

УДК 620.197:544.72 (075.8)

**И. В. Плескунов<sup>1</sup>, Н. Р. Прокопчук<sup>1</sup>, А. Г. Сырков<sup>2</sup>, В. Р. Кабилов<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет<sup>2</sup>Санкт-Петербургский горный университет**ВОДООТТАЛКИВАЮЩИЕ СВОЙСТВА ПОРОШКА МЕДИ,  
МОДИФИЦИРОВАННОГО АММОНИЕВЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ,  
ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ  
С НАСЫЩЕННЫМИ ПАРАМИ ВОДЫ**

Анализ изотерм адсорбции воды поверхностью модифицированными образцами на основе порошка меди ПМС-1 показал, что изотермы соответствуют системам со слабым взаимодействием адсорбат-адсорбент и характерны для непористых твердых тел. При длительном взаимодействии образцов с парами воды ( $P_{H_2O}/P_s = 0,98 \pm 0,02$ ,  $T = 298$  К) в первые 100 ч наибольшую сорбцию воды демонстрирует образец вида Cu/ГКЖ с нанесенным из паров гидрофобизирующей кремнийорганической жидкости (ГКЖ) слоем органогидридсилоксана. В этих условиях наиболее гидрофобными являются образцы вида Cu/A/ГКЖ (с подслоем аммониевого соединения алкамона (А) с  $C_{17}$  – углеводородным радикалом у атома азота) и Cu/T/A (с последовательно нанесенными на металл слоями триамона (Т) с  $C_1$ - $C_2$  – радикалами у атома азота, а затем алкамона). Наибольшим водоотталкивающим эффектом обладают, как правило, материалы со структурно подобными веществами-модификаторами, нанесенными на металл. Показано, что сложно-немонотонная временная зависимость величины сорбции паров воды ( $a$ , г/г) модифицированными порошками на основе меди в интервале от 24 до 216 ч со средней относительной погрешностью 5–7% аппроксимируется уравнением на основе линейной функции и функции Гаусса.

**Ключевые слова:** хемосорбция четвертичных соединений аммония, медь, гидрофобность, сорбция паров воды, кинетика процесса, защита материалов.

**I. V. Pleskunov<sup>1</sup>, N. R. Prokopchuk<sup>1</sup>, A. G. Syrkov<sup>2</sup>, V. R. Kabirov<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Belarusian State Technological University<sup>2</sup>Saint Petersburg Mining University**WATER-REPELLENT PROPERTIES OF COPPER POWDER MODIFIED  
BY AMMONIUM COMPOUNDS DURING LONG-TERM TREATMENT  
WITH SATURATED WATER VAPOR**

Analysis of the adsorption isotherms of water by copper powder PMS-1 based surface-modified samples shows that the isotherms correspond to the systems with a weak adsorbate-adsorbent interaction and are typical for non-porous solids. During long-term interaction of samples with water vapor ( $P_{H_2O}/P_s = 0,98 \pm 0,02$ ,  $T = 298$  K), in the first 100 hours the sample Cu/HSL with adsorbed layer of organohydride siloxane applied from the vapor of hydrophobic silicon-organic liquid (HSL) demonstrates the highest adsorption of water. Under these conditions, the most hydrophobic samples are Cu/A/HSL (with monolayer of ammonium compound – alkamone (A) with  $C_{17}$  – hydrocarbon radical at the nitrogen atom) and Cu/T/A (with consistently applied layers of triamone (T) with  $C_1$ - $C_2$  – radicals at the nitrogen atom and alkamone). As a rule, materials treated with structurally similar modifiers have the greatest water-repellent properties. It is shown that a complex non-monotonous time dependences of the water vapor sorption ( $a$ , g/g) by modified copper-based powders in the interval from 24 to 216 hours is approximated by the equations based on a linear and Gauss function with an average relative error of 5–7%.

**Key words:** chemisorption of quaternary ammonium compounds, copper, hydrophobicity, water sorption, kinetics of process, materials protection.

**Введение.** Создание новых материалов с повышенной устойчивостью в агрессивных средах является важным направлением современной науки о материалах. Дисперсные металлы используются в различных химических процессах (легирования, катализа и др.), в качестве наполнителей к органополимерным композициям, в электронике и других облас-

тях [1, 2]. К этим металлам предъявляются особые требования как по строению и составу поверхности, так и по их устойчивости при взаимодействии с воздушной атмосферой при различной влажности, с агрессивными компонентами окружающей среды [1–3]. Таким образом, изучение свойств дисперсных металлов при различных внешних воздействиях, особенно,

экстремальных, проблем стабилизации сорбционных и иных свойств в воздушной среде с повышенной влажностью является не только важной задачей фундаментальной науки, но и представляет вполне конкретный прикладной интерес.

