

УДК 620,667.6

**А. Н. Потапчик, А. Л. Егорова, Д. А. Гринюк**  
Белорусский государственный технологический университет

### **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ АППАРАТОВ ПЕРЕРАБОТКИ КАЛИЙНЫХ РУД**

Целью работы является расчет долговечности ряда полимерных покрытий различного состава, предназначенных для антикоррозионной защиты основного технологического оборудования сильвинитовой обогатительной фабрики.

Приведен краткий обзор методов исследования антикоррозионной эффективности лакокрасочных покрытий, из которого следует, что электрохимические показатели являются наиболее информативными и могут быть использованы как для оценки антикоррозионных свойств покрытий, так и для расчета их долговечности. Исследован процесс изменения физико-механических (адгезии и прочности при ударе) и электрохимических (приведенного сопротивления и емкости) свойств полимерных покрытий под воздействием эксплуатационных факторов в аппаратах обогащения калийных руд.

Предложена методика расчета долговечности полимерных покрытий, основанная на определении величины емкостно-частотного коэффициента при различной продолжительности воздействия агрессивной среды. Увеличение численного значения этого показателя соотносится с развитием процесса подпленочной коррозии: при достижении некоторого его значения под покрытием обнаруживаются очаги коррозионного разрушения, что может являться критерием «отказа» полимерного покрытия при расчете его долговечности.

Выполнен прогноз долговечности пяти полимерных покрытий различной химической природы в рабочих условиях аппаратов участка обогащения калийных руд: сгустителей типа «Брандес», «Дорр» и шнековой мешалки. Установлено, что наиболее долговечным является эпоксиноволачное покрытие, которое способно обеспечить надежную антикоррозионную защиту аппаратов переработки сильвинитовой руды: долговечность в условиях работы сгустителя «Брандес» составляет 13,6 лет, мешалки шнековой – 4,6 лет, в случае воздействия только паровоздушной фазы долговечность покрытия увеличивается до 44 лет.

**Ключевые слова:** полимерные покрытия, прогноз долговечности, емкость покрытия, емкостно-частотный коэффициент, адгезия, прочность при ударе.

**Для цитирования:** Потапчик А. Н., Егорова А. Л., Гринюк Д. А. Прогнозирование долговечности полимерных покрытий аппаратов переработки калийных руд // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2021. № 2 (247). С. 166–174.

**A. N. Potapchik, A. L. Egorova, D. A. Grinuk**  
Belarusian State Technological University

### **PREDICTION OF THE DURABILITY OF POLYMER COATINGS IN POTASSIUM ORE PROCESSING MACHINE CONDITIONS**

The aim of the work is to predict the durability of a polymer coatings intended for anticorrosion protection of potassium ore processing machine.

A brief review of methods for studying the anticorrosive efficiency of paint coatings is given, from which it follows that electrochemical properties are the most informative and can be used for both assessing the anticorrosive properties of coatings and calculating their durability. The process of changing the physicochemical (adhesion and impact resistance) and electrochemical (resistance and capacitance) properties of polymer coatings under the influence of operating factors was investigated.

A method for calculating the durability of polymer coatings is proposed. It is based on determining the value of the capacitance-frequency coefficient at various durations of exposure time to an aggressive environment. An increase in the numerical value of the capacitance-frequency coefficient under the influence of an aggressive environment correlates with the development of the underfilm corrosion process.

The forecast of the durability of five polymer coatings was carried out. It was established that the most durable is the epoxy novolac coating, which is able to provide reliable anti-corrosion protection: the durability under the operating conditions of the Brandes thickener is 13.6 years, the screw mixer – 4.6 years, in case of exposure only to the vapor-air phase, the durability of the coating increases to 44 years.

**Key words:** polymer coatings, lifetime prediction, coating capacitance, capacitance-frequency ratio, adhesion, impact resistance.

**For citation:** Potapchik A. N., Egorova A. L., Grinuk D. A. Prediction of the durability of polymer coatings in potassium ore processing machine conditions. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2021, no. 2 (247), pp. 166–174 (In Russian).

**Введение.** Защита оборудования и металлических конструкций от коррозии в различных отраслях промышленности не перестает быть актуальной задачей, так как среднемировые потери от коррозионного разрушения составляют около 3,4% от валового внутреннего продукта [1]. Решение данной проблемы видится в использовании высококачественных полимерных покрытий, позволяющих не только продлить срок службы аппаратов и металлоконструкций, но и в некоторых случаях заменить дорогостоящую нержавеющую сталь более доступной конструкционной.

