

UDC 006.91

DOI 10.52171/2076-0515_2024_16_04_96_102

About Quantum Metrology

K.A. Asgarov¹, E.R. Yuzbashov²

¹ Azerbaijan National Aviation Academy Scientific Production Union (Mardakan ave., 30, Baku, AZ1045, Azerbaijan)

² Institute of Physics of Science and Education Ministry of Azerbaijan (Huseyn Javid ave. 33, Baku, AZ1141, Azerbaijan)

For correspondence:

Asgarov Kamal / e-mail: kamal.asgarov@naa.edu.az

Abstract

Quantum metrology, being a branch of modern metrology, is a study that provides high-resolution and very sensitive measurement of physical parameters by explaining the properties of physical systems in terms of quantum theory. By developing new measurement methods, this field demonstrates higher accuracy than the same measurements performed in a classical framework.

Keywords: metrology, quantum metrology, modern measurement units, Josephson effect, quantum Hall effect.

Received 09.09.2024

Revised 13.12.2024

Accepted 16.12.2024

For citation:

K.A. Asgarov, E.R. Yuzbashov

[About Quantum Metrology]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2024, vol. 16, № 4, pp. 96-102 (in Azerbaijani)

Kvant metrologiyası haqqında

K.Ə. Əsgərov¹, E.R. Yüzbaşov²

¹Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyası Elmi İstehsalat Birliyi (Mərdəkan pr. 30, Bakı, AZ1045, Azərbaycan)

²AR ETN Fizika İnstitutu (Hüseyn Cavid küçəsi, 33, Bakı, AZ1141, Azərbaycan)

Xülasə

Kvant metrologiyası müasir metrologiyanın bir bölməsi olmaqla, fiziki sistemlərin xüsusiyyətlərini kvant nəzəriyyəsi baxımından izah etməklə fiziki parametrlərin yüksək ayırdetmə qabiliyyətli və çox həssas ölçülməsini təmin edən təlimdir. Bu sahə yeni ölçmə üsullarını inkişaf etdirməklə, klassik çərçivədə yerinə yetirilən eyni ölçmələrdən daha yüksək dəqiqlik nümayiş etdirir.

Açar sözlər: metrologiya, kvant metrologiyası, müasir ölçü vahidləri, Cozefson effekti, kvant Hall effekti.

О квантовой метрологии

К.А. Аскеров¹, Э.Р. Юзбашов²

¹Азербайджанская Национальная академия авиации (пр. Мардакан, 30, Баку, AZ1045, Азербайджан)

²Институт физики Министерства науки и образования Азербайджана (ул. Гусейна Джавида, 33, г. Баку, AZ1141, Азербайджан)

Аннотация

Квантовая метрология, являющаяся отраслью современной метрологии, представляет собой исследование, которое обеспечивает высокоточные и очень чувствительные измерения физических параметров путем объяснения свойств физических систем с точки зрения квантовой теории. Благодаря разработке новых методов измерения эта область демонстрирует более высокую точность, чем те же измерения, выполняемые в классической системе.

Ключевые слова: метрология, квантовая метрология, современные единицы измерения, Джозевсона эффект, квантовый эффект Холла.

Giriş

Metrologiya – ölçmələr, təmin etmə üsul və vasitələri, onların birliyi və tələb olunan dəqiqliyə nail olmaq yolları haqqında elmdir. Metrologiya elmi tələb olunan dəqiqliyi təmin edən ölçmələr və metroloji standartlar toplusudur [1].

Metrologiyanın əsas problemlərinə aşağıdakılar daxildir: ölçmələrin ümumi nəzəriyyəsi, kəmiyyətlərin vahidləri və onların sistemlərinin formalaşdırılması, ölçmə üsulları və metodları, ölçmələrin dəqiqliyinin təyini (ölçmə xətalari nəzəriyyəsi), ölçmələrin vəhdətinin və ölçü vasitələrinin metroloji yoxlanılmasının (kalibrənməsi) təmin edilməsinin əsasları, etalonların və nümunəvi ölçü vasitələrinin yaradılması, ölçü vahidlərinin etalonlardan nümunələrə və daha sonra işçi ölçü vasitələrinə köçürülməsi metodları.

