

Литература:

1. Brezhnev V.I. Flexible complexes for the control of a ship power plant // Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series: Natural and technical sciences. 2020. No. 8-2. pp. 42-46.
2. Faruque, Md Omar Fuzzy Logic Based Energy Storage Management System for MVDC Power System of All Electric Ship // IEEE transactions on energy conversion. 2017. Volume 32: Number 2; pp 798-809.
3. Tang, Ruoli Optimal operation of hybrid energy system for intelligent ship: An ultrahigh-dimensional model and control method // Energy: the international journal. 2020. Volume 211.
4. Epikhin, A. I. Integrated system for ensuring safe operation of technical means of ships carrying liquefied gases / A. I. Epikhin // Scientific, technical, economic and legal aspects of the development of the transport complex : Materials of the III (XVII) National Scientific and practical Conference, Novorossiysk, November 14-15, 2019. Novorossiysk: Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 2019. - pp. 165-167.
5. Epikhin, A. I. Building a decision support system for integrated security of gas tankers / A. I. Epikhin // Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of Marine and River Fleet. - 2017. - Vol. 9. - No. 3. - pp. 481-488. - DOI 10.21821/2309-5180-2017-9-3-481-488.
6. Kondratyev, S. I. A diagnostic system of an intelligent component based on Bayesian accurate inference networks / S. I. Kondratyev, A. I. Epikhin, S. O. Malakhov // Journal of Physics: Conference Series, Novosibirsk, May 12-14, 2021. - Novosibirsk, 2021. - P. 012022. - DOI 10.1088/1742-6596/2032/1/012022.
7. Epikhin, A. I. Method for synthesis of an intelligent automatic system for diagnosing combustion engine vibration of the power supply system of an unmanned vessel / A. I. Epikhin // Journal of Physics: Conference Series, Novorossiysk, Virtual, June 15-16, 2021. - Novorossiysk, Virtual, 2021. - P. 012023. - DOI 10.1088/1742-6596/2061/1/012023.
8. Khekert, E.V. Analysis of methods to optimize control systems for power supply of marine vessels using fuzzy logic and fractal analysis / E. V. Khekert, A. I. Epikhin // Journal of Physics: Conference Series, Novorossiysk, Virtual, June 15-16, 2021. - Novorossiysk, Virtual, 2021. - P. 012088. - DOI 10.1088/1742-6596/2061/1/012088.
9. Epikhin, A. I. Neurocontrol methods in the context of development of technical solutions for transition to unmanned navigation / A. I. Epikhin // Journal of Physics: Conference Series, Novorossiysk, Virtual, June 15-16, 2021. - Novorossiysk, Virtual, 2021. - P. 012115- - DOI 10.1088/1742-6596/2061/1/012115.
10. The main trends in the introduction of artificial intelligence technologies in the management of marine autonomous surface vessels / A. I. Epikhin, A. V. Ignatenko, D. E. Studenikin, E. V. Heckert // Operation of sea transport. - 2021. - № 1(98). - Pp. 88-96- - DOI 10.34046/aumsuomt98/14.
11. Patent No. 2737457 C1 Russian Federation, IPC B63H 21/22, G06F 17/00, G05B 17/02. Automatic system with a neuro-fuzzy network for complex technical diagnostics and control of a ship's power plant : No. 2020121876 : application 26.06.2020 : publ. 30.11.2020 / A. I. Epikhin ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Admiral F.F. Ushakov State Maritime University".
12. Epikhin, A. I. Application of neural networks based on a multilayer perceptron using fuzzy logic for technical diagnostics of ship technical means / A. I. Epikhin, S. I. Kondratyev, E. V. Heckert // Operation of sea transport. - 2020. - № 3(96). - Pp. 111-119- - DOI 10.34046/aumsuomt96/15.
13. Epikhin, A. I. Principles of neuro-management and variants of neural network architecture, applied to a complex dynamic system of SEU-VESSEL / A. I. Epikhin, E. V. Heckert, M. A. Modina // Marine intelligent technologies. - 2020. - № 4-4(50). - Pp. 18-22- - DOI 10.37220/MIT.2020.50.4.091.
14. Patent No. 2713077 C1 Russian Federation, IPC B63H 21/22, G06F 17/00, G05B 17/02. Decision support system with modular structure for operators of double-acting vessels: No. 2019114000: application 06.05.2019: publ. 03.02.2020 / A.I. Epikhin, E. V. Heckert; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Admiral F.F. Ushakov State Maritime University".