Одним из крупнейших валообразующих предприятий Республики Беларусь является ОАО «Беларуськалий», занимающееся производством калийных удобрений. Основными технологическими аппаратами участков обогащения калийных руд являются сгустители типа «Брандес» и «Дорр», шнековый растворитель, вакуумный кристаллизатор, оборудованные перемешивающими устройствами [2]. Рабочая среда в этих аппаратах – суспензия рудного материала в насыщенном водном растворе солей (преимущественно NaCl, KCl) и растворяющем щелоче.

Полимерные покрытия, нанесенные на внутренние поверхности таких аппаратов, могут испытывать влияние следующих агрессивных факторов [2]:

- температура, достигающая 107°C;
- химическое воздействие растворов NaCl, KCl, MgCl<sub>2</sub>, CaCl<sub>2</sub>;
- абразивное воздействие суспензии.

Известно, что определение долговечности полимерных покрытий может осуществляться при натуральных или ускоренных лабораторных испытаниях [3]. Первый способ дает возможность учесть все эксплуатационные факторы, однако без применения специальных методов расчета продолжительность испытаний будет равна сроку службы материала. Второй способ позволяет значительно сократить длительность исследований за счет увеличения интенсивности воздействия эксплуатационных факторов, при условии сохранения механизма разрушения лакокрасочного покрытия неизменным.

В исследуемом процессе увеличить интенсивность факторов (температура, концентрация солей) не представляется возможным, так как рабочие условия в аппаратах переработки

калийных руд и без того являются пограничными (насыщенные растворы при температуре кипения). Увеличение абразивного воздействия или применение избыточного давления с целью повышения температуры кипения не является целесообразным, так как в данном случае произойдет изменение механизма разрушения полимерного покрытия.

В связи с вышесказанным ускоренное определение срока службы покрытий в аппаратах переработки калийных руд может быть выполнено посредством испытания в натуральных условиях с применением методов прогнозирования долговечности. В указанном случае процедура прогнозирования срока службы состоит из установления вида зависимости, описывающей изменение характеристического свойства покрытия от продолжительности воздействия эксплуатационных факторов, и кинетических особенностей данного процесса. Характеристическим свойством может служить любой доступный к определению показатель, по изменению которого в процессе эксплуатации можно судить о долговечности покрытия.

Так как основным назначением антикоррозионных лакокрасочных покрытий является защита металла от коррозии, в качестве характеристического показателя необходимо выбирать тот, который непосредственно описывает состояние системы металл – полимерное покрытие. Из литературных источников [3–8] известно, что этому критерию в разной степени отвечают следующие электрохимические показатели, измеряемые постоянными и переменными методами: электрическое сопротивление, электрическая емкость, тангенс угла диэлектрических потерь, величины токов коррозии, поляризационные характеристики. Однако большое омическое сопротивление современных покрытий, толщина которых может достигать 2000 мкм, ограничивает или даже вовсе делает невозможным применение постоянных методов. Поэтому основные электрохимические измерения полимерных покрытий в настоящее время проводятся на переменном токе: емкостно-омический метод и электрохимическая импедансная спектроскопия [5, 7–12].

В данной работе прогнозирование долговечности проведено с помощью авторской методики, в основе которой лежит измерение емкости системы металл – полимерное покрытие

при различных частотах переменного тока с последующим расчетом емкостно-частотного коэффициента, величина которого характеризует защитные функции покрытия.

Цель работы – выполнить прогноз долговечности полимерных покрытий, предназначенных для антикоррозионной защиты основного технологического оборудования сальвинитовой обогатительной фабрики.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

– размещение и выдержка полимерных покрытий в течение трех интервалов экспонирования в аппаратах переработки сальвинитовой руды (сгустители «Брандес» и «Дорр», мешалка шнековая) на сальвинитовой обогатительной фабрике четвертого рудоуправления ОАО «Беларуськалий»;

– оценка изменения физико-механических и электрохимических свойств полимерных покрытий после первого, второго и третьего интервалов экспонирования;

– расчет емкостно-частотных коэффициентов, установление кинетических особенностей их изменения и прогнозирование долговечности полимерных покрытий.

**Основная часть.** В работе исследованы полимерные покрытия различной химической природы (табл. 1), имеющие толщину от 400 до 2000 мкм в зависимости от рекомендаций производителей.

Таблица 1

**Исследуемые образцы полимерных покрытий**

Обозначение	Химическая природа пленкообразующей системы		Толщина, мкм
	основа	отвердитель	
А	Эпоксипенолачная	Амин	1000
Б	Полиэфирная	Органический пероксид, изиоцианат	2000
В	Эпоксипенолачная	Амин	1000
Г	Полиэфирная	Органический пероксид	2000
Д	Эпоксидная	Амин	400

Закрепление образцов в аппаратах осуществлялось с помощью коррозионностойкой титановой проволоки. В аппарате «Брандес» и шнековой мешалке пластины экспонировались при погружении в рабочий раствор, а в аппарате «Дорр» – в паровоздушную фазу. Продолжительность времени экспонирования по интервалам представлена в табл. 2.