В данной работе изучено изменение сорбционных свойств стабилизированной дисперсной меди, содержащей на поверхности аммониевые соединения, при длительном взаимодействии (до 200 ч) с насыщенными парами воды.

Препараты на основе четвертичных соединений аммония (ЧСА) наносили на металл путем насаивания разноразмерных молекул ЧСА и кремнийорганических соединений, что является перспективным методом регулирования гидрофильно-липофильных и антифрикционных свойств поверхности [2, 4, 5]. В определенных режимах модифицирования исходных порошков металлов (Al, Cu, Ni и др.) получают дисперсные материалы с достаточно гидрофобной поверхностью, обладающей органическими свойствами. Подобные материалы весьма успешно применяются в составе олигомерных композиций различного назначения (смазки, лакокрасочные покрытия), усиливая функциональные свойства последних [4, 6].

Ранее было показано, что при описании сложно-немонотонной временной зависимости величины сорбции паров воды ( $a$ ) или параметра  $1/a$ , отражающего степень гидрофобизации

поверхности, для модифицированных образцов дисперсного алюминия уравнением на основе функции Гаусса, точность аппроксимации опытных данных значительно возрастает [6].

**Основная часть.** В качестве исходного дисперсного металла использовали порошок медный стабилизированный марки ПМС-1 (ГОСТ 4960-2009) с преимущественным размером частиц около 84 мкм и содержанием влаги менее 0,05%. Измерение размера частиц, их распределения по размерам и расчет удельной поверхности образцов проводили на основе данных метода лазерной дифракции (прибор Malvern Mastersizer 3000). Выбор упомянутого материала обусловлен как широкой востребованностью, так и тем фактом, что на поверхности медного порошка присутствует гидрофобизирующая пленка стабилизатора на основе олеата натрия, наносимого в заводских условиях. Особый интерес представляет возможность синергетического усиления водоотталкивающих свойств при адсорбции молекул ЧСА на поверхности.

Модифицирование поверхности медных порошков проводили в газовой среде парами алкамона (ГОСТ 10106-75) и (или) триамона (ТУ 6-14-1059-83) на основе ЧСА, а также парами гидрофобизирующей кремнийорганической жидкости (ГКЖ) – ГКЖ-94 на основе этилгидридсилоксана при комнатной температуре по методике, описанной в работах [2, 4–6].

