

DOI: 10.32864/polymmattech-2022-8-3-65-73

УДК 620.197.6; 667.6; 661.832

## ВЫБОР ЛАКОКРАСОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ АНТИКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ АППАРАТОВ ПЕРЕРАБОТКИ КАЛИЙНЫХ РУД

А. Н. ПОТАПЧИК<sup>+</sup>, А. Л. ЕГОРОВА

Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь

В результате анализа условий работы аппаратов переработки калийных руд выявлено, что преобладающими являются гидротермическое и химическое воздействия суспензии рудного материала и насыщенного щелока. К основным эксплуатационным факторам относятся термическое (около 100 °C) воздействие, присутствие в жидкой фазе до 18,5 мас.% KCl и NaCl, а также MgCl<sub>2</sub>, CaCl<sub>2</sub> до 4 мас.% суммарно и абразивное воздействие взвешенных твердых частиц в турбулентных потоках. В качестве дополнительных мер защиты аппаратов переработки калийных руд, изготавляемых из высоколегированных сталей, используют электрохимические методы, футеровку и нанесение антикоррозионных лакокрасочных покрытий.

Цель работы — выбор наиболее долговечных лакокрасочных материалов, способных обеспечить длительную антикоррозионную защиту основного технологического оборудования переработки калийных руд.

В работе изложен разработанный авторами ускоренный электрохимический метод прогнозирования долговечности антикоррозионных лакокрасочных покрытий и проведена оценка его достоверности по результатам длительных испытаний в промышленных условиях.

Для исследований отобран ряд эпоксидных, полиэфирных, эпоксиволачных лакокрасочных материалов ведущих мировых производителей. В работе изучено изменение физико-механических, деформационно-прочностных и электрохимических свойств лакокрасочных покрытий в процессе их эксплуатации в реальных и моделируемых условиях работы аппаратов переработки калийных руд: сгустителей типа Брандес, Дорр и шнековом растворителе. Установлено, что под воздействием эксплуатационных факторов, только эпоксиволачные покрытия сохранили высокие физико-механические и деформационно-прочностные свойства, что способствует увеличению их долговечности. Рассчитан срок службы исследованных покрытий и установлено, что наиболее длительную антикоррозионную защиту стальных поверхностей обеспечивает эпоксиволачное покрытие Enviroline 405HTR: 13,6 лет в жидкой фазе сгустителя Брандес, 22,4 лет в паровоздушной фазе сгустителя Дорр и 4,6 лет в шнековом растворителе.

**Ключевые слова:** электрохимическая коррозия, защита от коррозии, лакокрасочное покрытие, расчет срока службы, емкостно-частотный коэффициент, абразивная стойкость.

## CHOOSING PAINT MATERIALS FOR ANTICORROSION PROTECTION OF POTASH ORE PROCESSING MACHINES

А. Н. ПОТАПЧИК<sup>+</sup>, А. Л. ЕГОРОВА

Belarusian State Technological University, Sverdlov St., 13a, 220006, Minsk, Belarus

*As a result of the analysis of the operating conditions, it was found that potash ore processing equip-*

\*Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: alexander.potapchik@mail.ru

ment are operated under the hydrothermal and chemical influence of a suspension of ore material. The main operational factors are thermal exposure (about 100 °C), the content in the liquid phase up to 18.5 wt.% KCl and NaCl, as well as MgCl<sub>2</sub>, CaCl<sub>2</sub> up to 4 wt.% in total, the abrasive impact of suspension in turbulent flows. Electrochemical methods, lining and application of anticorrosive paint coatings are used as additional protection measures for potash ore processing equipment.

The purpose of the work is to select the most durable paints capable of providing long-term anticorrosive protection of potash ore processing equipment.

The paper describes an accelerated electrochemical method for predicting the durability of anticorrosive coatings and evaluates its reliability in long-term studies in industrial conditions.

For research, epoxy, polyester, epoxy novolac paint coatings were selected and the change in their physico-mechanical, deformation-strength and electrochemical properties was determined during operation in real and simulated operating conditions of potash ore processing equipment: thickeners such as Brandes, Dorr and screw vehicle. It was found that under the influence of operational factors, only epoxy novolac coatings retained high physico-mechanical and deformation-strength properties, which contributes to an increase in the durability of these coatings. The service life of the coatings was calculated and it was found that the longest anticorrosive protection of steel surfaces is provided by the Enviroline 405HTR epoxy novolac coating (13.6 years in the liquid phase of the Brandes thickener, 22.4 years in the vapor-air phase of the Dorr thickener and 4.6 years in the screw vehicle).

**Keywords:** electrochemical corrosion, corrosion protection, paint coating, service life calculation, capacitance-frequency coefficient, abrasion resistance.

## Введение

Предприятие ОАО «Беларуськалий» является одним из крупнейших производителей калийных удобрений и выпускает до 20% мирового объема данного продукта [1]. Производство хлорида калия может быть организовано флотационным и галургическим методами. Получение высококачественного продукта с наибольшим содержанием KCl обеспечивает галургический метод, основанный на различных температурных зависимостях растворимости хлоридов натрия и калия [2].

Основным технологическим оборудованием процесса обогащения калийной руды галургическим методом являются [2]:

- шнековые растворители, применяемые для растворения руды в щелоке (водный раствор, содержащий преимущественно хлориды калия и натрия);
- сгустители типа Брандес, Дорр, предназначенные для удаления глинистого шлама из неосвещенного насыщенного щелока;
- вакуум-кристаллизационные установки, в которых происходит кристаллизация KCl;
- барабанные сушилки, либо сушилки кипящего слоя, предназначенные для удаления влаги.