Таблица 2

**Продолжительность экспонирования полимерных покрытий в промышленных условиях**

Интервал экспонирования	Место установки / продолжительность экспонирования, ч		
	Брандес	Дорр	Шнековая мешалка
1	820	820	820
2	4920	4920	2530
3	2685	2685	2650
Суммарно, ч	8425	8425	6000

По истечении соответствующих интервалов экспонирования часть пластин извлекали и измеряли их физико-механические и электрохимические свойства.

Адгезию покрытий определяли методом отрыва по ГОСТ 32299–2013 «Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом отрыва» [13], прочность при ударе – по ГОСТ 4765–73 «Материалы лакокрасочные. Метод определения прочности при ударе» [14].

Емкость окрашенных стальных пластин измеряли в соответствии с I–V методом [15] в диапазоне частот переменного тока  $F = 500–2\,000\,000$  Гц после дополнительного воздействия 3%-ного водного раствора NaCl в течение 24 ч.

Приведенное сопротивление покрытий определяли путем экстраполяции функции, описывающей зависимость сопротивления покрытия от частоты переменного тока в интервале частот 500–2 000 000 Гц, до значения частоты тока 0,1 Гц с последующим умножением полученного значения сопротивления на площадь покрытия в области измерений (7,065 см<sup>2</sup> во всех случаях).

Измеренные значения емкости использовались для расчета емкостно-частотных коэффициентов  $K_{F,C}$ , величина которых служит мерой уровня защитных свойств лакокрасочных покрытий:

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

где  $\bar{C}$  – средневзвешенная величина емкости окрашенной стальной пластины в выбранном частотном диапазоне, Ф;  $N$  – количество измерений в выбранном частотном диапазоне;  $C_i$  – величина емкости окрашенной стальной пластины при частоте переменного тока  $F_i$ , входящей в выбранный частотный диапазон, Ф;  $C_{\min}$  – минимальная величина емкости окрашенной стальной пластины, наблюдаемое в выбранном частотном диапазоне, Ф.

Зависимость емкостно-частотного коэффициента  $K_{F,C}$  от времени экспонирования  $T$  в эксплуатационном интервале имеет вид

$$K_{F,C} = e^{a + b \cdot T^n}, \quad (2)$$

где  $a$  – коэффициент, зависящий от величины  $K_{F,C}$  в начальный момент времени;  $b, n$  – коэффициенты, зависящие от агрессивности воздействия эксплуатационных факторов и устойчивости покрытия к такому воздействию.

Возрастание величины емкостно-частотного коэффициента  $K_{F,C}$  под воздействием электролитов соотносится с развитием процесса подпленочной коррозии: при достижении некоторого значения емкостно-частотного коэффициента, обозначаемого  $K_{F,C}^{кр}$ , под покрытием визуально обнаруживаются очаги коррозионного разрушения, что может являться критерием «отказа» полимерного покрытия, т. е. достижением предельно допустимого уровня утраты защитного действия.

Критическое значение емкостно-частотного коэффициента зависит от природы полимерного материала и особенностей его адгезионного взаимодействия с металлической подложкой: величины адгезии и характера разрушения материала (табл. 3).

Таблица 3

**Критические значения емкостно-частотных коэффициентов для исследуемых покрытий**

Покрытие	Пленкообразующая система	Адгезия, МПа	$K_{F,C}^{кр}, \Phi$
А, В	Эпоксиполиэфирная	>10 (А)	$1,00 \cdot 10^{-4}$
Б, Г	Полиэфирная	3 (К)	$5,00 \cdot 10^{-2}$
Д	Эпоксидная	3 (К)	$5,00 \cdot 10^{-3}$

*Примечание.* Адгезия: в скобках указан вид разрушения материала (А – адгезионный, К – когезионный).

Коэффициент  $a$  в выражении (2) рассчитывается по формуле

$$a = \ln(K_{F,C}^0), \quad (3)$$

где  $K_{F,C}^0$  – значение емкостно-частотного коэффициента  $K_{F,C}$  рассчитанного в начальный момент времени экспонирования,  $\Phi$ .

Тогда ожидаемая долговечность покрытия  $T_{пр}$  ч, может быть рассчитана по формуле

$$T_{пр} = \left( \frac{\ln(K_{F,C}^{кр}) - \ln(K_{F,C}^0)}{b} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (4)$$

Математическую обработку экспериментальных данных выполняли в программах Statgraphics Centurion 18 и Mathcad 15.

В табл. 4 представлен анализ изменения физико-механических показателей исследуемых образцов покрытий, произошедших за три интервала экспонирования в промышленных условиях.