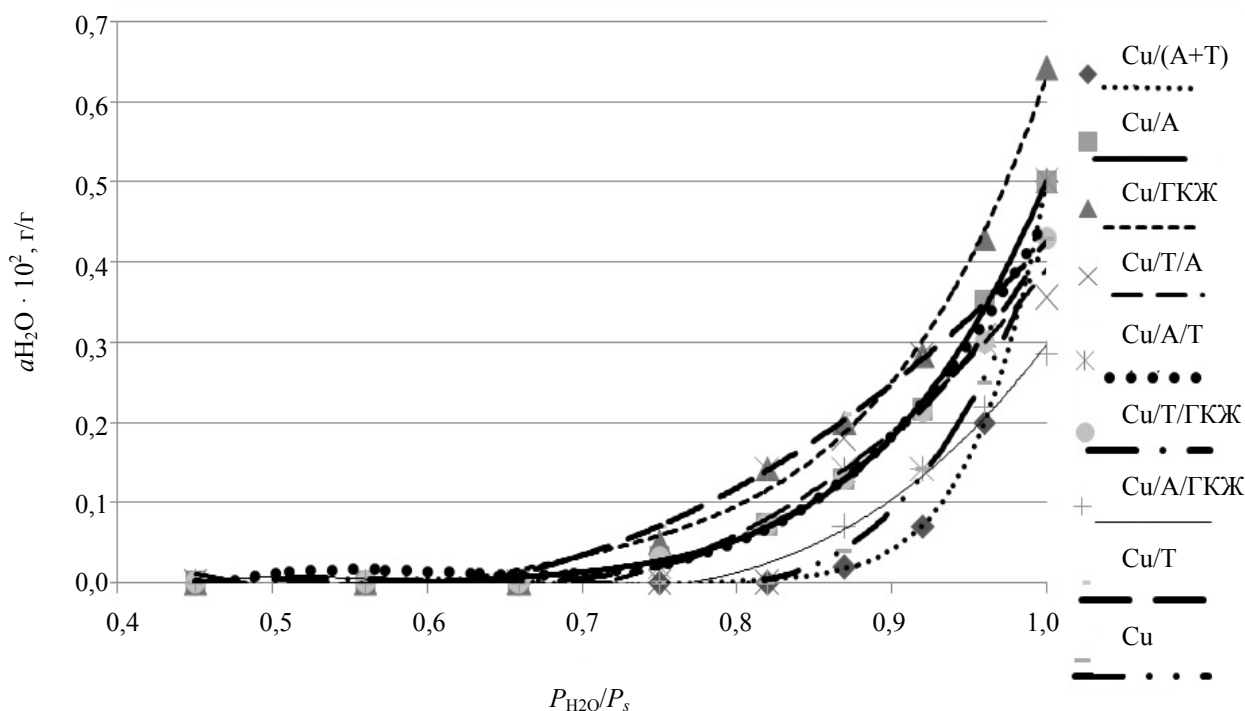


Рис. 1. Изотермы адсорбции паров воды ( $a_{H_2O}$ ) для поверхностно-модифицированных образцов меди

Состав триамона (Т) в парах отвечает химической формуле  $[(\text{HOC}_2\text{H}_4)_3\text{N}^+\text{CH}_3][\text{CH}_3\text{SO}_3^-]$  с низкомолекулярными радикалами у атома азота. В состав катиона использованного алкамона (А) входит значительный  $\text{C}_{17}$ -углеводородный радикал [5]. В зависимости от последовательности и режима хемосорбции ЧСА и препарата ГКЖ на поверхности исходного медного порошка (Cu), были получены следующие образцы: Cu/(А+Т), Cu/А, Cu/ГКЖ, Cu/Т/А, Cu/А/Т, Cu/Т/ГКЖ, Cu/А/ГКЖ и Cu/Т. Образец Cu/(А+Т) получали в смеси паров А и Т (1 : 1), Cu/Т/А – путем последовательного нанесения Т и А. Структурные измерения, выполненные методом лазерной дифракции, показали, что модифицирование порошка ПМС-1 в парах А, Т, ГКЖ не приводит к заметному изменению размера частиц и поверхности образца; удельная поверхность находится на уровне  $(1,6 \pm 0,2) \text{ м}^2/\text{г}$ .

Определение величины адсорбции паров воды  $a_{\text{H}_2\text{O}}$  и измерение изотерм адсорбции для исследуемых образцов проводили гравиметрически, эксикаторным методом, варьируя давление паров воды ( $P_{\text{H}_2\text{O}}/P_s = 0,45-1,00$ , где  $P_s$  – давление насыщения), при температуре  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ . Взвешивание образцов осуществляли на аналитических весах Shimadzu AUX220 (погрешность  $10^{-4}$  г). Относительное давление  $P_{\text{H}_2\text{O}}/P_s$  в эксикаторе регулировали путем введения в дистиллированную воду заранее рассчитанного количества серной кислоты по методике, описанной в ГОСТ 29244-91, и по справочным данным работы [7]. Факт адсорбции паров воды образцами дополнительно контро-

лировали по появлению в РФЭ-спектрах и усилению интенсивности пика O1s с энергией связи 532,5 эВ, характерной для воды, адсорбированной на металле [6, 8].

**Результаты и обсуждения.** Как видно из рис. 1, практически для всех изотерм образцов на основе меди характерен резкий подъем значения  $a_{\text{H}_2\text{O}}$  при относительном давлении  $P_{\text{H}_2\text{O}}/P_s > 0,8$ . Наиболее крутой подъем наблюдается для меди, обработанной органогидрид-силоксаном в парах ГКЖ (образец Cu/ГКЖ). Все образцы достаточно гидрофобны, поскольку измеримая адсорбция характерна для относительного давления не менее 0,7. Наиболее гидрофобные образцы вида Cu/А/ГКЖ, Cu/Т/А, Cu/(А+Т) заметно сорбируют влагу при  $P_{\text{H}_2\text{O}}/P_s$  большем, чем 0,82 (рис. 1). Полученные изотермы адсорбции паров воды для большинства образцов соответствуют виду изотерм III типа согласно классификации Брунауэра, Деминга, Деминга и Теллера [9]. Такого рода изотермы характерны для систем со слабым взаимодействием адсорбат-адсорбент и, как правило, для непористых твердых тел.

Интересно, что промышленный гидрофобизатор ГКЖ [10], просто нанесенный на медь ПМС-1, без Т- или А-подслоя, как следует из рис. 1 и рис. 2, не дает максимального водоотталкивающего эффекта для образца Cu/ГКЖ, который уступает по гидрофобности образцам, в том числе с нанесенными нами аммониевыми соединениями, особенно при времени взаимодействия с насыщенными парами воды свыше 150 ч (рис. 2).

