 6 кВ; 2 – *L*-ячейка для создания кругового вращающегося магнитного поля; 3 – экспериментальные образцы силовых кабелей

Изучение внешнего вида твёрдых продуктов коррозии производилось визуально на микроскопе МПБ-2 и путём фотографирования с использованием тринокулярного стереомикроскопа Nikon SMZ 745T.

Контроль коррозионного процесса оболочек производился с применением химического анализа проб раствора на содержание алюминия, использовался спектрометр эмиссионный Optima 2100 DV (160 – 900 нм). рН определяли на рН-метре рН-673.М. Концентрация хлорид-ионов в растворе (г/л) определялась титрованием нитратом ртути в кислом растворе с индикатором дифенилкарбазидом по стандартной методике [2].

Твёрдые продукты коррозии (осадки на поверхности образцов и отслоившиеся от них на дне цилиндров) изучались двумя независимыми физическими методами: дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и рентгеноструктурным анализом (РСА).

Дифференциальную сканирующую калориметрию осуществляли на синхронном термическом анализаторе Netzsch 449С в корундовых тиглях, в атмосфере воздуха со скоростью нагрева 10 К/мин.

Рентгеноструктурный анализ производился с применением дифрактометра ДРОН-3, излучением $\text{CuK}\alpha$, при 35 кВ (25 мА) в диапазоне от 10 до 90°. Для анализа дифрактограмм использовали базу рентгеновских спектров ICDD PDF2.

Результаты и их обсуждение

Осмотр исходных образцов алюминиевых оболочек кабелей показал, что на их поверхности имеются технологические осевые царапины. Образцы находились в электролите 6840 ч. Воздействию электрического и магнитного полей они подвергались периодически в общей сложности 524 ч.

Осмотр после испытаний показал, что процесс коррозии локализуется преимущественно внутри технологических дефектов (Е-образцы) и на краях дефектов (М-образцы). Характерный вид начальных коррозионных образований представлял собой одиночные шарообразные углуб-

ления в алюминиевой оболочке кабеля, которые при дальнейшем процессе коррозии соединялись между собой (на рис. 2 приведён пример для М-образца). На границе «воздух – электролит» наблюдалась характерная для алюминия и его сплавов язвенная (питтинговая) коррозия.

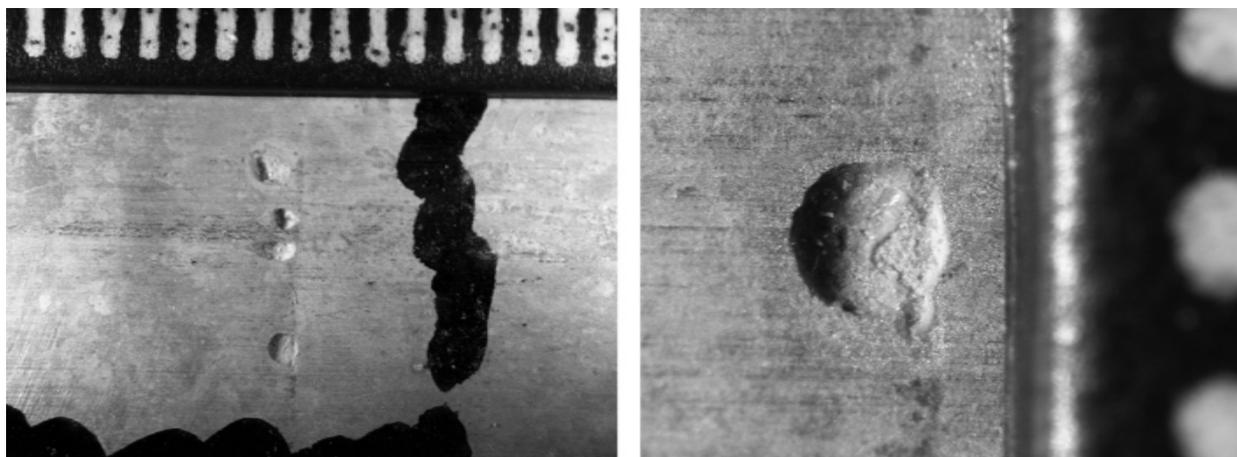


Рис. 2. Фотография алюминиевой оболочки кабеля, рассмотрен процесс коррозии в магнитном поле

На рис. 3 приведены дифрактограммы продуктов коррозии трёх исследуемых экспериментальных образцов. Анализ дифрактограмм представлен в таблице; выявлены фазы байерита, гиббсита и бемита.