Таблица 4

**Изменение физико-механических показателей полимерных покрытий**

Покрытие	Изменение физико-механического показателя в процессе экспонирования			
	Адгезия, МПа		Прочность при ударе, см	
	до	после	до	после
А	>10 (А)	>10 (А)	60	55
Б	3 (К)	1,5 (К)	30	40
В	>10 (А)	>10 (А)	50	50
Г	3 (К)	1,5 (К)	35	25
Д	3 (К)	0,25 (А)	75	65

*Примечание.* Адгезия: в скобках указан вид разрушения материала (А – адгезионный, К – когезионный).

Сила адгезии и характер разрушения материала, наблюдаемый при определении адгезии по методу отрыва, являются одними из важных показателей, влияющих на протекание процесса подпленочной коррозии. Как правило, чем больше величина адгезии, тем труднее протекает процесс подпленочной коррозии, однако немаловажным является сохранение должного уровня адгезии в течение длительного промежутка времени.

Из табл. 4 видно, что адгезия покрытий А и В в процессе экспонирования в течение трех интервалов сохранилась на уровне более 10 МПа, в то время как у остальных покрытий произошло ее снижение в два или более раз. Для образцов Д наблюдается существенное снижение адгезионной прочности до величины 0,25 МПа и изменение характера разрушения покрытия с когезионного на адгезионный, что облегчает протекание процесса подпленочной коррозии.

На окрашенных внутренних поверхностях аппаратов, если существует вероятность механического повреждения покрытий, прочность при ударе является показателем, во многом определяющим реальный срок службы покрытия.

Из табл. 4 видно, что прочность при ударе большинства покрытий до начала испытаний более 50 см. За время испытаний данный показатель уменьшился в среднем на 5–10 см, исключение составляют покрытия Б (увеличение на 10 см) и В (прочность при ударе не изменилась).

В табл. 5 представлены величины приведенного сопротивления исследуемых полимерных покрытий до и после экспонирования в промышленных условиях.

Таблица 5  
Приведенное сопротивление полимерных покрытий

Покрытие	Приведенное сопротивление, Ом·см <sup>2</sup>			
	до экспонирования	после третьего интервала экспонирования		
		Брандес	Дорр	Шнековая мешалка
А	4,62·10 <sup>9</sup>	9,11·10 <sup>8</sup>	1,83·10 <sup>9</sup>	1,17·10 <sup>9</sup>
Б	1,27·10 <sup>9</sup>	1,94·10 <sup>4</sup>	2,53·10 <sup>3</sup>	6,31·10 <sup>3</sup>
В	5,13·10 <sup>9</sup>	5,35·10 <sup>8</sup>	3,80·10 <sup>8</sup>	6,46·10 <sup>8</sup>
Г	2,75·10 <sup>9</sup>	5,51·10 <sup>8</sup>	1,23·10 <sup>8</sup>	7,81·10 <sup>8</sup>
Д	2,97·10 <sup>9</sup>	1,75·10 <sup>5</sup>	1,87·10 <sup>6</sup>	1,25·10 <sup>5</sup>

Примечание. Величины приведенного сопротивления покрытий А, Б, В, Г в шнековой мешалке приведены по истечении второго интервала экспонирования.

В процессе экспонирования приведенное сопротивление покрытий А, В, Г несколько снизилось, но сохранилось на уровне не менее 10<sup>8</sup> Ом·см<sup>2</sup>, что соответствует уровню покрытий с высокими изоляционными свойствами. Приведенное сопротивление покрытия Д уменьшилось до значений 10<sup>5</sup>–10<sup>6</sup> Ом·см<sup>2</sup>. Для покрытий Б зафиксировано значительное снижение приведенного сопротивления до уровня 10<sup>3</sup>–10<sup>4</sup> Ом·см<sup>2</sup>, что свидетельствует о практически полной потере изоляционных свойств данным типом покрытий.

Анализ графических зависимостей величин емкости покрытий от частоты переменного тока до начала экспонирования (измерения проводились после 24 ч воздействия 3%-ного водного раствора хлорида натрия при комнатной температуре) показывает, что величины емкости всех покрытий до начала экспонирования малы и практически не зависят от частоты переменного тока (рис. 1).