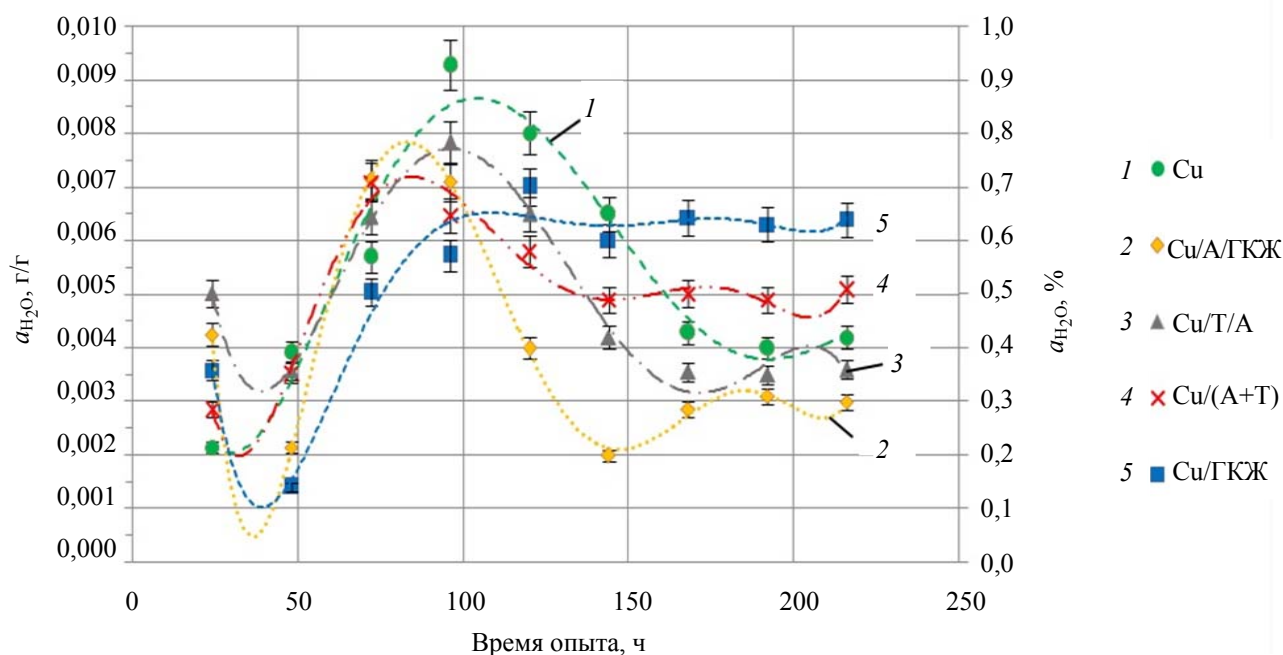


Рис. 2. Зависимость величины сорбции воды образцами на основе меди от времени взаимодействия с парами воды ( $P_{\text{H}_2\text{O}}/P_s = 0,98 \pm 0,02$ )

Таблица 1

## Математическое описание временной зависимости величины сорбции воды образцами на основе меди

Образец	Уравнение на основе функции Гаусса	Средняя относительная погрешность, %
Cu (ПМС-1)	$a = 0,165 + 1,26 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,589 \cdot \exp\left(-\left(0,025 \cdot (t - 96,4)\right)^2\right)$	6,22
	$1/a = 550 - 1,40 \cdot t - 320 \cdot \exp\left(-\frac{0,256 \cdot (t - 95,1)^2}{1000}\right)$	5,62
Cu/(A+T)	$a = -0,418 + 4,03 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,383 \cdot \exp\left(-\left(0,011 \cdot (t - 71,9)\right)^2\right)$	9,69
	$1/a = 718 - 2,207 - 385 \cdot \exp\left(-\frac{(t - 71,6)^2}{10000}\right)$	7,09
Cu/T/A	$a = 0,431 - 4,04 \cdot 10^{-4} \cdot t + 0,383 \cdot \exp\left(-\left(0,031 \cdot (t - 95,4)\right)^2\right)$	7,33
	$1/a = 232 + 0,259 \cdot t - 131 \cdot \exp\left(-\frac{1,02 \cdot (t - 93,2)^2}{1000}\right)$	7,29
Cu/ГКЖ	$a = -0,143 - 1,033 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,186 \ln t - 0,389 \cdot \exp\left(-0,003(t - 48,1)^2\right)$	3,09
	$1/a = 454 + 0,56 \cdot t - 76,8 \ln t + 523 \cdot \exp\left(-0,004(t - 48)^2\right)$	4,64
Cu/A/ГКЖ	$a = 4,57 + 0,032 \cdot t - 6,12 \cdot 10^{-5} t^2 - 1,54 \ln t + 0,85 \cdot \exp\left(-0,001(t - 83,3)^2\right)$	5,78
	$1/a = -4,38 \cdot 10^3 - 36,2 \cdot t + 0,07 t^2 + 1,73 \cdot 10^3 \ln t - 674 \cdot \exp\left(-0,0008(t - 81,1)^2\right)$	9,78

*Примечание.* Переменная безразмерная величина  $t$  в правых частях уравнений представляет собой приведенное время, получаемое делением  $t$  в часах на 1 час.