Metrologiya üç bölmədən ibarətdir:

1. Nəzəri metrologiya – metrologiyanın fundamental əsaslarını işləyib hazırlayan metrologiya bölməsidir. 2. Hüquqi metrologiya – ölçmələrin vahidliyini və düzgünlüyünü təmin etməyə yönəlmiş fiziki kəmiyyət vahidlərinin, etalonların, metodların və ölçmə vasitələrinin istifadəsinə dair məcburi texniki və hüquqi tələblərin müəyyən edilməsindən ibarət olan metrologiyanın bir sahəsidir. 3. Praktiki (tətbiqi) metrologiya – metrologiyanın bir bölməsi olub, mövzusu nəzəri metrologiyanın inkişafının praktiki tətbiqi məsələləri və qanunvericilik aktlarının müddəalarıdır [1-3].

Ölkə və beynəlxalq səviyyədə ölçmə nəticələrinin müqayisəliyi və tanınması, ayrı-ayrı müəssisələrdə istehsal olunan hissələrin (detalların) və cihazların bir-birini qarşılıqlı əvəz edilə bilməsi, rabitə şəbəkələrinin fəaliyyəti və s. vahidlərin və ölçü şkalalarının unifikasiyası, onlardan istifadə qaydası olmadan mümkün deyil. Bu məsələlər beynəlxalq və öl-

kə səviyyəsində hüquqi metrologiyada öz həllini tapır.

Son onilliklərdə fundamental elmlər sahəsindəki nailiyyətlər, nanoelmlərin, nanotexnologiyaların, nanosənayenin inkişafına təkan verdi. Müasir dövrdə kosmik, aviasiya, mikroelektronika, hərbi-müdafiə sənayesinin tələbləri (çağırışları) metrologiyanın yeni sahələrinin inkişafına səbəb oldu. Artıq vahidlər sisteminin təkmilləşdirilməsinə, xarici təsirlərdən uzaq, stabil ölçü vahidlərindən istifadəyə ehtiyac duyuldu.

Kvant metrologiyası kvant hadisələrinə əsaslanan ölçmələr haqqında elmdir. Onun əsas problemi – fundamental sabitlər əsasında təbii fiziki vahidlər sistemlərinin qurulmasıdır. Kvant metrologiyasının əsas istiqamətləri: kvant etalonlarının (standartlarının) hazırlanması və tətbiqi; müxtəlif kvant effektləri əsasında yaradılan kvant etalonları ilə ölçmə vahidlər sistemləri arasında birqıymətli uyğunluğun əldə edilməsi; kvant etalonları və ənənəvi etalonlar arasında uyğunluğun təmin edilməsi; kvant etalonlarının xətalərinin, o cümlədən kvant xarakterli xətalərin (məsələn, qeyri-müəyyənlik prinsipi ilə bağlı) müəyyən edilməsi və öyrənilməsi; fundamental sabitlərin və onların kombinasiyalarının daha stabil və minimal xətalərlə təkrarlana bilən yeni kvant effektlərinin axtarışı; kvant hadisələri əsasında maksimal dəqiqliyə və minimal həssaslıq həddinə malik ölçmə metodikalarının işlənilib hazırlanması və s. əhatə edir [4].

Fiziki kəmiyyətlərin vahidlər sistemini yaradarkən, xarici şərtlərdən az asılı olan və mümkün qədər sabit olan təbii (fundamental) sabitlərə əsaslanan standartlardan istifadə olunmasına çalışırlar. 20-ci əsrin əvvəllərində alman fiziki M.Plank göstərdi ki, əsas vahidlər fundamental fiziki sabitlərdən – işıq sürəti c , Plank sabiti $\hbar$ və qravitasiya sabiti G -dan alın

bilər. Bu sabitlərin qiymətləri klassik və kvant elektrodinamikasının, eləcə də ümumi nisbilik nəzəriyyəsinin əsas tənliklərində fiziki kəmiyyətlərin əmsalları şəklində çıxış edir. Bu sabitləri bilməklə əsas vahidlər sistemindən uzunluq vahidini $l = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}}$ (SI vahidlər sistemində $1.616255(18) \times 10^{-35}$ m [5]); zaman vahidini $t = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^5}}$ (SI vahidlər sistemində $5.391247(60) \times 10^{-44}$ s [6]); kütlə vahidini $m = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$ (SI vahidlər sistemində $2.176434(24) \times 10^{-8}$ kg [7]) hesablamaq olar (Plank vahidlər sistemində analogi ifadələr Plank temperaturu, Plank enerjisi, Plank qüvvəsi və s. üçün də mövcuddur [8]).