На рис. 4 приведены термолитические кривые ТГ и ДСК твёрдых продуктов коррозии для трёх экспериментальных образцов.

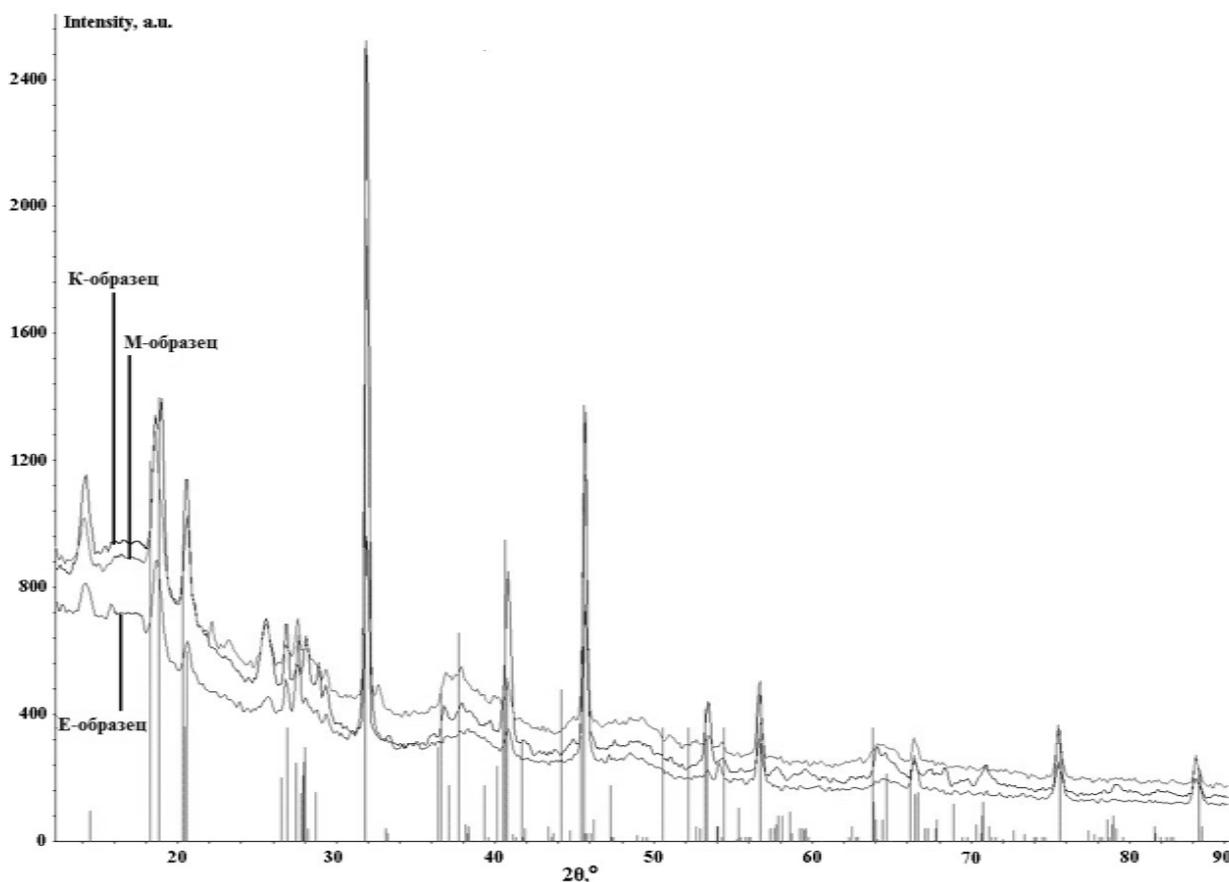


Рис. 3. Дифрактограммы исследуемых осадков из образцов

Анализ дифрактограмм исследуемых осадков из образцов

Выявленные характерные дифракционные максимумы на дифрактограммах									Состав осадка. Соответствие характерных дифракционных максимумов следующим структурам
К-образец			Е-образец			М-образец			
Угол	Пло- щадь	Макс. %	Угол	Пло- щадь	Макс. %	Угол	Пло- щадь	Макс. %	
14,2	238,89	20,93	14,2	64	4,11	14,1	83,36	9,45	Бемит
18,6	379,55	36,47	18,7	164,32	11,86	18,6	360,26	32,74	Байерит, Гиббсит
20,6	186,28	27,45	20,6	45,76	4,56	20,6	128,49	20,14	Гиббсит
26,9	53,56	11,65	26,8	35,61	4,93	26,8	45,58	5,12	Гиббсит
27,5	18,79	3,62	27,6	82,92	11,59	27,6	66,6	10,89	NaCl
29,3	21,88	3,42	29,4	10,47	1,55	29,4	12,05	2,69	Гиббсит
31,9	209,44	41,28	31,9	758,32	100	31,9	449,61	100	NaCl
33,3	4,71	1,18	–	–	–	32,7	28,84	4,4	Байерит
36,8	115,62	8,76	–	–	–	36,9	186,07	9,32	Гиббсит
37,9	249,69	9,61	38,30	109,42	2,55	37,9	295,22	10,76	Гиббсит, бемит