Временные зависимости величины сорбции при длительном взаимодействии (24–216 ч) образцов с насыщенными парами воды показывают, что мы имеем дело с весьма сложным колебательным затухающим процессом, который отражает, вероятно, сорбцию-десорбцию по мере насыщения поверхности адсорбированными молекулами воды [2]. Описание этих зависимостей суперпозицией линейной функции и функции Гаусса («гауссианы») обеспечивает среднюю относительную погрешность аппроксимации 6,2–9,7% (см. табл. 1). Точность аппроксимации, как правило, повышается, когда подобным приемом описывают связанную сорбционную характеристику –  $1/a$ .

При описании временной зависимости параметра  $1/a$  погрешность аппроксимации снижается до 5,6–7,3% (табл. 1–3). Эта погрешность соизмерима по порядку величины с погрешностью измерения сорбционных характеристик (3–5%) и не превышает доверительный интервал определения величин  $1/a$  и  $a$  (рис. 2). Вычисление коэффициентов в уравнениях, приводимых в табл. 1, производили посредством программного пакета MathCad. Эти коэффициенты являются характеристическими

для модифицированных по различной программе образцов на основе меди.

Экспоненты используют для описания кинетики сорбционных процессов [11]. Разновидность экспоненциальной зависимости в форме «гауссианы» взята за основу и в предложенном описании (табл. 1), что позволяет учесть в описании координату экстремума сложной зависимости. Для исходного образца меди это время 96,4 ч (табл. 1), которое входит в показатель степени экспонентной части уравнения и практически совпадает со временем, при котором максимум зависимости  $a = f(t)$  наблюдается на опыте (кривая 1 на рис. 2). То же можно сказать об образцах с нанесенными аммониевыми соединениями Cu/(A+T) – см. кривую 4 – и Cu/T/A (кривая 3). Для них координата максимума  $t_0$  составляет соответственно 71,9 и 95,4 ч и входит в показатель степени экспоненты.

Следует обратить внимание, что при аппроксимации с помощью функции Гаусса опытных данных по сорбции паров воды на дисперсном алюминии (ПАП-2) с нанесенными ЧСА [6], относительная погрешность при описании зависимости  $1/a = f(t)$  составляла 8,7%, а для зависимости  $a = f(t)$  еще больше (свыше 10%).

Таблица 2

Сопоставление экспериментальных значений величины сорбции воды и расчетных значений, полученных по уравнению из табл. 1 для образца вида Cu/A/ГКЖ

<i>t</i> , ч	24	48	72	96	168	192	216
<i>a</i> , % (эксп.)	0,426	0,214	0,716	0,710	0,286	0,310	0,300
<i>a</i> , % (расч.)	0,422	0,230	0,695	0,743	0,284	0,312	0,295

Таблица 3

Сопоставление экспериментальных значений параметра 1/*a* и его расчетных значений, полученных по уравнению из табл. 1 для образца вида Cu/A/ГКЖ

<i>t</i> , ч	24	48	72	96	168	192	216
1/ <i>a</i> , % (эксп.)	235	467	140	141	350	323	333
1/ <i>a</i> , % (расч.)	239	457	139	114	359	323	339

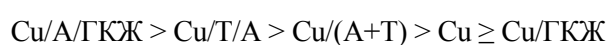
Таким образом, описание временных зависимостей для сорбции влаги в случае модифицированных медных образцов оказалось более точным. Для порошков, которые не содержат нанесенный органогидридсилоксан, описание в общем виде соответствует уравнению

$$1/a = A + B \cdot t + C \cdot \exp(-k \cdot (t - t_0)^2),$$

где  $t_0$  отвечает значению аргумента ( $t$ ) для экстремума зависимости, коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $k$ , как следует из табл. 1, являются характеристиками конкретного образца и зависят от строения его поверхностного слоя. В правой части уравнения находятся только линейная функция и «гауссиана». В работе [6], чтобы добиться снижения погрешности аппроксимации до 8,7%, пришлось добавлять слагаемые  $\ln t$  и  $t^2$  с коэффициентами. Упрощение описания в нашем случае (Cu-образцы) в первом приближении можно связать с меньшей дисперсностью образцов, что, как правило, приводит к ослаблению нелинейных эффектов в процессах (например, сорбции), протекающих в системе [12]. Действительно, если удельная поверхность синтезированных нами образцов на основе меди (ПМС-1) составляет порядка 0,16 м<sup>2</sup>/г, то в аналогично модифицированных образцах на основе Al-пудры ПАП-2 [6] величина поверхности находится на уровне 2,6 м<sup>2</sup>/г.

