

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВАКУУМА В ПРИБОРАХ С ВНУТРЕННИМИ КЛЕЕВЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ

В.А.Матвеев¹, М.А. Басараб¹, В.А. Крейсберг²,
Б.С. Лунин², Р.А. Захарян³

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: v.a.matveev@bmstu.ru

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация
e-mail: lbs@kge.msu.ru

³Тарусский филиал института общей физики РАН, г. Таруса,
Калужская обл., Российская Федерация
e-mail: razleib@yandex.ru

Одной из основных задач при проектировании электронно-микромеханических приборов, с учетом их малых массогабаритных характеристик и малых зазоров между механическими частями, является обеспечение высокого вакуума в корпусе. Остаточный газ вызывает, в частности, дополнительное демпфирование колебаний резонаторов вибрационных гироскопов и существенно влияет на их характеристики. Производство электронно-микромеханических приборов может быть существенно упрощено, если для соединения деталей из разнородных металлических и неметаллических материалов использовать клей, который надежно соединяет детали и обеспечивает равномерное распределение механических напряжений на участке склейки. Основным недостатком клеевых соединений является выделение летучих компонентов в вакууме, приводящее к ухудшению характеристик вакуумного прибора. В связи с этим низкое газоотделение является одним из основных технологических требований, предъявляемым к клею. Исследовано выделение газа из отвержденного эпоксидного клея ЕРО-ТЕК Н74UNF. Дегазирование и обезгаживание в вакууме при повышенной температуре уменьшает удельную скорость газовой выделению на несколько порядков. Разработана модель газовой выделению из этого клея газа с учетом обезгаживания. Обезгаживание клеевых швов и применение газопоглотителей (геттеров) позволяет создавать вакуумные приборы с внутренними клеевыми соединениями с давлением остаточных газов не выше 10^{-4} Па.

Ключевые слова: вакуумные приборы, вакуум, газовой выделение, обезгаживание, клеевое соединение.

VACUUM PROVIDING IN DEVICES WITH INTERNAL ADHESIVE JOINTS

V.A. Matveev¹, M.A. Basarab¹, V.A. Kreisberg²,
B.S. Lunin², R.A. Zakharyan³

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: v.a.matveev@bmstu.ru

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation
e-mail: lbs@kge.msu.ru

³Tarusa Branch of General Physics Institute of RAS,
Tarusa, Kaluga region, Russian Federation.
e-mail: razleib@yandex.ru

One of the main objectives during the design of electro-micromechanical devices, given their small weight and size characteristics and small gaps between mechanical

parts, is to ensure a high vacuum in the housing. The residual gas causes, in particular, an additional vibration damping of vibrating gyroscopes resonators and significantly affects their performance data. Manufacture of micromechanical devices can be significantly simplified by using glue to connect disparate parts of metallic and nonmetallic materials. Glue securely connects the parts and provides uniform distribution of stress on seams. The main disadvantage of the adhesive joints is the emission of volatile components in vacuum, leading to deterioration of the characteristics of the vacuum unit. In this regard, small outgassing is one of the main technological requirements imposed on the glue. In this work, outgassing from the cured epoxy adhesive EPO-TEK H74UNF is investigated. Degassing in vacuum at high temperatures reduces the outgassing specific rate by some orders of magnitude. Based on these results a model of the outgassing of this glue is considered. Degassing of adhesive joints and the use of gas absorbent (getters) allows creating vacuum devices with internal glue joints whose residual gas pressure is equal to or less than 10^{-4} Pa.

Keywords: vacuum devices, vacuum, outgassing, degassing, adhesive joint.

Широкое развитие получает применение электронно-механических вакуумных приборов (ЭМП) в качестве акселерометров, датчиков угловых ускорений, угловых перемещений, датчиков давления и др. Функционирование этих приборов связано с особенностями колебаний масс на упругих элементах и резонаторов различных типов. В зависимости от конструкции и характеристик ЭМП давление остаточного газа в его корпусе должно быть на уровне $1 \dots 10^{-4}$ Па. При производстве ЭМП необходимо соединять детали из различных металлических и неметаллических материалов: сталь, инвар, стекло, кристаллы, изоляционные материалы и др. Применение клея для сборки существенно упрощает и удешевляет сборочный процесс. Клей позволяет надежно соединять детали из разнородных материалов, исключая риск их механического или термического повреждения, и обеспечивая равномерное распределение механических напряжений на участке склейки.