39,7	118,75	6,45	–	–	–	39,9	84,43	4,99	Гиббсит, байерит
40,8	277,13	37,39	40,8	31,41	3,1	40,8	66,79	8,01	Байерит
43,8	5,06	0,99	–	–	–	43	0,3	0,72	Байерит, гиббсит
45,7	168,25	31,14	45,7	376,12	50,23	45,7	280,84	54,46	NaCl
47,5	44,52	3,49	–	–	–	47,6	59,64	3,54	Гиббсит
48,5	73,22	3,55	48,5	22,27	1,46	49,2	64,71	4,07	Гиббсит, байерит
51,1	6,42	1,18	–	–	–	51	6,12	1,05	Гиббсит
53,4	98,14	14,15	53,4	10,69	1,28	53,5	12,49	2,3	Байерит
54,4	30,6	2,76	54,1	17,51	2,46	54,3	9,34	1,9	Гиббсит
56,7	35,15	7,31	56,7	104,68	13,18	56,7	84,2	15,49	NaCl
57,8	11,09	1,58	–	–	–	–	–	–	Гиббсит
59,6	19,89	2,04	–	–	–	59,6	2,32	0,79	Байерит
–	–	–	–	–	–	60,5	3,86	0,85	Гиббсит
64,1	156,3	7,57	64,4	58,4	1,55	64,1	111,74	4,72	Байерит
66,4	42,03	4,67	66,400	47,95	5,02	66,4	45,76	5,91	Гиббсит
67,5	37,18	3,29	–	–	–	–	–	–	Гиббсит
68,3	24,08	3,49	–	–	–	–	–	–	Байерит
69,8	14,83	1,25	–	–	–	–	–	–	Байерит
70,9	45,59	4,28	–	–	–	–	–	–	Байерит
75,5	34,32	5,66	75,5	104,92	10,77	–	–	–	NaCl
79	19,35	2,24	–	–	–	–	–	–	Гиббсит
81,8	20,29	1,12	–	–	–	–	–	–	Гиббсит
–	–	–	84,2	69,84	6,98	84,2	35,19	5,45	NaCl