Для образцов вида Cu/ГКЖ и Cu/A/ГКЖ, содержащих на поверхности органогидридсилоксан, наиболее точное описание кинетики сорбции воды требует добавления в правую часть уравнений слагаемых на основе функции  $\ln t$  и  $t^2$  (табл. 2). На основе данных, приведенных на рис. 1 и 2, а также в табл. 4, можно сделать вывод, что наибольшим гидрофобным эффектом (наименьшим  $a_{H_2O}$ ) обладает образец вида Cu/A/ГКЖ с последовательно нанесенными алкамоном и этилгидридсилоксаном. Названный эффект для образцов, сорбционная активность которых охарактеризована на рис. 2,

увеличивается в ряду (сравнение произведено для  $t = 145$  ч):



Усиление гидрофобных свойств

Таблица 4

Средние значения величины сорбции паров воды ( $P_{H_2O}/P_s = 0,98 \pm 0,02$ ) разными образцами во временном интервале  $24 \leq t \leq 216$  ч

Образец	$a_{ср}$ , %
Cu/A/ГКЖ	0,396
Cu/T/A	0,491
Cu/(A+T)	0,507
Cu	0,534
Cu/ГКЖ	0,532

Впервые полученные в этой работе данные о сорбционной активности поверхностно-модифицированных образцов на основе меди ПМС-1 полезно сравнить с известными результатами изучения образцов, также содержащих нанесенные ЧСА, на основе дисперсного алюминия (ПАП-2) и порошка меди ПМ-1 [2, 4, 5, 6, 12, 13]. Сравнение интересно тем, что исходная медь ПМ-1 не содержит на поверхности стабилизирующую органическую пленку (как у ПМС-1); Al-порошок ПАП-2 стабилизируется в заводских условиях модифицирующей добавкой стеарина, толщина пленки которого, по данным работ [6, 14], не превышает 1–2 монослоя. Краткие выводы анализа таковы. В образцах на основе ПМС-1 и ПМ-1 более гидрофобным является порошок Cu/T/A (при сравнении образцов вида Cu/(A+T) и Cu/T/A). Для Al-порошков, наоборот, более гидрофобным и стабильным по свойствам оказывается образец вида Al/(A+T), то есть полученный в смешанном режиме обработки ПАП-2 парами А и Т [6, 10]. При введении аммониевых подслоев под внешний слой органогидридсилоксана (получен из ГКЖ) на алюминии более гидрофобным

показывает себя образец вида Al/T/ГКЖ, а не Cu/A/ГКЖ, как в случае исходного медного порошка ПМС-1 (см. рис. 2).

Получается, что поведение образцов на основе ПМС-1 при взаимодействии с парами воды не повторяет полностью поведение аналогично модифицированных образцов на основе Al-порошка ПАП-2 (со стабилизированной поверхностью, как и у ПМС-1) и на основе порошка меди ПМ-1. Общее объяснение наблюдаемых различий, на наш взгляд, связано со структурным соответствием поверхности исходной металлической подложки и наносимым веществом (ЧСА или органогидридсилоксаном) [2, 12]. В случае соответствия наносимый слой вещества, обладающего гидрофобными углеводородными радикалами, достаточно прочно закрепляется на поверхности; нанесение двухкомпонентных слоев (Т/А или А/ГКЖ) уплотняет структуру защитного водоотталкивающего слоя на металле, усиливая гидрофобные свойства образца. Химическое взаимодействие ЧСА с дисперсной медью в ряде случаев надежно регистрируется методом РФЭ-спектроскопии [12, 13]. Судя по данным рис. 1 и 2, гидрофобизирующая пленка на частицах исходного ПМС-1 (Cu) является достаточно рыхлой, что делает возможным проникновение нуклеофильных малоразмерных молекул триамина непосредственно к металлу и взаимодействие с ним в образце Cu/T/A по донорно-акцепторному механизму [13]. С другой стороны, по видимому, нанесенные в заводских условиях на медь поверхностно-активные вещества по ГОСТ 4960-2009 для ПМС-1 структурно по-

добны алкамону, что, в конечном счете, делает образец Cu/A/ГКЖ наиболее устойчивым к воздействию паров воды.