Основным недостатком клеевых соединений является выделение летучих компонент в вакууме, приводящее к ухудшению характеристик вакуумного прибора. В связи с этим низкое газоотделение является одним из основных технологических требований, предъявляемых к клею.

Хотя сегодня в мире выпускается много разных клеев с низким газоотделением (например, база данных NASA содержит перечень клеев с низким газовыделением, насчитывающий свыше 1000 наименований [1]), выбор подходящего клея затруднен тем, что фирмы-производители не указывают состав и скорости удельного газовыделения летучих соединений. В большинстве опубликованных работ данные по газовыделению носят качественный характер, выполнены разными методами и не позволяют прогнозировать параметры газовой среды ЭМП в течение срока его службы [2–5]. В работе [6] предложена масс-спектрометрическая методика определения удельной скорости

выделения летучих компонентов из клеев и приведены данные, характеризующие ряд отечественных термостойких клеевых систем. Оценки [6] показывают, что газовыделение из клеевых швов сильно ухудшает вакуум внутри прибора. В табл. 1 в качестве примера приведен состав внутренней атмосферы ЭМП, содержащего соединения, выполненные клеями К-400 и ВК-21Н, через 10 лет хранения/эксплуатации прибора при комнатной температуре. В расчете внутренний объем прибора принят равным 100 см^3 , а площадь клеевых швов — 1 мм^2 .

Таблица 1

Внутренняя атмосфера вакуумного прибора после хранения в течение 10 лет

Летучий компонент	Парциальное давление летучего компонента, Па	
	Клей К-400	Клей ВК-21Н
H_2O	440	285
C_xH_y	145	0,5
CH_3OH	2,8	—
H_2	5,4	0,1
HCl	14,2	0,005
CO	—	0,2
CO_2	—	0,35
O_2	—	0,015
HF	—	0,005

Из табл. 1 следует, что основной летучей примесью клеев является водяной пар. Устанавливая в вакуумный прибор геттер, можно удалить все выделившиеся газовые компоненты за исключением углеводородов C_xH_y [7]. В этом случае именно они и образуют атмосферу в отпаянном вакуумном приборе, и даже при применении неорганического клея ВК-21Н парциальное давление углеводородов достаточно велико.

Отметим, что клеи отверждались [6] в соответствии с рекомендациями паспорта предприятия-изготовителя. Такой режим гарантирует определенную механическую прочность соединения, но не минимальное газовыделение. Проводя дополнительное обезгаживание клеевых швов, можно значительно уменьшить выход летучих примесей. Эта задача решается путем эмпирического подбора условий обезгаживания. Однако отсутствие количественной оценки кинетики десорбции летучих примесей при разных температурах затрудняет определение режимов рационального обезгаживания и требует построения модели газовыделения из клея.

Цель настоящей работы состоит в экспериментальном исследовании газовыделения в вакууме из широко используемого эпоксидного

клея ЕРО-ТЕК Н74UNF (ЕрохуTechnology, США) [8] и построения модели газовой выделения из этого отвержденного клея с учетом его обезгаживания. Этот клей имеет высокую термоустойчивость (кратковременно $+350^{\circ}\text{C}$), очень низкую температурную потерю массы (0,03 %), не содержит наполнителя и применяется для склейки оптических и электронных компонент.