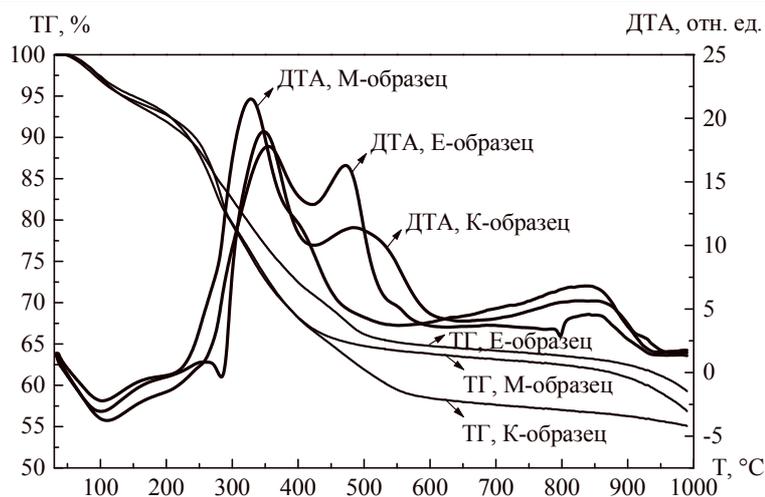


Рис. 4. Термограммы трёх экспериментальных образцов

Данные ДСК полностью подтвердили данные рентгеноструктурного анализа:

1. В составе осадка, образовавшегося в растворе, в котором находился образец под влиянием магнитного поля (М-образец), преобладает бемит $\gamma\text{-AlOOH}$, характеризующийся чётким эндотермическим максимумом на 328°C , (распад с образованием $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) и размытым максимумом на $\approx 850^\circ\text{C}$ (фазовый переход $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \delta\text{-Al}_2\text{O}_3$) [3, 4].

2. Составы осадков растворов, в которых находились образцы кабеля без воздействия полей и под влиянием электрического поля, содержат одинаковые составляющие. Эндотермические максимумы на $350\text{--}360^\circ\text{C}$ показывают наличие неустойчивого $\alpha\text{-Al}(\text{OH})_3$ (байерита), $\gamma\text{-Al}(\text{OH})_3$ (гиббсита) и перехода с распадом на смесь оксидов $\chi, \eta, \gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (преимущественно $\chi\text{-Al}_2\text{O}_3$). При $475\text{--}500^\circ\text{C}$ происходит фазовый переход $\chi\text{-Al}_2\text{O}_3$ в $\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$. При $800\text{--}850^\circ\text{C}$ переход в $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Таким образом, независимыми методами определено, что под влиянием магнитного и электрического полей на поверхности оболочек кабелей в условиях эксперимента образуются байерит, гиббсит и бемит.

Силовые кабели 6 (10) кВ прокладываются в грунте на глубине 0,7 м. За счёт атмосферных осадков и грунтовых вод, содержащих кислород и ионы солей, создаются условия для электрохимической коррозии алюминия.

Любые границы раздела фаз энергетически неоднородны. В соответствии со статистикой Больцмана, на поверхности имеются активные (энергия больше средней) и пассивные участки (энергия меньше средней). Естественно, что химическое взаимодействие начинается на активных участках.

На активных участках происходит окисление алюминия:



Катионы Al^{3+} переходят в раствор, электроны – на пассивные участки, где они ассимилируются полярными молекулами воды с восстановлением ионов водорода:



Окислительный и восстановительный процессы пространственно разделены, но совершаются одновременно.

Ионы Al^{3+} и OH^- мигрируют встречно, образуя осадок, состав которого, как показал рентгеноструктурный анализ и дифференциально-термический анализ, содержит фазы байерит $\text{Al}(\text{OH})_3$, гиббсит $\text{Al}(\text{OH})_3$, бемит AlOOH .

Так как в растворе появляются заряженные частицы, то возникает возможность управления электрохимическим процессом.

Валовые уравнения можно представить так:



Выделяющийся газообразный водород разрывает гидроксидную плёнку, отслаивает её от алюминиевой оболочки кабеля, образуя участки коррозии. Это обеспечивает непрерывность процесса коррозии. Отслоившиеся чешуйки продуктов оседают на дне цилиндров.