УДК 548.312.2; 53.082.7

DOI: 10.34046/aumsuomt102/22

ДИАГНОСТИКА КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИХ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ПРИ ПОМОЩИ ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННЫХ ТОКОВ

В.М. Тимохин, кандидат физико-математических наук, доцент

Одной из технических проблем при транспортировке кристаллических сыпучих грузов является изменение их структуры при высокой влажности или высокой температуре. При этом может изменяться количество молекул воды в формульной единице кристаллов, что приводит к изменению физических

и химических свойств материала. Разработанная диагностика для исследования структуры кристаллов проще и дешевле известных рентгенофазовых и химических методов анализа, является экологически безопасной. Она основана на исследовании одного из максимумов спектра термостимулированных токов деполяризации, появление которого, как показал эксперимент, обусловлено релаксацией молекул воды. Величина этого максимума оказалась пропорциональна количеству молекул воды в формульной единице кристаллов. Предлагаемая диагностика может быть использована и для других классов кристаллогидратов (карбонатов, хлоритов, нитратов, фосфатов и др.).

Ключевые слова. Диагностика, кристаллографическая структура, термостимулированные токи деполяризации, рентгенофазовый анализ, дифрактометры.

DIAGNOSTICS OF THE CRYSTALLOGRAPHIC STRUCTURE OF MATERIALS DURING THEIR TRANSPORTATION USING THERMALLY STIMULATED CURRENTS

V.M. Timokhin

One of the technical problems in the transportation of crystalline bulk cargoes is the change in their structure at high humidity or high temperature. In this case, the number of water molecules in the formula unit of crystals may change, which leads to a change in the physical and chemical properties of the material. The developed diagnostics for studying the crystal structure is simpler and cheaper than the known X-ray phase and chemical analysis methods, and is environmentally safe. It is based on the study of one of the maxima of the spectrum of thermally stimulated depolarization currents, the appearance of which, as the experiment showed, is due to the relaxation of water molecules. The magnitude of this maximum turned out to be proportional to the number of water molecules in the formula unit of crystals. The proposed diagnostics can be used for other classes of crystallohydrates (carbonates, chlorites, nitrates, phosphates, etc.).

Keywords. Diagnostics, crystallographic structure, thermally stimulated depolarization currents, X-ray phase analysis, diffractometers.

1. Введение

При погрузке и транспортировке кристаллических сыпучих грузов очень важно знать содержание молекул воды в кристаллографической структуре перевозимого материала. При повышенной влажности или высокой температуре структура, а, следовательно, и свойства кристаллического материала могут измениться. Изменение содержания молекул воды в структуре кристаллов сильно влияет на физические и химические свойства материалов, например, минеральных удобрений в кристаллическом виде. В кристаллах с водородными связями миграция молекул воды связана с протонной проводимостью, что описывается в ряде работ [1-3].

Целью исследования является повышение точности, достоверности и экологической безопасности при определении структуры кристаллических материалов в результате исследования и сравнения спектров термостимулированных токов деполяризации (ТСТД) исходных чистых и прокалённых при различной температуре образцов, что позволило определить содержание молекул воды в формульной единице кристаллов.

2. Приборы и оборудование

Эксперимент осуществлялся на запатентованной установке, защищённая патентом [4]. Измерения осуществлялись в интервале температур 77-473 К и диапазоне частот электрического поля $1-10^8$ Гц. Конструкция стационарного устройства имеет следующие основные части, показанные на рисунке 1. На стальном основании

1 крепится вакуумный экранирующий колпак 3 из нержавеющей стали. Польный нижний электрод 4 крепится к основанию при помощи приваренных к крышке 5 трубок 6 и 7 для ввода и вывода паров жидкого азота, которые крепятся на основании при помощи фторопластовых прокладок 24 и прижимных гаек 25. На нижней поверхности крышки нижнего электрода 4 расположена спираль нагревателя 8, помещенная в кварцевые трубки и питаемая постоянным током. Внутри электрода 4 с помощью пружин 10 закреплен сменный ультразвуковой преобразователь 11 с выводом 12 на УЗГ. Образец 13 с охранным 14 и измерительным 15 электродами помещался на нижний польный электрод 4 и слегка прижимался при помощи тонкой пластинчатой пружины 16, закрепленной на изолированной стойке 17 и пластинки из плавленного кварца 18. Вакуумный электрический ввод собран на основе пластинки 26 из плавленного кварца с отверстием в центре для ввода контакта 27.