В эксперименте исследовалось газыделение из клеевых образцов ЕРО-ТЕК Н74UNF по методике, приведенной в работе [6]. Для получения большой поверхности клей наносился на внутреннюю поверхность стеклянных трубок внутренним диаметром 6,7 мм, длиной 6,9 см; число трубок в одном клеевом образце составляло 17. Клей отверждался при температуре 150°C в течение 2 ч (этот режим рекомендован фирмой-изготовителем). Затем клеевой образец помещался в специальную ампулу, которая подсоединялась к масс-спектрометру МИ-1311 с безмасляной системой вакуумирования. Определение удельной скорости газыделения проводилось методом кинетической термодесорбционной масс-спектрометрии, который широко применяется для количественного изучения газыделения из твердых тел [9]. Поскольку газыделение из клея при комнатной температуре мало, то процедура измерения включала количественный анализ летучих соединений, выделившихся из клея в вакуум при ступенчатом прогреве клеевого образца последовательно до температур 150, 110 и 80°C . Длительность каждой ступени нагрева составляла 60 мин. На каждой ступени при непрерывной откачке ампулы измерялся поток выделяющихся продуктов с M/Z от 2 до 220. Число летучих примесей определялось интегрированием кинетических зависимостей интенсивности ионного тока для каждой примеси с использованием экспериментально определенных калибровочных коэффициентов. Фон масс-спектрометра учитывался в виде поправок, определенных измерением газового потока из ампулы с трубками без клея. В эксперименте определяли следующие летучие примеси: H_2O , CO_2 , CO , H_2 , O_2 , HF , C_xH_y . По скорости газыделения при температурах 150, 110 и 80°C по формуле Аррениуса вычислялась энергия активации процесса выделения газа для каждого летучего компонента, а затем рассчитывалась удельная скорость газыделения, соответствующая $T_k = 298\text{ K}$. Результаты этого эксперимента приведены в табл. 2.

Для исследования влияния обезгаживания на газыделение после сушки клея проводилась термообработка клеевых образцов в вакууме (10^{-1} Па) при различных условиях, а затем измерялось удельное газыделение с поверхности клеевого образца (см. табл. 2).

Из приведенных в табл. 2 данных следует, что обезгаживание очень эффективно (на несколько порядков) уменьшает газыделение. Количественно этот процесс можно описать, представляя нанесенный слой

Энергия активации процесса газовой выделения и удельная скорость выделения летучих компонентов из клея H74UNF при разных режимах обезгаживания для $T_k = 298 \text{ K}$

Режим обезгаживания	Температура, °C	Летучая примесь										Всего						
		H ₂ O	CO ₂	CO	C _x H _y	H ₂	O ₂	HF	Удельная скорость газовой выделения, ν , Па·м/с									
Обезгаживание не проводилось	150	1,1e-3	1,8e-4	3e-4	2,3e-4	5,3e-5	5e-6	1,8e-7	1,9e-3									
	80	1e-4	4,9e-6	8,7e-6	1,7e-5	8,7e-6	3,4e-8	5,4e-8	1,4e-4									
	25	6,9e-6	8,9e-8	1,7e-7	1e-6	1,2e-6	1,3e-10	1,4e-8	9,4e-6									
1 сутки при 150 °C	150	8,8e-5	3,1e-6	1,6e-5	2,1e-5	2,9e-6	0	0	1,3e-4									
	110	7,8e-6	2,3e-7	5e-7	8,9e-7	3,9e-7	0	0	9,8e-6									
	25	3,7e-10	2,9e-13	1,4e-11	7,3e-11	9,1e-11	0	0	5,5e-10									
6 суток при 150 °C	150	2,2e-5	1,6e-6	3,3e-6	4,9e-6	4e-7	0	0	3,2e-5									
	110	2,9e-6	2,4e-8	0	9,7e-8	0	0	0	3e-6									
	25	9e-11	1,4e-13	0	1,7e-10	0	0	0	2,6e-10									
6 суток при 200 °C	150	5,8e-6	7,3e-7	7,5e-7	8,4e-7	7,9e-8	0	0	8,2e-6									
	110	4,1e-7	5,4e-9	0	9,7e-8	7,8e-8	0	0	5,9e-7									
	25	2,4e-11	6,6e-14	0	3e-11	2,5e-12	0	0	5,7e-11									
Энергия активации, E, кДж/моль		42,5	63,3	63,4	45,5	31,9	88,7	21,3										

клея как тонкую пластину с односторонней диффузией. В этом случае диффузионный процесс описывается выражением [10]

$$\left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_{x=l} = -\frac{2c_0}{l} \sum_{n=0}^{\infty} \exp \left[-\frac{D(2n+1)^2 \pi^2 t}{4l^2} \right], \quad (1)$$