Коррозионная опасность технологического процесса переработки калийных руд обусловлена гидротермическим и химическим воздействиями супензии рудного материала и насыщенного щелока [3]. При этом можно выделить следующие основные эксплуатационные факторы:

- повышенные до 100 °C температуры;
- содержание в жидкой фазе до 18,5 мас.% KCl и NaCl, а также до 4 мас.% MgCl<sub>2</sub>, CaCl<sub>2</sub> суммарно, что создает предпосылки для протекания питтинговой и язвенной коррозии;
- абразивное воздействие взвешенных твердых частиц руды в турбулентных потоках (трубопрово-

ды, шнековый растворитель).

При изготовлении рудоперерабатывающего оборудования используют высоколегированные стали (10Х17Н13М2Т, 08Х21Н6М2Т, 08Х18Н10Т и др.), что, однако, не исключает коррозионное разрушение аппаратов под воздействием жестких условий эксплуатации. С целью увеличения эксплуатационного ресурса оборудования применяют дополнительные методы защиты: футеровку, катодную и протекторную защиту, нанесение лакокрасочных покрытий. Выбор метода защиты обусловлен условиями эксплуатации, удобством применения и экономической целесообразностью.

Например, дополнительная защита стального шнекового растворителя может быть осуществлена с помощью протекторов — изделий из более электроотрицательных металлов (магний, цинк, алюминий и их сплавы), размещаемых в контакте с защищаемым металлом [4, 5]. В процессе эксплуатации протектор изнашивается, вследствие чего защитное действие снижается, что требует его периодической замены.

В настоящее время применение лакокрасочных материалов является перспективным методом защиты металлических изделий участков переработки калийных руд: внешней и внутренней поверхностей трубопроводов, баков насыщенного щелока, сгустителей и др. Высокая адгезия, химическая и термическая устойчивость современных лакокрасочных покрытий на основе эпоксиноволачных и ненасыщенных модифицированных полизифирных смол обуславливает успешность их применения даже в таких высокоагрессивных средах.

Взаимодействие с потребителями и производителями защитных лакокрасочных материалов показало, что основным инструментом оценки антикоррозионной эффективности лакокрасочных покрытий в рамках натурных испытаний является визуальный

осмотр, а критерием надежности материала — отсутствие его видимого разрушения по истечении ограниченного периода эксплуатации. Такой подход не несет прогностической ценности и поэтому ограниченно применим при исследовании долговечных лакокрасочных покрытий.

Нами разработан электрохимический метод прогнозирования долговечности антикоррозионных лакокрасочных покрытий [6], применение которого позволяет в короткие сроки оценить срок службы лакокрасочных покрытий в заданных условиях эксплуатации.

Цель работы — выбор наиболее долговечных лакокрасочных материалов, способных обеспечить длительную антикоррозионную защиту основного технологического оборудования переработки калийных руд.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

— исследовать изменение физико-механических свойств лакокрасочных покрытий под воздействием эксплуатационных факторов;

— установить кинетику изменения емкостно-частотных коэффициентов покрытий в процессе эксплуатации и рассчитать срок службы лакокрасочных покрытий.

### Материалы и методы исследования

Исследования проводились на покрытиях, сформированных из антикоррозионных лакокрасочных материалов с различной химической природой пленкообразующей системы (табл. 1).

Лакокрасочные материалы наносили с двух сторон на пластины из стали 08 кп, очищенные до степени Sa 2½ (ГОСТ Р ИСО 8501-1) и обезжиренные ацетоном. Перед испытанием окрашенные пластины выдерживали при комнатной температуре в течение 7 сут.

Толщину покрытий на стальных пластинах измеряли цифровым электромагнитным толщинометром «Константа-К5» («Константа», Россия). Адгезию лакокрасочных покрытий методом отрыва

определяли в соответствии с ГОСТ 28574. Определение прочности при ударе покрытий проводили по ГОСТ 4765 с использованием прибора «У-2М» («Константа», Россия).

Устойчивость к абразивному воздействию определяли по величине потери массы покрытий с помощью абразиметра «Taber GT-7012-T» («Gotech Testing Machines», Тайвань), нагрузка 1 кг, количество оборотов 1000, скорость 72 об/мин. Использовали абразивные колеса *H-18 Calibrase* («Taber Industries», США).

Защитные свойства лакокрасочных покрытий оценивали по величине емкостно-частотных коэффициентов, рассчитываемых по формуле:

$$K_{F,C} = \bar{C} \cdot \left( \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{C_{min}} \right) / N, \quad (1)$$

где  $\bar{C}$ ,  $\Phi$  — средневзвешенная величина емкости системы «окрашенная стальная пластина-электролит» в частотном диапазоне 500–2000000 Гц;  $N$  — количество измерений в выбранном частотном диапазоне;  $C_i$ ,  $\Phi$  — величина емкости окрашенной стальной пластины при частоте переменного тока  $F_i$ , входящей в выбранный частотный диапазон;  $C_{min}$ ,  $\Phi$  — минимальная величина емкости окрашенной стальной пластины в выбранном частотном диапазоне.

Средневзвешенную величину емкости рассчитывали с учетом коэффициентов весомости по формуле:

$$\bar{C} = \left( \sum_{i=1}^N k_i \cdot C_i \right) / N, \quad (2)$$

где  $k_i$  — коэффициент весомости величины емкости  $C_i$ .