Скорость естественного нагрева образца как правило поддерживалась 0,5-1 К/мин. Внутри установки обеспечивалось давление около $10^{-3}-10^{-4}$ мм. рт. ст. при помощи форвакуумного и диффузионного насосов через штуцер 23. Для облучения материала и регистрации его излучения на ФЭУ в вакуумном экранирующем колпаке выполнены окна 19 и 19 а. Температура измеряется посредством двух дифференциальных хромель-копелевых термопар 20 на нижнем и верхнем электродах через разъем 21 и прижимной гайки 22.

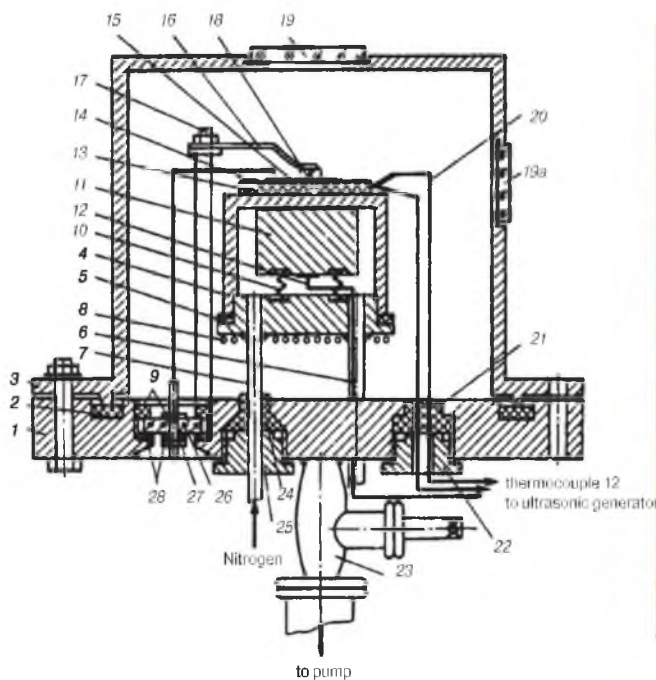


Рисунок 1 – Конструкция и внешний вид установки для исследования физико-технических характеристик полупроводников, диэлектриков и электроизоляционных материалов

Для исследований применялся электронный вольтметр-электромметр В7-30. Погрешность измерений на данном устройстве составляет: по току $\pm 1 \cdot 10^{-15} A$, по ёмкости – 2%. Для достижения такой точности применялся соединительный кабель с двойным экранированием. В качестве источника питания использовался источник стабилизированного напряжения (УИП-2). Для градуировки и измерения температуры применялся цифровой электронный вольтметр В7-21 с дифференциальной хромель-копелевой термопарой, один спай которой помещался в нуль – термостат, где поддерживалась температура тающего льда. Градуировка термопары производилась при помощи платинового термометра сопротивления ТСП-21 и моста постоянного тока МОД-61 с точностью $\pm 0,5 K$.

Методика исследования ТСТД впервые была описана в работе [5] для ионных кристаллов

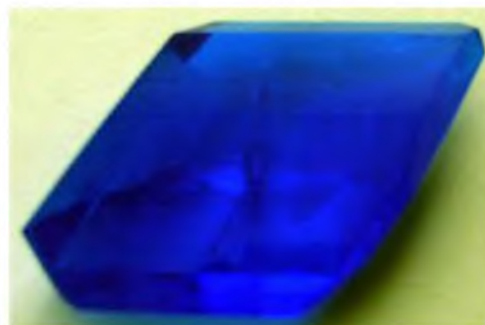
и позже в работе [8] для кристаллов с водородными связями.

Количество молекул воды в формульной единице и чистота изученных кристаллов контролировались рентгенофазовым анализом. Для этого использовался рентгеновский дифрактометр ДРОН-УМ1 с кобальтовым анодом и вакуумом $10^{-5}-10^{-6}$ мм.рт.ст. Длина волны линии K_{α} составляла 1,7902 Å.

Для исследований использовались кристаллы гидросульфата меди $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, выращенные методом открытого испарения из пересыщенного раствора, изготовленного из препарата химически чистого для анализа, и природные кристаллы гидросульфата кальция $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, показанные на рисунке 2. Кристаллы шлифовались различными шлифовальными порошками и полировались пастой Гойя. Поликристаллы изготавливались путём прессования кристаллического порошка в виде таблетки.



a



b

Рисунок 2 – Кристаллы: *a* – гидросульфата кальция (гипс); *b* – гидросульфата меди

3. Результаты эксперимента и их обсуждение

При проведении многократных исследований спектров термостимулированных токов деполяризации (ТСТД) различных кристаллов были идентифицированы все 7 максимумов, что подробно описано в работах [2, 3, 6-8].