**Заключение.** Установлено, что при длительном (24–216 ч) взаимодействии насыщенных паров воды с поверхностно-модифицированными порошками на основе меди ПМС-1 в статических условиях величина сорбции воды ( $a$ , г/г) изменяется сложным образом, похожим на затухающие колебания. Предложено математическое описание процесса, позволяющее с относительной погрешностью 5–7% аппроксимировать опытные данные по временным зависимостям  $a = f(t)$  и  $1/a = F(t)$  на основе линейной функции и функции Гаусса. Такое описание обладает относительной простотой, физическим смыслом и позволяет количественно оценить нелинейные эффекты в изучаемых системах.

Показано, что среди синтезированных образцов на основе меди, содержащих нанесенные по различным программам препараты на основе четвертичных соединений аммония (триамон – Т и алкамон – А) и органогидридсилоксан, адсорбированный из паров гидрофобизирующей кремнийорганической жидкости (ГКЖ), наиболее гидрофобными являются образцы вида Cu/A/ГКЖ и Cu/T/A с последовательно нанесенными слоями структурно подобных веществ, в том числе разноразмерных молекул аммониевых соединений (Cu/T/A).

Авторы благодарят В. С. Кавуна за техническую помощь при измерении адсорбции паров воды и В. В. Тарабана – консультанта по математическому описанию опытных данных с использованием MathCad.

### Литература

1. Synthesis, characterization and applications of nanoparticles / J. Chen [et al.] // *Fabrication and Self-Assembly of Nanobiomaterials*. 2016. P. 1–27.
2. Белоглазов И. Н., Сырков А. Г. Химико-физические основы и методы получения поверхностно-наноструктурированных металлов. СПб.: СПбГУ, 2011. 72 с.
3. Formation of iron oxide nanoparticles for the photooxidation of water: Alteration of finite size effects from ferrihydrite to hematite / S. Schwaminger [et al.] // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7, article number: 12609. P. 9.
4. Сырков А. Г., Тарабан В. В., Назарова Е. А. Влияние гидрофобности и реакционной способности поверхностно-наноструктурированных металлов-наполнителей на трибологические характеристики смазки // *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2012. Т. 14, № 2. С. 150–154.
5. Alteration of the acid-base properties of the oxidized surface of disperse aluminum during the adsorption of ammonium compounds and the antifriction effect / A. G. Syrkov [et al.] // *Glass Physics and Chemistry*. 2018. Vol. 44, no. 5. P. 474–479.
6. Камалова Т. Г. Особенности адсорбционно-химических и антифрикционных свойств металлов, содержащих на поверхности низкоразмерные формы аммониевых соединений: дис. ... канд. хим. наук. Санкт-Петербург, 2017. 104 с.
7. Справочник химика. Химическое равновесие и кинетика. Свойства растворов. Электродные процессы. Т. III. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Химия, 1964. 1008 с.
8. Робертс М., Макки Ч. Химия поверхности раздела металл-газ. М.: Мир, 1989. 359 с.
9. Lowell S., Shields J. E. Adsorption isotherms // *Powder Surface Area and Porosity*. Springer: Dordrecht, 1984. P. 11–13.

10. Хананашвили Л. Н., Андрианов К. А. Технология элементоорганических мономеров и полимеров. М.: Химия, 1983. 380 с.
11. Романков П. Г., Фролов В. Ф., Флисюк О. М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи). СПб.: Химиздат, 2009. 544 с.
12. Сырков А. Г. Нанотехнология и наноматериалы. Роль неравновесных процессов. СПб.: Политехн. ун-т, 2016. 194 с.
13. Syrkov A. G. Synergetic change of tribochemical properties of copper in the presence of Quaternary Ammonium Compounds at the surface // *Russian Journal of General Chemistry*. 2015. Vol. 85, no. 6. P. 1538–1539.
14. Алюминий. Металловедение, обработка и применение алюминиевых сплавов. Справочник. М.: Metallurgiya, 1972. 664 с.