где l — толщина клеевого слоя, c_0 и c — начальная и текущая концентрации диффундирующего компонента; D — коэффициент диффузии, который может быть представлен в аррениусовской форме:

$$D = D_0 \exp \left(-\frac{E}{RT} \right). \quad (2)$$

Тогда, согласно первому закону Фика, удельная скорость газовой выделенной с размерностью Па·м/с может быть определена по формуле

$$\nu = \frac{2c_0 D R T}{l} \sum_{n=0}^{\infty} \exp \left[-\frac{D(2n+1)^2 \pi^2 t}{4l^2} \right]. \quad (3)$$

Из (3) следует, что начальная скорость газовой выделенной пропорциональна коэффициенту диффузии, а уменьшение скорости выделения газа со временем зависит от произведения Dt . Одно и то же остаточное газовой выделенной может быть получено выдержкой в вакууме как при комнатной температуре в течение длительного времени t , так и после вакуумной термообработки при температуре T в течение значительно меньшего времени τ . Эти времена связаны соотношением

$$t = \frac{D_T \tau}{D_{T_k}}, \quad (4)$$

где D_T и D_{T_k} — значение коэффициента диффузии для температуры обезгаживания T и $T_k = 298$ К соответственно.

Кинетика остаточного газовой выделенной при T_k после завершения процесса обезгаживания, проведенного при температуре T в течение времени τ , определяется выражением

$$\nu = \frac{2c_0 R T_k D_{T_k}}{l} \sum_{n=0}^{\infty} \exp \left[-\frac{D_{T_k} (2n+1)^2 \pi^2 \left(\frac{D_T}{D_{T_k}} \tau + t \right)}{4l^2} \right]. \quad (5)$$

С учетом (2) выражение (5) принимает вид

$$\nu = \frac{2c_0 R T_k D_0 \exp \left(\frac{-E}{R T_k} \right)}{l} \times$$

$$\times \sum_{n=0}^{\infty} \exp \left[- \frac{D_0 \exp \left(\frac{-E}{RT_k} \right) (2n+1)^2 \pi^2 \left(\tau \exp \left(\frac{E}{RT_k} - \frac{E}{RT} \right) + t \right)}{4l^2} \right]. \quad (6)$$

Для расчета режима обезгаживания необходимо знать для каждого компонента температурную зависимость коэффициента диффузии в виде (2). Для определения этих параметров воспользуемся полученными экспериментальными данными. Рассмотрим эту процедуру на примере коэффициента диффузии углеводородов, выделяющихся при обезгаживании клея Н74UNF.

Сравним скорости газовой выделения C_xH_y , измеренные при 150°C после обезгаживания в течение $\tau_1 = 1$ (ν_1) и $\tau_2 = 6$ суток (ν_2) при той же температуре. Из табл. 2 следует: $\nu_2/\nu_1 = 0,233$. Соотношение этих скоростей может быть записано в виде

$$\frac{\nu_2}{\nu_1} = \frac{\sum_{n=0}^{10} \exp \left[- \frac{D_{150}(2n+1)^2 \pi^2 \tau_2}{4l^2} \right]}{\sum_{n=0}^{10} \exp \left[- \frac{D_{150}(2n+1)^2 \pi^2 \tau_1}{4l^2} \right]}. \quad (7)$$

Для решения (7) необходимо знать толщину клеевого слоя. Ее находим из геометрических параметров клеевого образца (площадь поверхности клея $S = 185 \text{ см}^2$), массы клея ($M = 1 \text{ г}$) и плотности клея ($\rho = 1,4 \text{ г/см}^3$):

$$l = \frac{M}{\rho S}. \quad (8)$$

При принятых значениях параметров $l = 0,04 \text{ мм}$.

Ограничиваясь первыми 10 членами в рядах (7) и решая это выражение относительно D_{150} , получаем значение коэффициента диффузии углеводородов при 150°C : $D_{150} = 2 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2/\text{с}$. Согласно (5) температурная зависимость скорости газовой выделения определяется энергией активации коэффициента диффузии. Для углеводородов в клее Н74UNF $E = 45,5 \text{ кДж/моль}$ (см. табл. 2). Отсюда получаем выражение для коэффициента диффузии углеводородов в клее Н74UNF в аррениусовой форме:

$$D = 8,4 \cdot 10^{-10} \exp \left(\frac{-45500}{RT} \right).$$

Начальная концентрация c_0 определяется из (6) подстановкой параметров коэффициента диффузии и экспериментально найденной скорости газовой выделения для известного времени отжига. В рассматри-

ваемом примере начальная концентрация углеводородов составляет 78 моль/м³.