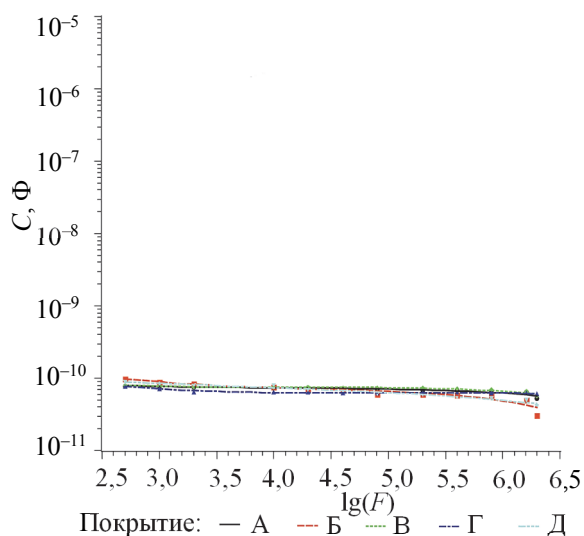


Рис. 1. Зависимости емкости покрытий от частоты переменного тока до начала экспонирования в промышленных условиях

Таким образом, до начала экспонирования все покрытия имеют высокую сплошность.

На рис. 2 представлены графические зависимости емкости покрытий от частоты переменного тока после соответствующих интервалов экспонирования в промышленных аппаратах.

Величины емкости покрытий к концу третьего интервала экспонирования существенно различаются: наибольшую емкость имеют покрытия Б (более 10<sup>-6</sup> Ф), а у покрытий Д в зависимости от места их экспонирования емкость находится в диапазоне от 10<sup>-9</sup> до 10<sup>-7</sup> Ф. Покрытия А, В, Г характеризуются емкостью менее 10<sup>-9</sup> Ф независимо от условий экспонирования.

Экспериментально установлено, что существует предел частоты переменного тока, выше которого значения емкости поврежденного и неповрежденного покрытий идентичны. Величина данного предела зависит от толщины лакокрасочной пленки и возрастает с ее увеличением. На рис. 2 показано, что для исследуемых в данной работе покрытий, толщиной от 400 до 2000 мкм, частотный предел не превышает 2 000 000 Гц.

Визуальный анализ графических зависимостей говорит о том, что увеличение емкости покрытий, экспонированных в аппарате «Дорр», меньше по сравнению с покрытиями, размещенными в сгустителе «Брандес» и шнековой мешалке. Данный факт может быть объяснен более «мягкими» условиями экспонирования покрытий в аппарате «Дорр», образцы в котором были размещены в паровоздушной фазе, следовательно, испытывали воздействие значительно меньшей концентрации электролитов.

По определенным ранее частотным зависимостям емкости рассчитаны частотно-частотные коэффициенты для исследуемых покрытий на различных интервалах экспонирования (табл. 6).

На основании данных из табл. 6 рассчитаны коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $n$ , входящие в уравнение (4) и выполнен прогноз долговечности.

Расчет коэффициента  $a$  проводился по данным табл. 3 с использованием формулы (3).

Для расчета коэффициентов  $b$ ,  $n$  провели линеаризацию исходной зависимости:

$$\ln(\ln(K_{F,C}) - \ln(K_{F,C}^0)) = \ln(b) + n \cdot \ln(\tau). \quad (5)$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} \ln(b) &= c; \\ \ln(\tau) &= x. \end{aligned} \quad (6)$$

Получим линейное уравнение, коэффициенты  $n$  и  $c$  которого могут быть легко определены аппроксимацией:

$$\ln(\ln(K_{F,C})) - \ln(K_{F,C}^0) = n \cdot x + c. \quad (7)$$

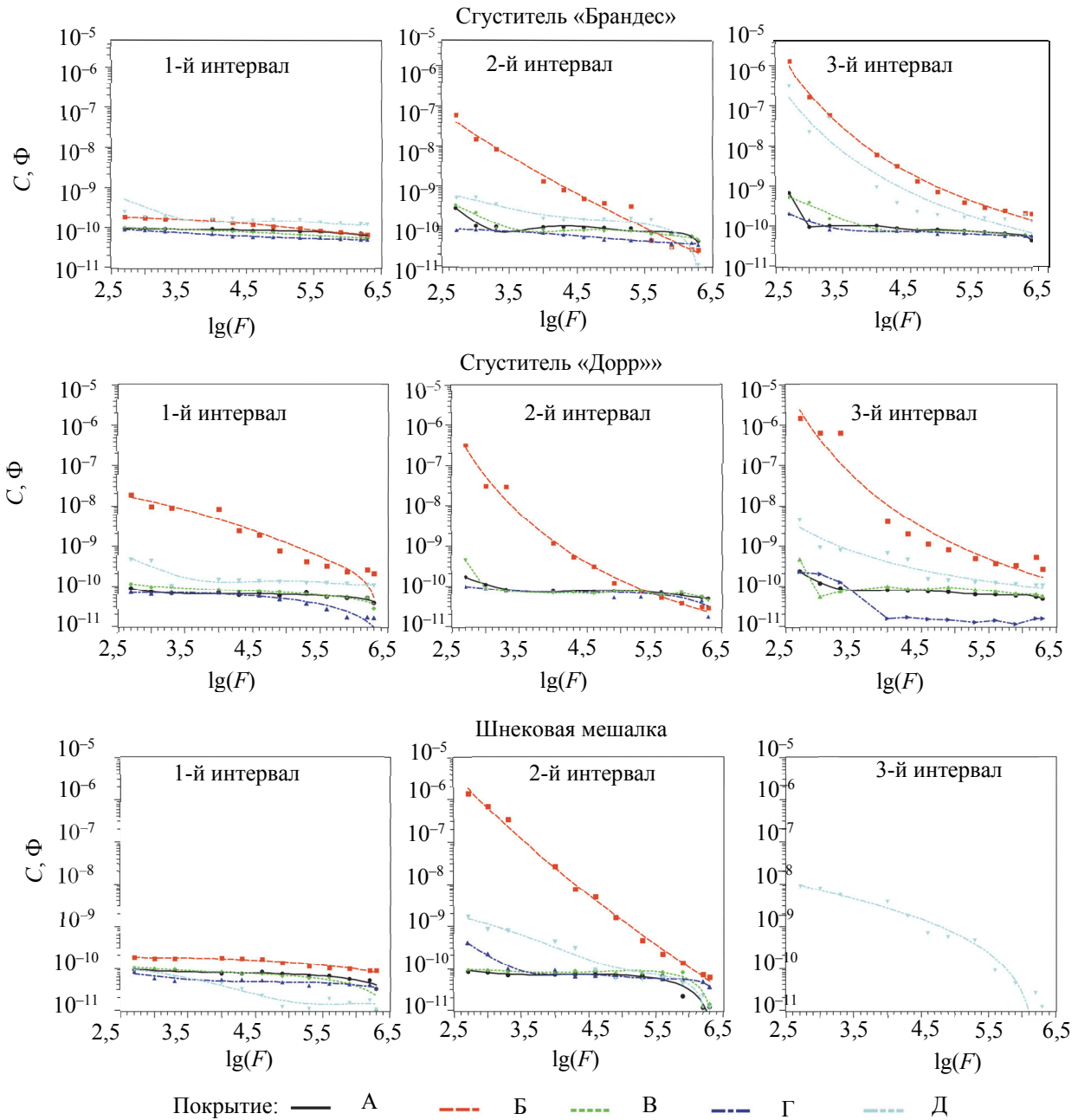


Рис. 2. Частотные зависимости емкости покрытий на различных этапах экспонирования в сгустителях типа «Брандес», «Дорр» и в шнековой мешалке

Таблица 6

**Значения емкостно-частотных коэффициентов на различных этапах экспонирования**

Аппарат	Покрытие	$K_{F,C} \cdot 10^{-10} \Phi$			
		до начала экспонирования	интервал экспонирования		
			1	2	3
Сгуститель «Брандес»	А	1,40	1,70	3,55	6,33
	Б	2,31	3,16	46 536,81	1 923 674,87
	В	1,37	1,45	4,11	6,62
	Г	1,02	1,17	1,39	1,99
	Д	1,64	3,17	57,71	184 252,25
Сгуститель «Дорр»	А	1,40	1,53	2,15	2,51
	Б	2,31	1768,68	835 094,54	4 584 725,34

Окончание табл. 6

Аппарат	Покрытие	$K_{F,C} \cdot 10^{-10} \Phi$			
		до начала экспонирования	интервал экспонирования		
			1	2	3
Сгуститель «Дорр»	В	1,37	1,44	2,81	3,46
	Г	1,02	2,18	3,97	5,57
	Д	1,64	5,07	–	86,93
Шнековая мешалка	А	1,40	1,93	4,32	–
	Б	2,31	3,35	15 660 043,00	–
	В	1,37	1,17	1,31	–
	Г	1,02	1,10	5,31	–
	Д	1,64	1,93	222,92	9923,61

Примечание. Пропуск значения (–) указывает на то, что оно не измерялось по причине утраты покрытия в процессе экспонирования.

Путем обратного преобразования определим искомый коэффициент  $b$ :

$$b = e^c, \quad (8)$$

где  $e$  – основание натурального логарифма.

Из табл. 7 видно, что долговечность покрытий одного и того же типа зависит от условий экспонирования, создаваемых в конкретном аппарате. Наименьшая расчетная долговечность наблюдается в шнековой мешалке, в которой покрытия подвергались абразивному воздействию твердыми частицами суспензии рудного материала. В сгустителе «Дорр», в котором на покрытия воздействовала лишь паровоздушная фаза, величины расчетной долговечности являются наибольшими для всех исследованных лакокрасочных покрытий.