Коэффициенты весомости рассчитывали по формуле:

$$k_i = \frac{\lg(F_N)}{\lg(F_i)}, \quad (3)$$

где  $F_N$ , Гц — величина частоты переменного тока верхнего предела частотного диапазона измерений (2000000 Гц);  $F_i$ , Гц — величина частоты переменного тока, при которой проводилось измерение емкости  $C_i$ .

Таблица 1 — Характеристика исследуемых лакокрасочных материалов и покрытий  
Table 1 — Characteristics of the studied paint and coatings

Торговое наименование	<i>Enviroline 405HTR</i>	<i>Corrothane XT</i>	<i>CarboLine SP-8988</i>	Фарбакоут Винилэстэр 51/1	<i>Inerta 165</i>
Условное обозначение	А	Б	В	Г	Д
Химическая природа пленкообразующей системы	эпоксиноволачная	полиэфирная	эпоксиноволачная	полиэфирная	эпоксидная
Плотность, г/см <sup>3</sup> , не менее — компонента А — компонента Б	1,52 1,69	1,23 1,00	1,51 1,00	1,25 1,15	1,60 1,10
Жизнеспособность при 25 °C после смешения, мин, не менее	50	25	60	45	90
Массовая доля нелетучих веществ, %	98	99	100	95	75
Время полного отверждения, ч, не более	14	24	6,5	48	168
Толщина покрытия, мкм	1100–1250	1100–1300	1100–1300	1100–1500	720–850

Измерения выполняли при частотах переменного тока  $F_i$ , представленных в табл. 2.

Таблица 2 — Частоты измерения и соответствующие им коэффициенты весомости  
Table 2 — Measurement frequencies and weight factors corresponded them

$F_i$ , Гц	$\lg(F_i)$	Коэффициент весомости $k_i$
500	2,699	2,335
1000	3,000	2,100
2000	3,301	1,909
10000	4,000	1,575
20000	4,301	1,465
40000	4,602	1,369
80000	4,903	1,285
200000	5,301	1,189
400000	5,602	1,125
800000	5,903	1,067
1600000	6,204	1,016
2000000	6,301	1,000

Долговечность (срок службы) лакокрасочных покрытий ( $\tau_p$ , ч) рассчитывали по формуле (4), основываясь на кинетике изменения емкостно-частотного коэффициента до критической величины [6], зависящей от химической природы пленкообразующей системы и характера разрушения покрытия при нормальном отрыве (табл. 3):

$$\tau_p = \left( \frac{\ln(K_{F,C}^{kp}) - \ln(K_{F,C}^0)}{b} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (4)$$

где  $K_{F,C}^{kp}$ ,  $\Phi$  — критическая величина емкостно-частотного коэффициента;  $K_{F,C}^0$ ,  $\Phi$  — величина емкостно-частотного коэффициента в начале стадии его активного роста;  $b$ ,  $\chi^n$  и  $n$  — коэффициенты, определяющиеся агрессивностью воздействия эксплуатационных условий и устойчивости покрытия к такому воздействию.

Коэффициенты  $b$  и  $n$  находили путем аппроксимации экспериментальных данных, выраженных величинами емкостно-частотных коэффициентов при различных продолжительностях испытания, к следующему уравнению:

$$K_{F,C} = K_{F,C}^0 \cdot e^{b \cdot \tau^n}, \quad (5)$$

где  $\tau$ , ч — продолжительность воздействия эксплуатационных факторов.

Испытания в реальных условиях работы аппаратов переработки калийных руд проводили на четвертом рудоуправлении ОАО «Беларуськалий» в сгустителях Брандес, Дорр и шнековом растворителе. Для проведения лабораторных испытаний разработали установку, воспроизводящую условия экспонирования в сгустителе Брандес, при этом в качестве жидкой агрессивной среды использовали водный раствор на основе сильвинитовой руды при температуре 95–107 °C, содержащий в жидкой фазе 20 мас.% KCl, 18 мас.% NaCl, 1,1 мас.% MgCl<sub>2</sub>,

2,0 мас.% CaCl<sub>2</sub> и 0,5 мас.% CaSO<sub>4</sub>.

Таблица 3 — Критические величины емкостно-частотных коэффициентов  
Table 3 — Critical values of the capacitance-frequency coefficients

Химическая природа пленкообразующей системы	Тип разрушения при определении адгезии методом отрыва	$K_{F,C}^{kp}$ , $\Phi$
Полиэфирная	когезионный (к)	$5 \cdot 10^{-2}$
Полиуретановая	адгезионный (а)	$1 \cdot 10^{-4}$
Эпоксидная	к	$5 \cdot 10^{-3}$
Эпоксиволачная	а	$1 \cdot 10^{-4}$

## Результаты и их обсуждение

Испытания в лабораторных условиях проводили с целью ускоренного определения срока службы исследуемых покрытий и последующего сопоставления полученных значений с результатами промышленных испытаний.

В процессе экспонирования физико-механические свойства большинства исследуемых покрытий снизились (табл. 4). Для покрытий Б, Г и Д наблюдали уменьшение адгезии с 3,0 МПа до 2,0 МПа, а также ухудшение устойчивости к абразивному воздействию, что выражалось в увеличении потери массы покрытий в соответствующем испытании. В то же время физико-механические свойства эпоксиволачных покрытий А и В сохранились на исходном уровне (за исключением незначительного снижения прочности при ударе покрытия А), что свидетельствует о большей устойчивости данных материалов в агрессивной среде.