При исследовании спектров ТСТД кристаллогидратов кальция и меди было обнаружено, что максимум № 3 ($T = 175-180$ К) уменьшается только при температурах прокаливания, соответствующих изменению структуры кристалла. При этом изменялось содержание воды в формульных единицах кристаллов. Высота максимумов 3 плотности термостимулированного тока деполяризации, показанных на рисунках 3 и 4, оказалась пропорциональной количеству молекул воды в формульной единице кристаллогидратов. Содержание примеси (например, HCl) резко увеличивало высоту максимума, но не изменяло их расположение.

Кроме того, отсутствие максимума №3 в спектре ТСТД свидетельствует об отсутствии молекул кристаллизационной воды в исследуемом кристаллическом материале (кривая 4 на рисунке 3 и кривая 5 на рисунке 4). Отсутствие мак-

симума №4 свидетельствует об отсутствии молекул адсорбированной воды, отсутствие максимума №5 свидетельствует об отсутствии ионов OH^- [2, 6], то есть происходит превращение в безводный кристалл, что имеет большое значение в химической и электротехнической промышленности при обезвоживании кристаллов и порошков из кристаллического материала. Поэтому был сделан вывод, что максимум №3 ТСТД обусловлен релаксацией молекул кристаллизационной воды. Этот вывод подтверждается экспериментами с кристаллами, содержащими различное количество молекул кристаллизационной воды в формульной единице, а именно: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$.

В качестве эталонного можно взять любой кристалл, например, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, и сравнивать с ним другие кристаллы. Путем последовательного прокаливания при температурах 100°C , 120°C , 150°C , 100°C и 600°C были получены кристаллы $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, CaSO_4 (рис. 4). Измерения были проведены как для монокристаллов, так и для поликристаллов, спрессованных из порошка в таблетки такой же толщины, что и монокристаллы.

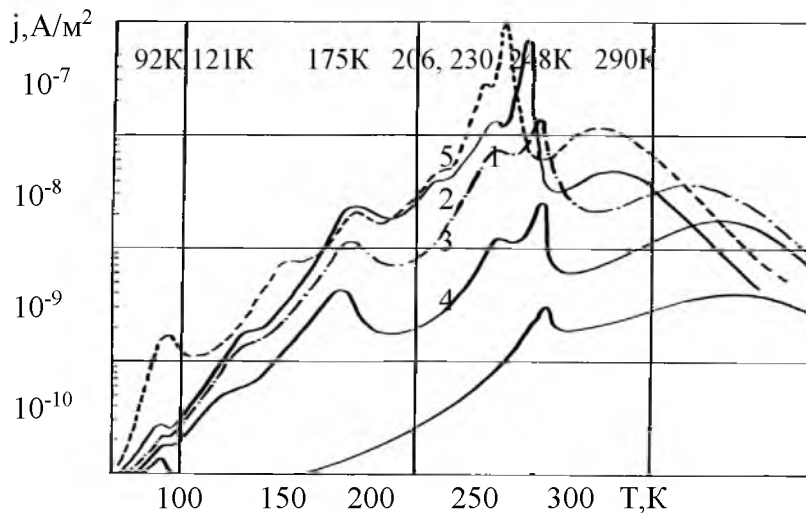


Рисунок 3 – Спектр плотности ТСТД сульфата меди: 1 – $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 2 – $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, 3 – $\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 4 – CuSO_4 (300°C), 5 – $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}[\text{M}(\text{HCl}) = 1 \cdot 10^{-5}$ моль/ м^3].
 $E_n = 2 \cdot 10^5$ В/м, $T_n = 300$ К, $\beta = 5,5$ К/мин.

На дифрактометре ДРОН-УМ1 производилась идентификация кристаллических фаз на основе присущих им значений межплоскостных расстояний d_{hkl} и интенсивности линий I_{hkl} рентгеновского спектра. Анализ дифрактограмм показал наличие соответствующего этим температурам количества молекул воды, остающихся в кристалле после прокаливания. Расчет производился по формуле Вульфа-Брэггов.