Продукты реакции (уравнение (3), (4)) диссоциируют, и в растворе накапливаются ионы Al^{3+} . Содержание Al^{3+} в электролите в зависимости от времени экспериментов представлено на рис. 5.

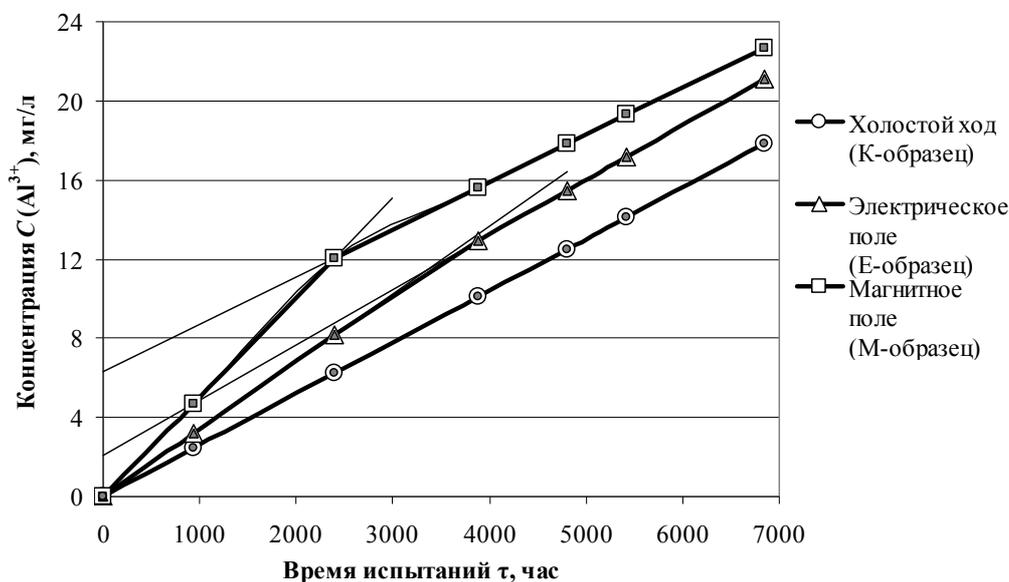


Рис. 5. Суммарные графики изменения концентрации Al^{3+} в течение времени эксперимента (заштрихованные точки соответствуют экспериментальным; полые точки соответствуют линейным зависимостям, полученным аппроксимацией экспериментальных точек с достоверностью $R^2 > 0,95$)

Кинетика коррозионного процесса

В результате обработки экспериментальных данных получены зависимости концентрации $C(Al^{3+})$ в мг/л от времени τ в часах (см. рис. 5):

$$C_K = 0,002604 \cdot \tau, \quad (5)$$

$$C_{E1} = 0,003415 \cdot \tau, \quad (6)$$

$$C_{M1} = 0,005021 \cdot \tau, \quad (7)$$

$$C_{E2} = 2,099 + 0,002778 \cdot \tau, \quad (8)$$

$$C_{M2} = 6,342 + 0,002390 \cdot \tau. \quad (9)$$

Из формы зависимостей концентрации катионов Al^{3+} в растворе от времени испытаний ($C(Al^{3+}) = f(\tau)$), приведённых на рис. 5, можно сделать заключения:

1. Зависимости исходят из $C(Al^{3+}) = 0$ при времени $\tau = 0$.
2. Кривые изменения концентрации $C(Al^{3+}) = f(\tau)$ в осадке раствора, в которых находились образцы под влиянием электрического и магнитного полей расположены выше кривой контрольного эксперимента. Это подтверждает влияние собственного магнитного и электрического полей КЛ на коррозию алюминия.
3. Зависимость для контрольных образцов (К) является линейной и описывается уравнением $C_K = K_K \tau$.
4. Зависимости для образцов (Е) и (М) состоят каждая из двух линейных участков. Начальная (первая область), время $\tau = 0 \div \approx 2400$ часов, описываются уравнениями $C_{E1} = K_{E1} \tau$ и $C_{M1} = K_{M1} \tau$. При времени $\tau > 2400$ часов (вторая область): $C_{E2} = a_{E2} + K_{E2} \tau$ и $C_{M2} = a_{M2} + K_{M2} \tau$.