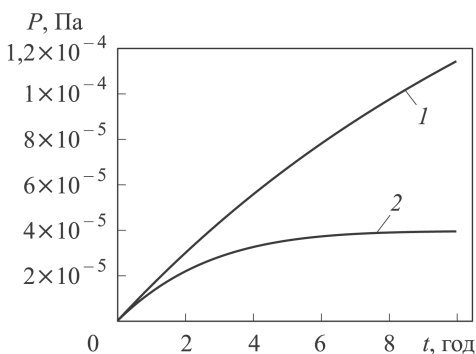
Знание этих величин позволяет определить созданное газовыделением при температуре T_k парциальное давление p_i i -го летучего компонента клея с площадью поверхности S за время t_0 в приборе объемом V .

$$p_i = \frac{2Sc_{0i}RT_k D_{0i} \exp\left(\frac{-E_i}{RT_k}\right)}{V} \times \int_0^{t_0} \left(\sum_{n=0}^{\infty} \exp\left[-\frac{D_{0i} \exp\left(\frac{-E_i}{RT_k}\right) (2n+1)^2 \pi^2 \left(\tau \exp\left(\frac{E_i}{RT_k} - \frac{E_i}{RT}\right) + t \right)}{4l^2} \right] \right) dt, \quad (9)$$

где D_{i0} и E_i — предэкспонента и энергия активации коэффициента диффузии для i -го летучего компонента, T и τ — температура и время обезгаживания, c_{0i} — начальная концентрация i -го летучего компонента.

В качестве примера на рисунке показан график изменения парциального давления углеводородов в вакуумном приборе объемом 100 см³, при его хранении/эксплуатации в течение 10 лет при различной толщине клеевых швов с площадью поверхности $S = 1$ мм².

Видно, что даже для толстых клеевых швов парциальное давление углеводородов через 10 лет не превысит 10^{-4} Па. Поскольку все другие газовые компоненты могут быть поглощены геттером, можно сделать вывод о возможности создания высоковакуумного прибора с внутренними клеевыми соединениями. Таким образом, газовая среда в отпаянном вакуумном приборе с внутренними клеевыми соединениями и встроенным геттером состоит из углеводородов. Дегазирование/обезгаживание в вакууме при повышенной температуре уменьшает выделение углеводородов из эпоксидного клея на несколько порядков,



Изменение парциального давления углеводородов в вакуумном приборе при его хранении/эксплуатации в течение 10 лет при различной толщине клеевых швов. Толщина клеевого шва: кривая 1 — 1 мм, кривая 2 — 0,04 мм

что позволяет создать высоковакуумный прибор с внутренними клеевыми соединениями с давлением внутри не выше 10^{-4} Па и сроком службы свыше 10 лет.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Outgassing Data for Selecting Spacecraft Materials*. URL:<http://outgassing.nasa.gov>.
2. *Adhesive Bonding* / Ed. L-H. Lee. NY: Plenum Press, 1991.
3. Gerlach A., Keller W., Schulz J., Schumacher K. Gas permeability of adhesives and their application for hermetic packaging of microcomponents // *Microsystem Technologies*. 2001. Vol. 7. P. 17–22.
4. Лукина Н.Ф., Петрова А.П. Свойства и применение клеев в приборной технике // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2005. № 11. С. 11–15.
5. Астахов П.А., Войтенко Л.И. Клеи и компаунды на основе модифицированных эпоксидных смол // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2005. № 2. С. 12–15.
6. Крейсберг В.А., Лунин Б.С., Захарян Р.А. Газовыделение в вакууме из некоторых термостойких клеев // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2013. № 11. С. 11–14.
7. Матвеев В.А., Лунин Б.С., Басараб М.А., Захарян Р.А. Газопоглотители для вибрационных гироскопов // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2013. № 2. С. 90–99.
8. Epoxy Technology Inc. URL: <http://www.epotek.com>.
9. Kreisberg V.A., Rakcheev V.P., Smith I.H. Degassing and water release peculiarities of float glasses // *Glass Technology*. 2002. Vol. 43. P. 321–325.
10. Crank J. *The mathematics of diffusion*. Oxford: Clarendon Press, 1956. 347 с.