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin(\theta / 2)}, n = 1 \tag{1}$$

Определение фазового состава изучаемого вещества производилось путем сравнения экспериментального набора значений d_{hkl} и I_{hkl} , найденных из рентгеновских спектров, с табличными значениями d_{hkl} и I_{hkl} , которые представлены в картотеке ASTM (American Society for

Testing Materials) [9]. Результаты показаны в таблице 1 как для монокристаллов, так и для поликристаллов. Полученные данные хорошо совпадают с данными картотеки: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ карта № 6-46 ASTM, $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ – карта № 24-1067, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – карта № 11-646, $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ – карта № 22-249, $\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – карта № 21-269. Нами установлено, что с большой точностью выполняется соотношение:

$$j_{m,эм} / j_{m,x} = N_{эм} / N_x \quad (2)$$

справедливое как для монокристаллов, так и для поликристаллов. Здесь $j_{m,эм}$, $j_{m,x}$, $N_{эм}$, N_x – плотности j третьего максимума ТСТД и количества молекул воды N в формульной единице для эталонного и исследуемого кристаллов.

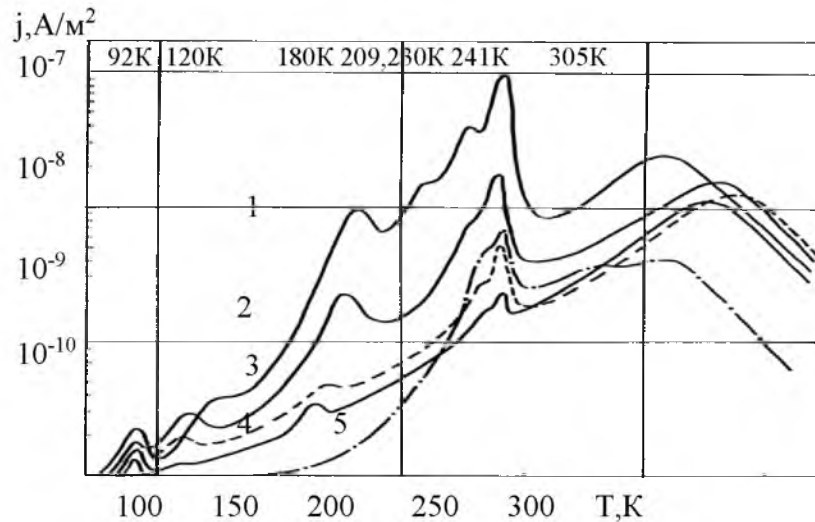


Рисунок 4 – Зависимость плотности ТСТД сульфата кальция от температуры прокаливания, $T_{п} = 300$ К: 1 – природный ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), 2 – 120 °C ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), 3 – 160 °C ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), 4 – 180 °C (CaSO_4), 5 – 600 °C.

Таблица 1 – Результаты расчета дифрактограмм для кристаллогидратов сульфатов кальция и меди

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$				$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$			
Эксперимент		ASTM		Эксперимент		ASTM	
$d, \text{Å}$	I/I_0	$d, \text{Å}$	hkl	$d, \text{Å}$	I/I_0	$d, \text{Å}$	hkl
7,53	100	7,56	020	5,18	3	5,15	$11\bar{1}$
3,80	20	3,79	031	4,68	100	4,66	110
3,79	30	3,79	040	2,57	2	2,57	$22\bar{2}$
3,06	2	3,06	$14\bar{1}$	2,33	75	2,33	220
1,90	4	1,90	080				
1,89	4	1,90	062				
$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$				$\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$			
6,00	61	5,94	020,110	5,11	53	5,11	110
3,46	66	3,44	200	4,87	45	4,86	021
3,00	100	3,00	202,132	4,42	100	4,42	$\bar{1}11$
2,79	16	2,77	114,024	3,98	53	3,97	111
2,70	5	2,68	222,042	3,65	75	3,65	002
2,26	6	2,24	240,310	3,41	75	3,42	130
2,13	9	2,15	224	3,25	68	3,25	040
2,12	11	2,12	152,242	3,19	45	3,19	$\bar{1}31$
2,00	2	2,01	303,106	3,01	43	3,01	131
1,91	4	2,01	106	2,82	65	2,82	112
1,9	3	1,88	161	2,50	45	2,50	$\bar{2}21$
1,23	2	1,23	524				

Следовательно, имея кристалл с известным содержанием молекул кристаллизационной воды в формульной единице, можно определить

количество молекул N_x воды в формульной единице любого кристаллогидрата, воспользовавшись формулой (2). Как видно из таблицы 2 по-

грешность составляет 2-6%. Это позволяет сделать вывод, что соотношение (2) выполняется для любой пары кристаллов, например, для $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ и $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. В этом случае $N_{\text{эт}} / N_x = 1,5; j_{\text{эт}} / j_x = 1,48$.