**Заключение.** В результате проведенных исследований экспериментально подтверждена применимость разработанной методики расчета долговечности полимерных покрытий в жидких агрессивных средах, позволяющей в достаточно короткие сроки выбрать полимерные покрытия, обладающие наибольшей стойкостью к подпленочной коррозии и обеспечивающие длительную защиту стальных поверхностей.

Установлены закономерности изменения частотных зависимостей емкости лакокрасочных покрытий от их толщины и продолжительности воздействия агрессивной среды в аппаратах переработки сильвинитовой руды на ОАО «Беларусь калий» (сгустители «Брандес», «Дорр» и шнековая мешалка).

Исследовано пять полимерных покрытий различной химической природы: определен начальный уровень и изменение в процессе экспонирования их физико-механических и электрохимических свойств.

Таблица 7

#### Расчет долговечности покрытий в промышленных условиях

Покрытие		Коэффициенты		$T_{пр}$ , лет
		$b, ч^{-n}$	$n$	
Брандес	А	$6,1802 \cdot 10^{-4}$	0,8550	13,6
	Б	$4,3934 \cdot 10^{-6}$	1,6699	1,1
	В	$1,9385 \cdot 10^{-4}$	1,0000	8,0
	Г	$8,4304 \cdot 10^{-9}$	2,0000	5,6
	Д	$1,5601 \cdot 10^{-7}$	2,0000	1,2
Дорр	А	$3,6135 \cdot 10^{-4}$	0,8175	44,6
	Б	$6,9776 \cdot 10^{-1}$	0,3359	2,2
	В	$1,1599 \cdot 10^{-4}$	1,0000	13,3
	Г	$1,2316 \cdot 10^{-4}$	1,0000	17,9
Шнековая мешалка	Д	$4,3233 \cdot 10^{-4}$	1,0000	4,5
	А	$3,3213 \cdot 10^{-4}$	1,0000	4,6
	Б	$1,4255 \cdot 10^{-6}$	2,0000	0,4
	В	$1,5017 \cdot 10^{-8}$	2,0000	4,0
	Г	$1,4798 \cdot 10^{-7}$	2,0000	1,3
Д	$1,5334 \cdot 10^{-3}$	1,0000	1,3	

Установлено, что эпоксиноволачные покрытия А и В способны обеспечить надежную длительную антикоррозионную защиту аппаратов переработки сильвинитовой руды. Согласно проведенным расчетам долговечность данных покрытий в наиболее жестких условиях (в шнековой мешалке) составляет от 4,0 до 4,6 лет.

#### Список литературы

1. Mohammad A. Jafar Mazumder. Global Impact of Corrosion: Occurrence, Cost and Mitigation // Global Journal of Engineering Sciences. 2020. No. 5. DOI: 10.33552/GJES.2020.05.000618.
2. Титков С. Н., Мамедов А. И., Соловьев Е. И. Обогащение калийных руд. М.: Недра, 1982. 216 с.
3. Карякина М. И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий. М.: Химия, 1988. 272 с.

4. Розенфельд И. Л., Рубинштейн Ф. И. Антикоррозионные грунтовки и ингибированные лакокрасочные покрытия. М.: Химия, 1980. 200 с.
5. Методы оценки противокоррозионной эффективности лакокрасочных покрытий / А. В. Соколов [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15, № 24. С. 68–75.
6. Electrochemical Evaluation Technologies of Organic Coatings [Электронный ресурс]. URL: <https://www.intechopen.com/books/coatings-and-thin-film-technologies/electrochemical-evaluation-technologies-of-organic-coatings> (дата обращения: 14.04.2021).
7. Isabel Margarit-Mattos. EIS and organic coatings performance: Revisiting some key points // *Electrochimica Acta*. 2020. No. 354. DOI:10.1016/j.electacta.2020.136725.
8. Головин В. А., Добрян С. А. Электрохимические и электрофизические методы неразрушающего контроля защитных полимерных покрытий // *Коррозия: материалы, защита*. 2020. № 12. С. 1–13. DOI: 10.31044/1813-7016-2020-0-12-1-13.
9. Scully J., Hensley S. Life time prediction for organic coating on steel and a magnesium alloy using electrochemical impedance methods // *Corrosion*. 1994. No. 50. P. 705–716. DOI: 10.5006/1.3293547.
10. Service life prediction of organic coatings: electrochemical impedance spectroscopy vs actual service life / S. Shreepathi [et al.] // *Journal of Coatings Technology and Research*. 2011. No. 8 (2). P. 191–200. DOI: 10.1007/s11998-010-9299-5.
11. Исследование деградации свойств защитных комбинированных покрытий на алюминиевых сплавах с целью разработки методов прогнозирования их сроков службы / А. Е. Кутырев [и др.] // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 3 (36). С. 69–78.
12. Electrochemical impedance study for modeling the anticorrosive performance of coatings based on accelerated tests and outdoor exposures / Franky Bedoya-Lora [et al.] // *Journal of Coatings Technology and Research*. 2016. No. 13 (5). P. 895–904. DOI: 10.1007/s11998-016-9803-7.
13. *Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом отрыва: ГОСТ 32299–2013*. Введ. 01.08.2014. М.: Стандартинформ, 2014. 12 с.
14. *Материалы лакокрасочные. Метод определения прочности при ударе: ГОСТ 4765–73*. Введ. 01.07.1974. М.: Издательство стандартов, 1974. 3 с.
15. J. Ross Macdonald. *Impedance Spectroscopy. Theory, Experiment, and Applications*. Canada: John Wiley & Sons, 2005. 595 с.