Величина адгезии и характер разрушения материала при нормальном отрыве являются важными показателями, оказывающими влияние на долговечность лакокрасочных покрытий, т. к. сохранение высокого уровня адгезии в течение длительного периода эксплуатации затрудняет развитие процесса подпленочной коррозии.

Характер изменения деформационно-прочностных свойств лакокрасочных пленок зависит от природы пленкообразующей системы (табл. 5). Прочность при разрыве покрытий Б, Г и Д снизилась, а покрытий А и В, напротив, увеличилась. Относительное удлинение при разрыве большинства покрытий снизилось, исключение составило покрытие В, для которого данный показатель увеличился на 30%.

Лучшие физико-механические и деформационно-прочностные свойства по результатам испытаний демонстрирует эпоксиволачное покрытие В, сохранившее адгезию на уровне не менее 10,0 МПа, прочность при ударе не менее 50 см и прочность на разрыв более 40 МПа. Сохранение хороших деформационно-прочностных свойств лакокрасочных пленок под воздействием агрессивных сред обеспечивает длительный срок службы лакокрасочных покрытий, в то время как в пленках, характеризующихся малым относительным удлинением при разрыве, затруднена релаксация внутренних

Таблица 4 — Изменение физико-механических свойств лакокрасочных покрытий в процессе экспонирования в лабораторных условиях

Table 4 — Changes in the physical and mechanical properties of coatings during exposure in laboratory conditions

Покрытие	Продолжительность экспонирования, ч				
	0	250	500	1000	1500
Адгезия, МПа					
А	>10,0 (а)	>10,0 (а)	>10,0 (а)	>10,0 (а)	>10,0 (а)
Б	3,0 (к)	3,0 (к)	2,5 (к)	2,0 (к)	2,0 (к)
В	>10,0 (а)	>10,0 (а)	>10,0 (а)	>10,0 (а)	>10,0 (а)
Г	3,0 (а)	2,5 (к)	2,5 (к)	2,5 (к)	2,0 (к)
Д	3,0 (к)	3,0 (к)	2,5 (к)	2,0 (к)	2,0 (к)
Прочность при ударе, см					
А	60	60	60	55	55
Б	30	35	40	40	40
В	50	50	50	50	50
Г	35	35	35	35	35
Д	75	75	75	75	70
Потеря массы при абразивном воздействии, г					
А	0,27	0,27	0,27	0,29	0,29
Б	0,33	0,36	0,41	0,44	0,44
В	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
Г	0,20	0,20	0,21	0,24	0,18
Д	0,37	0,35	0,38	0,47	0,51

Примечание: в скобках указан характер разрушения при определении адгезии методом отрыва: «а» — адгезионный, «к» — когезионный

Таблица 5 — Деформационно-прочностные свойства лакокрасочных пленок

Table 5 — Deformation-strength properties of paint films

Покрытие	Продолжительность экспонирования, ч				
	0	250	500	1000	1500
Прочность на разрыв, МПа					
А	37,2	44,2	44,3	42,5	40,1
Б	32,0	31,3	29,3	25,0	23,0
В	23,0	33,0	44,6	46,7	47,9
Г	33,0	32,8	32,5	32,0	31,1
Д	17,0	16,5	16,1	16,0	15,8
Относительное удлинение при разрыве, %					
А	2,00	1,75	1,44	1,18	1,10
Б	1,10	0,81	0,79	0,66	0,54
В	1,61	1,72	1,90	2,05	2,11
Г	1,00	0,97	0,94	0,93	0,92
Д	4,00	0,89	0,74	0,52	0,46

напряжений, что может приводить к появлению микротрещин в покрытиях, снижающих их изолирующие свойства.

В процессе испытаний определяли величины емкости систем «окрашенная стальная пластина—электролит» и рассчитывали емкостно-частотные коэффициенты исследуемых покрытий (рис. 1). При последующей обработке экспериментальных дан-

ных в качестве аппроксимирующей функции использовали зависимость (5), в результате чего установлены коэффициенты  $b$  и  $n$ , необходимые для расчета срока службы лакокрасочных покрытий (табл. 6). Близкие к 100% численные значения коэффициентов детерминации  $R^2$  свидетельствуют о том, что полученные зависимости описывают экспериментальные данные с высокой точностью.

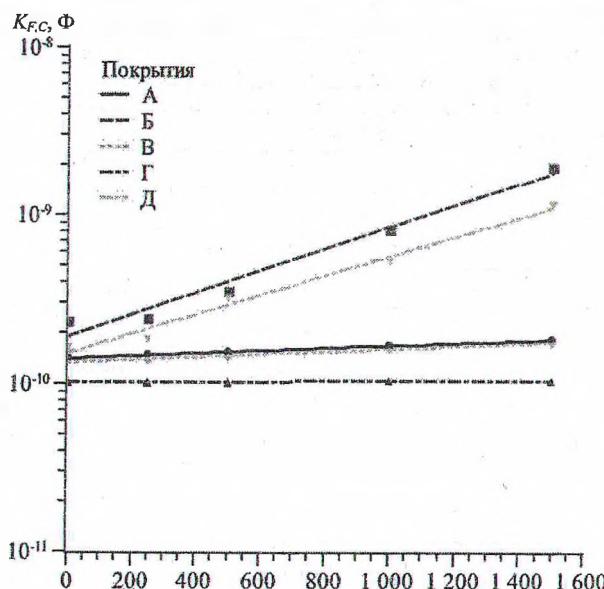


Рисунок 1 — Зависимость величин емкостно-частотных коэффициентов исследуемых покрытий от продолжительности экспонирования в лабораторных условиях

Fig. 1 — Dependence of the values of the capacitance-frequency coefficients of coatings on the duration of exposure with laboratory conditions

Наиболее долговечными являются эпоксиноволачные покрытия А и В, расчетный срок службы которых составляет более 13 и 8 лет соответственно. Расчетный срок службы полиэфирного Б и эпоксидного Д покрытий не превышает 1,5 лет.