Величины j_m максимумов 3, изображённых на рисунках 2 и 3 для различных кристаллогидратов, линейно связаны между собой, при этом коэффициент корреляции оказался равен 0,81 в

соответствии с [10]. Данное соотношение не зависит от способа получения кристалла (природный или выращенный из раствора) (таблица 2).

В таблице 2 сведены экспериментальные результаты. Снимать весь спектр ТСТД нет необходимости, достаточно получить третий максимум и измерить максимальное значение плотности ТСТД этого максимума. Затем, воспользовавшись формулой (2), определить количество молекул кристаллизационной воды в формульной единице исследуемого кристаллогидрата.

Таблица 2 – Отношение количества молекул воды в формульных единицах и плотностей ТСТД для поликристаллов и монокристаллов кристаллогидратов

Тип кристалла	$j_m, \text{A/M}^2$	$N_{\text{эт}}/N_x$	$j_{\text{эт}}/j_x$	Ошибка, $\delta_0, \%$
Поликристалл				
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	$7,26 \cdot 10^{-9}$	1	1	-
$\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$4,5 \cdot 10^{-9}$	$5/3 = 1,66$	1,62	2,4
$\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$1,51 \cdot 10^{-9}$	$5/1 = 5$	4,8	4
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$3,03 \cdot 10^{-9}$	$5/2=2,5$ $5/0,5 = 10$	2,4	4
$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$	$7,7 \cdot 10^{-10}$		9,43	5,7
Монокристалл				
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	$2,1 \cdot 10^{-8}$	1	1	-
$\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$1,18 \cdot 10^{-8}$	$5/3 = 1,66$	1,76	6,0
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$8,8 \cdot 10^{-9}$	$5/2 = 2,5$	2,38	4,8
$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$	$2,25 \cdot 10^{-9}$	$5/0,5 = 10$	9,55	4,5

Величины j_m максимума 3 (рисунки 2, 3) для различных кристаллогидратов линейно связаны между собой, поэтому необходимо определить корреляцию этих величин.

Коэффициент корреляции определялся по формуле (3) [10], где x_i, y_i – текущие значения, \bar{x}, \bar{y} – средние значения, N – количество измерений. Количество измерений N подбиралось так, чтобы вероятность корреляции двух некоррелированных величин с $r > 0,8$ была порядка 5%. Для $N=8$ она составляет 2-5%. Для примера рассмотрим пару кристаллов: $y = j_{\text{эт}}$ ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$),

$x = j_x$ ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Все данные для расчета сведены в таблицу 3.

Значение коэффициента корреляции r по формуле (3) для нескольких пар кристаллов, который оказался равен 0,81.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - N \bar{x} \bar{y}}{\left[\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - N \bar{x}^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - N \bar{y}^2 \right) \right]^{1/2}} \quad (3)$$

Таблица 3 – Расчет коэффициента корреляции для пары $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ - $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

№	$x_i \cdot 10^{-8}, \text{A/M}^2$	$y_i \cdot 10^{-8}, \text{A/M}^2$	$x_i^2 \cdot 10^{-16}$	$y_i^2 \cdot 10^{-16}$	$x_i y_i \cdot 10^{-16}$
1	0,90	2,46	0,81	6,05	2,214
2	0,92	2,53	0,846	6,40	2,328
3	0,96	2,50	0,925	6,25	2,405
4	0,85	3,01	0,722	9,0	2,550
5	1,15	2,30	1,322	5,29	2,645
6	0,99	2,28	0,98	5,19	2,258
7	1,05	2,16	1,102	4,666	2,268
8	0,93	2,56	0,864	6,55	2,381

Разработанная диагностика структуры кристаллических материалов проще и дешевле

известных рентгенофазовых и химических методов анализа, является экологически безопасным

и позволяет решить одну из проблем определения структуры кристаллических материалов. Поэтому предлагаемая диагностика особенно важна в областях с высокой температурой и влажностью при транспортировке кристаллических материалов.