Выводы

1. Экспериментально доказана зависимость скорости коррозии алюминиевых оболочек силовых кабелей напряжением 6 (10) кВ, на примере кабеля типа ААШв (6 кВ), от воздействия собст-

венного магнитного и электрического полей, что является дополнительным фактором, ускоряющим процесс коррозии металлических оболочек кабелей (например, от блуждающих токов).

2. Скорость коррозии в однофазном вращающемся магнитном поле больше, чем в электрическом (при рассмотренных условиях эксперимента). В условиях испытаний минимальная скорость коррозии наблюдается в отсутствие воздействий электрического и магнитного полей.

3. Собственное магнитное поле трёхфазного кабеля имеет вращающийся характер и вызывает дополнительные вихревые токи в металлических оболочках кабеля, кроме того, вращающийся характер магнитного поля и его градиент могут влиять на процесс массообмена вблизи оболочки кабеля, что вероятно и является причиной дополнительного влияния на процесс коррозии. В условиях эксплуатации силового кабеля данный фактор действует совместно с блуждающими токами. Для установления механизмов влияния собственного электрического и магнитного полей КЛ необходимы дальнейшие системные исследования с учётом конструктивных особенностей силовых кабелей 6(10) кВ и условий их эксплуатации.

4. Проведённые исследования необходимы для разработки конструктивных решений при проектировании силовых кабелей для оптимизации параметров магнитного и электрического полей, выборе расположения фаз кабеля (так например фазы могут располагаться в ряд или в треугольник, при расположении треугольником происходит компенсация общего магнитного поля кабеля; жилы могут иметь круглую и секторную форму; при секторной форме и расположении треугольником происходит выравнивание картины электрического поля, что может замедлить процесс коррозии).

Литература

1. Математическая модель повреждаемости изоляции силовых кабельных линий городских электрических сетей / А.В. Коржов, А.И. Сидоров, Е.Ю. Юрченко, А.Б. Николаевский // Электрические станции. – 2008. – № 8. – С. 40–47.

2. Лурье, Ю.Ю. Химический анализ производственных сточных вод / Ю.Ю. Лурье, А.И. Рыбникова. – М.: Химия, 1974. – 336 с.

3. Миркин, Л.И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов / Л.И. Миркин. – М.: ГИЗ ФМЛ, 1961. – 863 с.

4. Химическая энциклопедия: в 5 т. – М.: Сов. энциклопедия, 1988. – Т. 1. – 623 с.

Поступила в редакцию 10 октября 2012 г.

ELECTRIC AND MAGNETIC FIELD INFLUENCE UPON POWER CABLE ALUMINUM JACKETS CORROSION

Rate increase of protective aluminum jackets corrosion of power cables (6 (10) kV) is shown experimentally under the influence of electric field generated by joining of the power cable to a voltage source and magnetic field ($4 \cdot 10^3$ A/m). The dependence of mass addition for corrosion products is described by linear trends, the greatest corrosion rate is observed in rotating magnetic field.

Keywords: corrosion; magnetic field; electric field; power cable with aluminum jacket

Korzhov Anton Veniaminovich – PhD (Technical), Associate Professor, Subdepartment Power station, networks and systems, South Ural State University. 76, Lenin avenue, Chelyabinsk, 454080.

Коржов Антон Вениаминович – кандидат технических наук, доцент, кафедра «Электрические станции, сети и системы», Южно-Уральский государственный университет. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

E-mail: AVK1978@mail.ru

Ryubukhin Aleksandr Grigorevich – Dr. Sc. (Chemistry), Professor, Physical Chemistry Sub department, South Ural State University. 76, Lenin avenue, Chelyabinsk, 454080.

Рябухин Александр Григорьевич – доктор химических наук, профессор, кафедра «Физическая химия», Южно-Уральский государственный университет. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

E-mail: ryabukhin@inbox.ru