### References

1. Chen J., Javaheri H., Sulaiman B., Dahman Y. Synthesis, characterization and applications of nanoparticles. *Fabrication and Self-Assembly of Nanobiomaterials*, 2016, pp. 1–27.
2. Beloglazov I. N., Syrkov A. G. *Khimiko-fizicheskiye osnovy i metody polucheniya poverkhnostno-nanostrukturirovannykh metallov* [Chemicophysical basics and methods of obtaining of surface-nanostructured metals]. St. Petersburg, SPbGU Publ., 2011. 72 p.
3. Schwaminger S., Surya R., Filser S., Wimmer A., Weigl F., Fraga-García P., Berensmeier S. Formation of iron oxide nanoparticles for the photooxidation of water: Alteration of finite size effects from ferrihydrite to hematite. *Scientific Report*, 2017, vol. 7, article number: 12609, p. 9.
4. Syrkov A. G., Taraban V. V., Nazarova E. A. Influence of hydrophobicity and reactivity of surface-nanostructured filling metals on tribology characteristics of lubricant. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznyye granitsy* [Condensed Matter and Interphases], 2012, vol. 14, no. 2, pp. 150–154 (In Russian).
5. Syrkov A. G., Sychev M. M., Silivanov M. O., Rozhkova N. N. Alteration of the acid-base properties of the oxidized surface of disperse aluminum during the adsorption of ammonium compounds and the antifriction effect. *Glass Physics and Chemistry*, 2018, vol. 44, no. 5, pp. 474–479.
6. Kamalova T. G. *Osobennosti adsorbtsionno-khimicheskikh i antifriktsionnykh svoystv metallov, soderzhashchikh na poverkhnosti nizkorazmernyye formy ammoniyevykh soedineniy: Dis. kand. khim. nauk* [Peculiarities of adsorption-chemical and antifriction properties of metals, containing low-dimensional forms of ammonium compounds on surface. Cand. Diss.]. St. Petersburg, 2017. 104 p.
7. *Spravochnik khimika. Khimicheskoye ravnovesie i kinetika. Svoystva rastvorov. Elektrodnyye protsessy. T. III.* [Data book of chemist. Chemical equilibrium and kinetics. Properties of solutions. Electrode processes.]. Leningrad, Khimiya Publ., 1964. 1008 p.
8. Roberts M., Makki Ch. *Khimiya poverkhnosti razdela metall-gaz* [Chemistry of metal-gas interface]. Moscow, Mir Publ., 1989. 359 p.
9. Lowell S., Shields J. E. Adsorption isotherms. *Powder Surface Area and Porosity*. Springer, Dordrecht, 1984. P. 11–13.
10. Khananashvili L. N., Andrianov K. A. *Tekhnologiya elementoorganicheskikh monomerov i polimerov* [Technology of organoelement monomers and polymers]. Moscow, Khimiya Publ., 1983. 380 p.
11. Romanov P. G., Frolov V. F., Flisyuk O. M. *Metody rascheta protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii (primery i zadachi)* [Calculation methods of processes and equipments of chemistry technology (examples and exercises)]. St. Petersburg, Khimizdat Publ., 2009. 544 p.
12. Syrkov A. G. *Nanotekhnologiya i nanomaterialy. Rol' neravnovesnykh protsessov* [Nanotechnology and nanomaterials. Role of nonequilibrium processes]. St. Petersburg, Politekhicheskiy universitet Publ., 2016. 194 p.
13. Syrkov A. G. Synergetic change of tribochemical properties of copper in the presence of Quaternary Ammonium Compounds at the surface. *Russian Journal of General Chemistry*, 2015, vol. 85, no. 6, pp. 1538–1539.
14. *Alyuminiy. Metallovedeniye, obrabotka i primeneniye alyuminiyevykh splavov. Spravochnik* [Aluminum. Metal science, treatment and using of aluminum alloy. Data Book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1972. 664 p.

### Информация об авторах

**Плескунов Игорь Владимирович** – аспирант. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Pleskunov@mail.ru

**Прокопчук Николай Романович** – доктор химических наук, член-корреспондент НАН Беларуси, профессор кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Сverdlova, 13а, Республика Беларусь). E-mail: nrprok@gmail.com

**Сырков Андрей Гордианович** – доктор технических наук, профессор кафедры общей и технической физики. Санкт-Петербургский горный университет (199406, г. Санкт-Петербург, Малый проспект, 83, Российская Федерация). E-mail: syrkovandrey@mail.ru

**Кабилов Вадим Рафаилович** – магистрант. Санкт-Петербургский горный университет (199406, г. Санкт-Петербург, Малый проспект, 83, Российская Федерация). E-mail: vkabirov1@gmail.com

#### **Information about the authors**

**Pleskunov Igor' Vladimirovich** – postgraduate student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Pleskunov@mail.ru

**Prokopchuk Nikolay Romanovich** – DSc (Chemistry), Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Republic of Belarus, Professor, the Department of Polymer Composites. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nrprok@gmail.com

**Syrkov Andrey Gordianovich** – DSc (Engineering), Professor, the Department of General and Applied Physics. Saint-Petersburg Mining University (83, Malyy Ave., 199406, Saint Petersburg, Russian Federation). E-mail: syrkovandrey@mail.ru

**Kabirov Vadim Rafailovich** – Master's Degree student. Saint-Petersburg Mining University (83, Malyy Ave., 199406, Saint Petersburg, Russian Federation). E-mail: vkabirov1@gmail.com

*Поступила 11.04.2019*