REFERENCES

- [1] Outgassing Data for Selecting Spacecraft Materials. Available at: URL:<http://outgassing.nasa.gov> (accessed 13 December 2013).
- [2] *Adhesive Bonding* (Ed. L-H. Lee). NY: Plenum Press, 1991. 476 p.
- [3] Gerlach A., Keller W., Schulz J., Schumacher K. Gas permeability of adhesives and their application for hermetic packaging of microcomponents. *Microsystem Technologies*, 2001, vol. 7, pp. 17–22.
- [4] Lukina N.F., Petrova A.P. Properties and applications of adhesives in instrument engineering. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Adhesives. Sealants], 2005, no. 11, pp. 11–15 (in Russ.).
- [5] Astakhov P.A., Vojtenko L.I. Adhesives and compounds on basis of modified resins. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Adhesives. Sealants], 2005, no. 2, pp. 12–15 (in Russ.).
- [6] Kreysberg V.A., Lunin B.S., Zakharyan R.A. Gas release from some high-temperature adhesives in vacuum. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Adhesives. Sealants], 2013, no. 11, pp. 11–14 (in Russ.).
- [7] Matveev V.A., Lunin B.S., Basarab M.A., Zakharyan R.A. Gasabsorbers for vibrational gyroscopes. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2013, vol. 91, no. 2, pp. 90–99 (in Russ.).
- [8] Epoxy Technology Inc. Available at: URL: <http://www.epotek.com> (accessed 13 December 2013).
- [9] Kreisberg V.A., Rakcheev V.P., Smith I.H. Degassing and water release peculiarities of float glasses. *Glass Technology*, 2002, Vol. 43, pp. 321–325.
- [10] Crank J. *The mathematics of diffusion*. Oxford, Eng: Clarendon Press, 1956. 347 p.

Статья поступила в редакцию 21.02.2014

Валерий Александрович Матвеев — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой “Информационная безопасность”, руководитель НУК ИУ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ и 25 патентов в области приборостроения и высокотемпературной сверхпроводимости.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

V.A. Matveev — Dr. Sci. (Eng.), professor, head of “Information Security” department of the Bauman Moscow State Technical University, head of the Scientific and Educational Complex for Information and Control of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications and 25 patents in the field of instrument engineering and high-temperature superconductivity.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Борис Сергеевич Лунин — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Автор ряда научных работ в области технологии вибрационных гироскопов.

МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы.

B.S. Lunin — Dr. Sci. (Eng.), leading researcher of the Department of Chemistry of Lomonosov Moscow State University. The author of a number of papers on vibrating gyro technology.

Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russian Federation.

Михаил Алексеевич Басараб — д-р техн. наук, профессор кафедры “Информационная безопасность” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ и пяти монографий в области прикладной математики, информатики, цифровой обработки сигналов, радиофизики.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

M.A. Basarab — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Information Security” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications and five monographs in the field of applied mathematics, informatics, digital signal processing, gyroscope and radiophysics.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Роберт Артушевич Захарян — директор Тарусского филиала Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН. Автор ряда научных работ в области приборостроения и экологического мониторинга атмосферы.

Тарусский филиал Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Россия, 249100, Калужская обл., г. Таруса, ул. Энгельса, д. 6.

R.A. Zakharyan — director of the Tarusa Branch of the Prokhorov General Physics Institute of RAS. The author of a number of publications in the field of instrument engineering and ecological monitoring of atmosphere.

Tarusa Branch of the Prokhorov General Physics Institute, RAS, ul. Engelsa 6, Tarusa, Kaluga region, 249100 Russian Federation.

Валерий Абрамович Крейсберг — канд. хим. наук, старший научный сотрудник лаборатории катализа и газовой электрохимии кафедры физической химии МГУ им. М.В. Ломоносова. Специалист в области диффузионных процессов транспорта газов в твердом теле и кинетической термодесорбционной масс-спектрометрии.

Kreisberg V.A. — Cand. Sci. (Chem.), senior researcher of the Laboratory of “Catalysis and Electrical Chemistry” of the of “Physical Chemistry” department of the Lomonosov Moscow State University. Author of publications in the fields of diffusion processes of gas transport in solid bodies and kinetic thermodesorbtion mass spectroscopy.

Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russian Federation.