3. Заключение

Предлагаемая термоактивационная диагностика структуры кристаллических материалов может быть использована и для других классов кристаллогидратов (карбонатов, хлоритов, нитратов, фосфатов и др.). Этот способ может быть применен для анализа состава химических грузов по прибытию в порт назначения. При большой влажности или высокой температуре при перевозке кристаллических материалов количество молекул кристаллизационной воды в формульной единице может измениться, в результате чего ценность груза значительно снизится. Условия транспортировки сильно влияют на свойства упомянутых выше кристаллов гипса и медного купороса. После анализа выдаются рекомендации при какой температуре необходимо прогреть данный материал, чтобы восстановить его химическую формулу.

Разработанная диагностика для исследования структуры кристаллов и анализа состава химических грузов в процессе их транспортировки проще и дешевле известных рентгенофазовых и химических методов анализа, является экологически безопасной.

Литература

1. Ryzhkin M. I. Proton Conductivity of Water in Mesoporous Materials / M. I. Ryzhkin, I. A. Ryzhkin, A. M. Kashin, E. A. Galitskaya, V. V. Sinitsyn // JETP Letters. – 2018. – Vol. 108. – № 9. – P. 627–632.
2. Timokhin V.M. Peculiarities of the proton transport in widezone crystals / V.M. Timokhin//Applied physics. – 2012. – №1. – С.12–19
3. Timokhin V.M. The mechanism of dielectric relaxation and proton conductivity in α -LiIO₃ nanostructure / V.M. Timokhin// Russian Physics Journal. –2009– V.52.–№ 3. – P. 269-274. New York, USA, Springer New York Consultants Bureau.
4. Пат. 2348045 (РФ). Многофункциональное устройство для исследования физико-технических характеристик полупроводников, диэлектриков и электроизоляционных материалов / В.М. Тимохин. Оpubл. 7.02.2009. –Бюл. № 6.
5. Гороховатский Ю.А. Основы термодеполяризационного анализа / Ю.А. Гороховатский – М.: Наука, 1981. –173 с.

6. Пат. 2478199(РФ). Способ определения концентрации и вида релаксаторов в кристаллических материалах /В.М. Тимохин. Оpubл.– 27.03.2013. Бюл. № 9.
7. Тимохин В.М. Технологии и методы исследования и диагностики кристаллических и электроизоляционных материалов /В.М. Тимохин. – Новороссийск: РИО ФГОУ ВПО «МГА им. адмирала Ф.Ф. Ушакова», 2008. – 88 с.
8. Timokhin V.M. Technology of thermally stimulated diagnostics of anisotropy and optical axes in crystals/V.M.Timokhin, V.M. Garmash, V.A. Tedzhetov// Modern Electronic Materials.– 2020.– 6(4).–P.125–132.DOI 10.3897/j.moem.6.4.65351.
9. ArmelLeBail. Курс лекций по рентгеноструктурному анализу, руководство по пользованию SDPD-D (база данных по определению структуры из данных дифракции). <http://www.ccp14.ac.uk/ccp/web-mirrors/armel/tutorials.html>.
10. Румер Ю.Б. Термодинамика, статистическая физика и кинематика / Ю.Б. Румер, М.Ш. Рыбкин. – М.: Наука. – 1977. – С.552.

References

1. Ryzhkin M. I. Proton Conductivity of Water in Mesoporous Materials / M. I. Ryzhkin, I. A. Ryzhkin, A. M. Kashin, E. A. Galitskaya, V. V. Sinitsyn // JETP Letters.2018. Vol. 108.№. 9, P. 627–632.
2. Timokhin V.M. Peculiarities of the proton transport in widezone crystals / V.M. Timokhin//Applied physics.2012.№1.P.12–19.
3. Timokhin V.M. The mechanism of dielectric relaxation and proton conductivity in α -LiIO₃ nanostructure / V.M. Timokhin// Russian Physics Journal.2009. V.52.№. 3.P. 269-274. New York, USA, Springer New York Consultants Bureau.
4. Pat. 2348045 (RF). Multifunctional device for the study of physical and technical characteristics of semiconductors, dielectrics and electrical insulating materials / V.M. Timokhin. Publ. 7.02.2009. Byul. №. 6.
5. Gorokhovatsky Yu.A. Fundamentals of thermodepolarization analysis / Yu.A. Gorokhovatsky - M.: Nauka, 1981.173 p.
6. Pat. 2478199 (RF). Method for determining the concentration and type of relaxants in crystalline materials / V.M. Timokhin. Publ. 27.03.2013. Byul. №. 9.
7. Timokhin V.M. Technologies and methods of research and diagnostics of crystalline and electrical insulating materials (monograph) / V.M. Timokhin. Novorossiysk: RIO FGOU VPO "Admiral F.F. Ushakov Moscow State University". 2008. 88 p.
8. Timokhin V.M. Technology of thermally stimulated diagnostics of anisotropy and optical axes in crystals/ V.M.Timokhin, V.M. Garmash, V.A. Tedzhetov// Modern Electronic Materials.2020. 6(4). P.125–132. DOI 10.3897/j.moem.6.4.65351.