Анализ представленных данных подтвердил справедливость ранее выдвинутого предположения о том, что покрытия, сохраняющие хорошие физико-механические и деформационно-прочностные свойства, обладают большей долговечностью. Так, эпоксиноволачные покрытия А и В, адгезия

которых сохранилась на уровне более 10,0 МПа, а прочность на разрыв увеличилась, отличаются длительным сроком службы. Покрытия Б и Д, адгезия, прочность на разрыв и относительное удлинение при разрыве которых в процессе испытаний уменьшились, характеризуются значительной меньшей долговечностью.

Промышленные испытания исследуемых покрытий осуществляли в течение трех временных интервалов, длительных которых определялась производственной программой ОАО «Беларуськалий», при этом суммарная продолжительность экспонирования в сгустителях Брандес и Дорр составила 8425 ч, а в шнековом растворителе — 6000 ч.

Воздействие эксплуатационных факторов при экспонировании в промышленных условиях привело к снижению адгезии полиэфирных покрытий Б, Г и эпоксидного покрытия Д, в то время как адгезия эпоксиноволачных покрытий А и В сохранилась на уровне более 10,0 МПа. Для эпоксидных покрытий Д, размещенных непосредственно в жидкой агрессивной среде (сгуститель Брандес и шнековый растворитель), наблюдалось не только снижение адгезии в 6–10 раз, но и изменение характера их разрушения при нормальном отрыве с когезионного на адгезионный (табл. 7). Указанные изменения физико-механических свойств лакокрасочных покрытий ускоряют возникновение, либо свидетельствуют об уже протекающем процессе подпленочной коррозии. Прочность при ударе большинства покрытий снизилась в пределах 5–10 см, исключение составляют покрытия Б, у которых данный показатель увеличился на 10 см при экспонировании их в сгустителях Брандес и Дорр.

В результате промышленных испытаний сформировали базу данных по изменению электрохимических

Таблица 6 — Расчетный срок службы лакокрасочных покрытий по результатам лабораторных испытаний  
Table 6 — Estimated lifetime of coatings according to the results of laboratory tests

Покрытие	K <sub>F,C</sub> <sup>exp</sup> , Φ	Коэффициенты уравнения $\ln K_{F,C} = \ln K_{F,C}^0 + b \cdot \tau^n$			Коэффициент детерминации R <sup>2</sup> , %	τ <sub>p</sub>	
		ln K <sub>F,C</sub> <sup>0</sup>	b, ч <sup>-n</sup>	n		ч	лет
А	1,0 · 10 <sup>-4</sup>	-22,6925	3,4497 · 10 <sup>-4</sup>	0,9073	99,97	115117	13,1
Б	5,0 · 10 <sup>-2</sup>	-22,3891	1,4934 · 10 <sup>-3</sup>	1,0000	98,64	12985	1,5
В	1,0 · 10 <sup>-4</sup>	-22,7391	1,8243 · 10 <sup>-4</sup>	1,0000	97,99	74160	8,5
Г	5,0 · 10 <sup>-2</sup>	-23,0028	2,4576 · 10 <sup>-3</sup>	1,8624	96,65	60874	6,9
Д	5,0 · 10 <sup>-3</sup>	-22,6174	1,3254 · 10 <sup>-3</sup>	1,0000	98,55	13087	1,5

Таблица 7 — Изменение физико-механических свойств лакокрасочных покрытий в процессе экспонирования в промышленных условиях

Table 7 — Changes in the physical and mechanical properties of coatings during exposure in industrial conditions

Аппарат	Адгезия, МПа										Прочность при ударе, см									
	до экспонирования					после экспонирования					до экспонирования					после экспонирования				
	покрытие										покрытие									
	А	Б	В	Г	Д	А	Б	В	Г	Д	А	Б	В	Г	Д	А	Б	В	Г	Д
Сгуститель Брандес	10,0 (а)	3,0 (к)	10,0 (а)	3,0 (а)	3,0 (к)	10,0 (а)	1,5 (к)	10,0 (а)	2,0 (к)	0,3 (а)	55	40	50	35	65					
Сгуститель Дорр						10,0 (а)	1,5 (к)	10,0 (а)	2,0 (к)	1,5 (к)	60	30	50	35	75	55	40	50	25	70
Шнековый растворитель						10,0 (а)	0,5 (к)	10,0 (а)	2,0 (к)	0,5 (а)	55	25	50	35	60					