### References

1. Mohammad A. Jafar Mazumder. Global Impact of Corrosion: Occurrence, Cost and Mitigation. *Global Journal of Engineering Sciences*, 2020, no. 5. DOI: 10.33552/GJES.2020.05.000618.
2. Titkov S. N., Mamedov A. I., Solov'ev E. I. *Obogashcheniye kaliynykh rud* [Enrichment of potash ores]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 216 p.
3. Karyakina M. I. *Ispytaniye lakokrasochnykh materialov i pokrytiy* [Testing of paints and coatings]. Moscow, Khimiya Publ., 1988. 272 p.
4. Rozenfel'd I. L., Rubinshteyn F. I. *Antikorrozionnyye gruntovki i ingibirovannyye lakokrasochnyye pokrytiya* [Anticorrosion primers and inhibited coatings]. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 200 p.
5. Sorokov A. V., Stepin S. N., Kayumov A. A., Sitnov S. A., Kuznetsova O. P. Methods for assessing the anticorrosive effectiveness of paint coatings. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University], 2012, vol. 15, no. 24, pp. 68–75 (In Russian).
6. Electrochemical Evaluation Technologies of Organic Coatings. Available at: <https://www.intechopen.com/books/coatings-and-thin-film-technologies/electrochemical-evaluation-technologies-of-organic-coatings> (accessed 14.04.2021).
7. Isabel Margarit-Mattos. EIS and organic coatings performance: Revisiting some key points. *Electrochimica Acta*, 2020, no. 354. DOI: 10.1016/j.electacta.2020.136725.
8. Golovin V. A., Dobriyan S. A. Electrochemical and electrophysical methods of non-destructive testing of protective polymer coatings. *Corrosion: materials, protection*, 2020, no. 12, pp. 1–13. DOI: 10.31044/1813-7016-2020-0-12-1-13.
9. Scully J., Hensley S. Life time prediction for organic coating on steel and a magnesium alloy using electrochemical impedance methods. *Corrosion*, 1994, no. 50, pp. 705–716. DOI: 10.5006/1.3293547.
10. Shreepathi S., Guin A. K., Naik S. M., Vattipalli M. R. Service life prediction of organic coatings: electrochemical impedance spectroscopy vs actual service life. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2011, no. 8 (2), pp. 191–200. DOI: 10.1007/s11998-010-9299-5.
11. Kutyrev A. E., Karimova S. A., Pavlovskaya T. G., Kuzin Ya. S. Investigation of the degradation of properties of protective combined coatings on aluminum alloys in order to develop methods for predicting



their service life. *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and technologies], 2015, no. 3 (36), pp. 69–78 (In Russian).

12. Franky Bedoya-Lora, Angela Bermudez, Juan Gastano, Felix Echeverria. Electrochemical impedance study for modeling the anticorrosive performance of coatings based on accelerated tests and outdoor exposures. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2016, no. 13 (5), pp. 895–904. DOI: 10.1007/s11998-016-9803-7.

13. GOST 32299–2013. Paint materials. Pull-off test for adhesion. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 12 p. (In Russian).

14. GOST 4765–73. Paint and lacquer materials. Method for determination of impact resistance. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1974. 3 p. (In Russian).

15. J. Ross Macdonald. Impedance Spectroscopy. Theory, Experiment, and Applications. Canada, John Wiley & Sons, 2005. 595 p.

#### Информация об авторах

**Потапчик Александр Николаевич** – аспирант кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: alexander.potapchik@mail.ru

**Егорова Анна Леонидовна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: a\_l\_egorova@mail.ru

**Гринюк Дмитрий Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: hryniuk@tut.by

#### Information about the authors

**Potapchik Aleksandr Nikolaevich** – PhD student, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alexander.potapchik@mail.ru

**Egorova Anna Leonidovna** – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: a\_l\_egorova@mail.ru

**Hryniuk Dzmitry Anatol'yevich** – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: hryniuk@tut.by

*Поступила 12.05.2021*