9. ArmelLeBail. Курс лекций по рентгеноструктурному анализу, руководство по пользованию SDPD-D (база данных по определению структуры из данных дифракции).

<http://www.ccp14.ac.uk/ccp/web-mirrors/armel/tutorials.html>.

10. Rumer Yu.B. Thermodynamics, statistical physics and kinematics / Yu.B. Rumer, M.Sh. Rybkin. M.: Nauka. 1977. P.552.

УДК 534.2

DOI: 10.34046/aumsuomt102/23

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ШУМА ВИНТОВ МАЛОГО МАСШТАБА

В.В. Руденко, научный сотрудник кафедры аэрогидродинамики (Украина)

И.П. Бойчук, кандидат технических наук, доцент

А.В. Гринек, канд. техн. наук, доцент

В работе показаны результаты экспериментального исследования шума винтов, выполненных в шумозаглушенной камере. Винты дизайна F7/A7, напечатанные на 3D принтере, исследовались на частоте вращения до 10000 об/мин. Диаметр модельных винтов выбирался до 0.16 м. Регистрация шума изолированных винтов показала наличие тональной и широкополосной составляющей шума. В шуме соосных противовращающихся винтов доминирует широкополосная составляющая. Определен вклад в широкополосный шум винтов шумовых характеристик бесколлекторных электродвигателей, которые используются в экспериментах.

Ключевые слова: акустические измерения дальнего поля, широкополосный шум

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE SMALL-SCALE ROTORS NOISE

V.V. Rudenko, I.P. Boychuk, A.V. Grinek

The paper shows the results of the experimental study of rotor noise. The research was performed in a noise-attenuated chamber. Rotors of F7/A7 design were printed on a 3D printer. The rotors were investigated at speeds up to 10000 rpm. The model rotors are up to 0.16 m in diameter. Noise registration of the isolated rotors showed the presence of a tonal and broadband noise component. Noise of coaxial counter-rotating open rotors is dominated by a broadband component. The contribution of the noise characteristics of commutatorless electric motors used in the experiments to the broadband noise of rotors is shown. The contribution of experimental commutatorless motors to the rotor noise characteristic is determined.

Key words: acoustic far-field measurements, broadband noise.

1. Introduction

В настоящее время важна проблема определения акустических нагрузок, возникающих при взлете и посадке транспортных средств, в частности винтовых самолетов и экранопланов. В этом плане важным вопросом является снижения акустического воздействия на окружающие объекты. Эта проблема связана с определением уровня широкополосного шума соосных воздушных винтов. Поскольку лопасти винта служат источником широкополосного шума, что создает неблагоприятное воздействие на природу и человека, то снижение акустических нагрузок является важной и актуальной научно-технической проблемой.

Винты современных авиационных двигателей, а особо винты открытого ротора, представляют собой сложный с точки зрения технологического процесса и требований к качеству изготовления объект. Разработка винтов связана с целым рядом вопросов: аэродинамикой и динамикой, конструкцией и технологией изготовления, контролем [1]. В то время как преимущество

пропульсивной эффективности противовращающегося открытого ротора над обычным турбовентиляторным двигателем неоспоримо, из-за проблемы с установкой и шумом открытые роторы не нашли коммерческого применения [2, 3]. Возможно, наиболее неприятной проблемой является шум взаимодействия, вызванный богатым тональным содержанием противовращающихся винтов.

Экспериментальные испытания винтов ограничены определенными параметрами: сложностью и дороговизной современного экспериментального оборудования, а также сложностью производства винтов. С созданием оборудования и развитием методов трехмерной печати появилась возможность изготовления сложных, мелко-масштабных объектов с высоким разрешением. Это ведет к снижению затрат на производство экспериментальных моделей винтов.

В настоящей работе представлен опыт экспериментального исследования шума винтов малых масштабов.