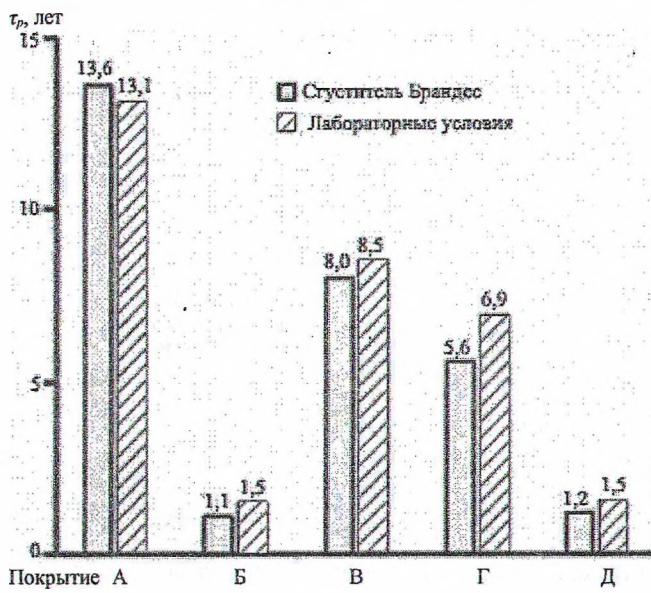
свойств исследуемых лакокрасочных покрытий, что позволило посредством статистической обработки оценить кинетику изменения величин емкостно-частотных коэффициентов и рассчитать срок службы покрытий в различных аппаратах (табл. 8). Долговечность покрытий, сформированных из одного и того же лакокрасочного материала, различается в зависимости от условий экспонирования в аппаратах:

— в сгустителе Брандес покрытия размещаются в переливном желобе, вследствие чего испытывают воздействие жидкой агрессивной среды при температурах около 95 °C в отсутствие абразивного воздействия;

— в сгустителе Дорр покрытия подвергались воздействию только паровоздушной фазы, характеризующейся меньшей концентрацией электролитов по сравнению с жидкими фазами в других аппаратах;

Таблица 8 — Расчетный срок службы лакокрасочных покрытий по результатам промышленных испытаний  
Table 8 — Estimated lifetime of coatings in industrial conditions

Покрытие	$K_{F,C}^{kp}, \Phi$	Коэффициенты уравнения $\ln K_{F,C} = \ln K_{F,C}^0 + b \cdot \tau^n$			Коэффициент детерминации $R^2, \%$	$\tau_p$	
		$\ln K_{F,C}^0$	$b, \tau^{-n}$	$n$		ч	лет
Сгуститель Брандес							
А	$1,0 \cdot 10^{-4}$	-22,6882	$6,1802 \cdot 10^{-4}$	0,8550	99,45	118700	13,6
Б	$5,0 \cdot 10^{-2}$	-22,1884	$4,3934 \cdot 10^{-6}$	1,6699	99,39	9471	1,1
В	$1,0 \cdot 10^{-4}$	-22,7546	$1,9385 \cdot 10^{-4}$	1,0000	99,67	69869	8,0
Г	$5,0 \cdot 10^{-2}$	-22,9477	$8,4304 \cdot 10^{-9}$	2,0000	95,92	48649	5,6
Д	$5,0 \cdot 10^{-3}$	-22,6489	$1,5601 \cdot 10^{-7}$	2,0000	96,43	10546	1,2
Сгуститель Дорр							
А	$1,0 \cdot 10^{-4}$	-22,6882	$6,86497 \cdot 10^{-5}$	1,000	99,57	196329	22,4
Б	$5,0 \cdot 10^{-2}$	-22,1884	$1,54044 \cdot 10^{-1}$	0,5000	97,76	15523	1,8
В	$1,0 \cdot 10^{-4}$	-22,6513	$1,15987 \cdot 10^{-4}$	1,0000	98,95	115884	13,2
Г	$5,0 \cdot 10^{-2}$	-23,0072	$1,73936 \cdot 10^{-4}$	1,0000	89,32	115051	13,1
Д	$5,0 \cdot 10^{-3}$	-22,5341	$4,32332 \cdot 10^{-4}$	1,0000	96,39	39867	4,6
Шнековый растворитель							
А	$1,0 \cdot 10^{-4}$	-22,6882	$3,32125 \cdot 10^{-4}$	1,0000	99,81	40580	4,6
Б	$5,0 \cdot 10^{-2}$	-22,1884	$2,87374 \cdot 10^{-3}$	2,0000	99,89	3669	0,4
В	$1,0 \cdot 10^{-4}$	-22,6513	$1,07130 \cdot 10^{-8}$	2,0000	98,45	35420	4,0
Г	$5,0 \cdot 10^{-2}$	-23,0072	$1,47977 \cdot 10^{-7}$	2,0000	99,98	11630	1,3
Д	$5,0 \cdot 10^{-3}$	-22,5341	$1,53342 \cdot 10^{-3}$	1,0000	98,72	11240	1,3



— условия экспонирования в шнековом растворителе отличаются более агрессивным термическим воздействием (температура до 108 °C) и интенсивным движением жидкой агрессивной среды.

Из приведенных данных следует, что самыми долговечными являются эпоксиноволачные покрытия, из которых наибольший срок службы имеет покрытие А (*Enviroline 405HTR*): от 4,6 до 22,4 лет в зависимости от эксплуатационных условий. На рис. 2 представлено сравнение результатов расчетов сроков службы лакокрасочных покрытий, выполненных в рамках лабораторных (1500 ч) и промышленных (от 6000 ч до 8425 ч) испытаний.

Величины расчетного срока службы исследуемых покрытий, полученные в рамках лабораторных и промышленных испытаний, согласуются между собой. Наблюдаемые отклонения объясняются

Рисунок 2 — Сравнение расчетного срока службы покрытий по результатам лабораторных и промышленных испытаний

Fig. 2 — Comparison of the estimated lifetime of coatings according to the results of laboratory and industrial tests

неидентичностью условий экспонирования в силу наличия некоторой изменчивости в режимах работы промышленных аппаратов переработки калийных руд.

В результате статистической обработки экспериментальных данных определены коэффициенты уравнения (5), с помощью которых построены графические зависимости емкостно-частотных коэффициентов исследуемых покрытий от продолжительности экспонирования в промышленных и лабораторных условиях, интерполированные до критических величин емкостно-частотных коэффициентов (рис. 3).

Сравнение хода кривых показало, что в результате лабораторных испытаний в схожих с промышленными условиями, удалось получить объективные данные о кинетике изменения величин емкостно-частотных коэффициентов и с достаточной точностью рассчитать срок службы лакокрасочных покрытий, что подтверждается длительными промышленными испытаниями.

## Выводы

Для антикоррозионной защиты внешних и внутренних поверхностей основного технологического оборудования переработки калийных руд могут быть рекомендованы эпоксиволачные лакокрасочные материалы, формирующие покрытия с длительным сроком службы (от 4,6 лет в шнековом растворителе до 22,4 лет в паровоздушной

фазе сгустителя Дорр). Применение указанных лакокрасочных материалов будет способствовать существенному увеличению эксплуатационного ресурса оборудования.

В случае наличия выраженного абразивного воздействия рекомендуются материалы на основе полиэфирной пленкообразующей системы, обладающие наилучшей абразивной стойкостью.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанный авторами ускоренный электрохимический метод прогнозирования долговечности антикоррозионных лакокрасочных покрытий [6] позволяет даже в рамках непродолжительных испытаний определять долговечность лакокрасочных покрытий, срок службы которых превышает длительность испытаний в несколько десятков раз.

## Обозначения

А, Б, В, Г, Д — лакокрасочные материалы *Enviroline 405HTR*, *Corrothane XT*, *CarboLine SP-8988*, *Фарбакоут*, *Винилэстер 51/1*, *Inerta 165* соответственно; а, к — адгезионный и когезионный характеры разрушения покрытий при отрыве соответственно; С, Ф — емкость системы «окрашенная стальная пластина-электролит»;  $C$ ,  $\Phi$  — средневзвешенная величина емкости окрашенной стальной пластины в частотном диапазоне 500–2000000 Гц;  $C_0$ ,  $\Phi_0$  — величина емкости окрашенной стальной пластины

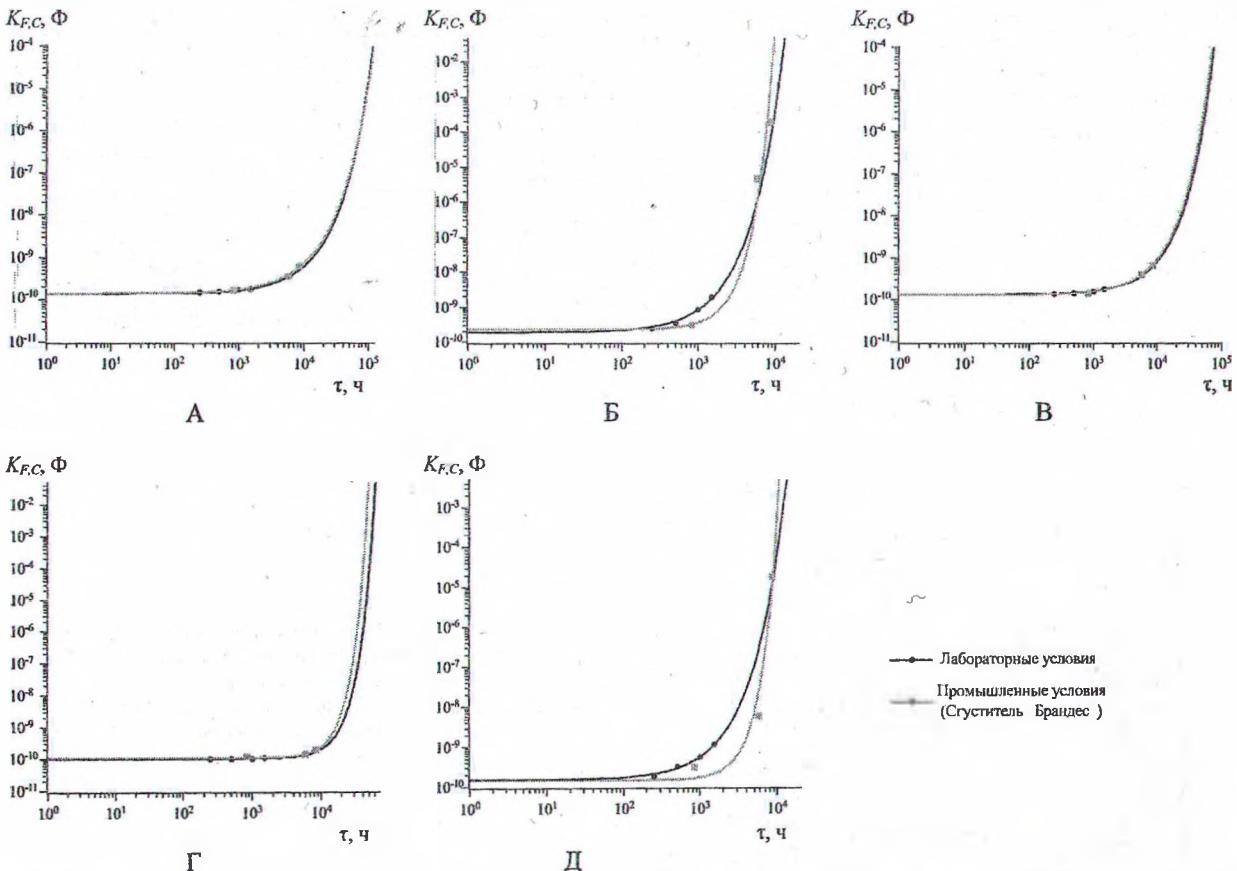


Рисунок 3 — Графические зависимости емкостно-частотных коэффициентов исследуемых покрытий от продолжительности экспонирования в промышленных и лабораторных условиях

Fig. 3 — Graphical dependences of the capacitance-frequency coefficients of the studied coatings on the duration of exposure in industrial and laboratory conditions

при частоте переменного тока  $F_i$ , входящей в выбранный частотный диапазон;  $C_{min}$  — минимальная величина емкости окрашенной стальной пластины в выбранном частотном диапазоне;  $F_i$ , Гц — величина частоты переменного тока, при котором проводилось измерение емкости  $C_i$ ;  $F_N$ , Гц — величина частоты переменного тока верхнего предела частотного диапазона измерений (2000000 Гц);  $K_{F,C}$ ,  $\Phi$  — емкостно-частотный коэффициент;  $K_{F,C}^{kp}$ ,  $\Phi$  — критический емкостно-частотный коэффициент;  $K_{F,C}^0$ ,  $\Phi$  — емкостно-частотный коэффициент до начала воздействия агрессивной среды;  $k_i$  — коэффициент весомости величины емкости  $C_i$ ;  $N$  — количество измерений в выбранном частотном диапазоне;  $\tau_p$ , ч — расчетный срок службы.

## Литература

1. Дюжева Н. В., Тинькова А. А. Анализ конъюнктуры мирового рынка минеральных удобрений // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика. 2020. № 1. С. 91–100. doi: 10.24143/2073-5537-2020-1-91-100
2. Здановский А. Б. Галургия. Ленинград : Химия, 1972. 528 с.
3. Калинцев Ю. В., Пискун Е. В., Коднянко М. Ю. Исследование сталей, применяемых для изготовления оборудования, работающего в агрессивной среде // Актуальные вопросы машиноведения. 2019. Вып. 8. С. 256–261.
4. Францкевич В. С., Новик Д. М. Исследование коррозионной стойкости нержавеющей стали 1.4462 в насыщенных солевых растворах // Горная механика и машиностроение. 2021. № 2. С. 89–97.
5. Кац Н. Г., Васильев С. В. Опыт эксплуатации протекторов для защиты нефтяных резервуаров, изготавливаемых из вторичных алюминиевых сплавов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2014. № 4 (44). С. 170–176.

6. Потапчик А. Н., Егорова А. Л. Электрохимический метод прогнозирования долговечности антикоррозионных лакокрасочных покрытий // Полимерные материалы и технологии. 2022. Т. 8, № 2. С. 30–38. doi: 10.32864/polymmattech-2022-8-2-30-38

## References

1. Dyuzheva N. V., Tin'kova A. A. Analiz kon'yunktury mirovogo rynka mineral'nykh udobrenij [Analysis of the global mineral fertilizers market situation]. Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Ekonomika [Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Economics], 2020, no. 1, pp. 91–100. doi: 10.24143/2073-5537-2020-1-91-100
2. Zdanovskiy A. B. Galurgiya [Galurgy]. Leningrad : Khimiya Publ., 1972. 528 p.
3. Kalintsev Yu. V., Piskun E. V., Kodnyanko M. Yu. Issledovanie staley, primenyaemykh dlya iz-gotovleniya oborudovaniya, rabotayushchego v agressivnoy srede [Research of steels used for the manufacture of equipment operating in an aggressive environment]. Aktual'nye voprosy mashinovedeniya [Current issues of machine science], 2019, is. 8, pp. 256–261.
4. Frantskevich V. S., Novik D. M. Issledovanie korroziionnoy stoykosti nerzhaveyushchey stali 1.4462 v nasyshchennykh solevykh rastvorakh [Investigation of corrosion resistance of stainless steel 1.4462 in saturated salt solutions]. Gornaya mehanika i mashinostroenie [Mine mechanical engineering and machine-building], 2021, no. 2, pp. 89–97.
5. Kats N. G., Vasil'ev S. V. Opyt ekspluatatsii protektorov dlya zashchity neftyanykh rezervuarov, izgotavlivayemykh iz vtorichnykh aluminievnykh splavov [Experience in the operation of protectors for the protection of oil tanks made of secondary aluminum alloys]. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki [Bulletin of Samara State Technical University. Series: Technical Sciences], 2014, no. 4 (44), pp. 170–176.
6. Potapchik A. N., Egorova A. L. Elektrokhimicheskiy metod prognozirovaniya dolgovechnosti antikorrozionnykh lakokraschnykh pokrytiy [Electrochemical method for prediction of durability of anti-corrosion coatings]. Polimernye materialy i tekhnologii [Polymer Materials and Technologies], 2022, vol. 8, no. 2, pp. 30–38. doi: 10.32864/polymmattech-2022-8-2-30-38

Поступила в редакцию 06.06.2022

© А. Н. Потапчик, А. Л. Егорова, 2022