Lakin Plank vahidləri praktikada istifadə olunan vahidlər sistemləri diapazonlarından çox uzaqda yerləşir. Bundan əlavə, qravitasiya sabitinin qiyməti hələ də kifayət qədər dəqiqliklə məlum deyil. Lakin Plank vahidlərinin əsas çatışmazlığı ondadır ki, onlar real fiziki obyektlər vasitəsilə alınır (təkrarlana) bilmir. Buna görə də Plank vahidləri metrologiyada hələ də istifadə edilmir.

İşin məqsədi və məsələnin qoyuluşu

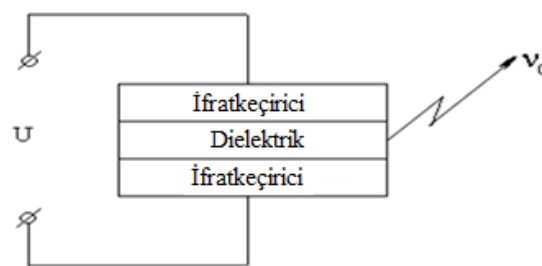
Kvant üsulları ilə aparılan ölçmələrin yüksək dəqiqliyi nanotexnologiyada materialların, strukturların, obyektlərin və digər məhsulların istehsalı üçün texnoloji proseslərin metroloji təminatına imkan verir. Öz növbəsində, xətti ölçüləri nanodiapazonda yerləşən obyektlərin parametrlərinin ölçülməsi üçün nəzəriyyə, metod və vasitələrin işlənilib hazırlanmasına nanometrologiya cavabdehdir. Məhz nanotexnologiyada belə bir tezis aktualdır: “Əgər düzgün ölçmək mümkün deyilsə, o zaman yenini yarada bilməzsən”. Nanotexnologiyada irəli keçmək istəyən bütün ölkələr

məhz bu sahədə metrologiyanın sürətli inkişafının zəruriliyini yaxşı başa düşürlər, çünki ölçmələrin dəqiqlik və etibarlılıq dərəcəsi onun inkişafına təkan verə bilən amildir [9]. Nanotexnologiyanın inkişafı ölçmə sistemləri üçün tələbləri sərtləşdirir, ölçmə xətalrı atomlararası məsafələrlə müqayisə edilə bilər ki, bu da tənzimləməni təmin etmək üçün artıq nanometr diapazonunda xətti ölçmələrin vahidliyini təmin etmək üçün ciddi yanaşma tələb edir.

Məsələnin həlli

Makroskopik kvant Coşefson, Hall, Meyssner, Mössbauer effektlərinin kəşfindən sonra təbii ölçülərin universal sisteminin yaradılmasının real imkanı yarandı.

Coşefson effektinə əsaslanan Volt etalonu (standartı). Coşefson effekti nazik dielektrik təbəqəsi ilə ayrılmış iki ifratkeçiricinin kontaktlarında baş verir (şək. 1.).



Şəkil 1 – Coşefson keçidinin (kontaktının) sxematik təsviri.

Figure 1 – Schematic representation of Josephson junction.

Məlum olduğu kimi, vakuumda elektronlar Kulon qanununa görə bir-birini itələyir. Bərk cisimdə elektronlardan əlavə müsbət yüklü qəfəs ionları da var. Onlar elektronları özlərinə cəlb edərək onların yüklərini sanki ekranlayırlar. Kifayət qədər aşağı temperaturda bəzi maddələrdə elektronların ümumi

qarşılıqlı təsiri onlar arasında zəif cazibə qüvvəsinin əmələ gəlməsinə səbəb ola bilər. Bu halda elektronlar Kuper cütləri adlanan sistem əmələ gətirir. Bu cür cütlər, fərdi elektronlardan fərqli olaraq, sıfır spinə malik olurlar (yəni, onlar artıq fermionlar deyil, Bose statistikasına tabe olan bozonlara çevrilirlər). Bu isə eyni kvant halında çoxlu sayda cütlərin toplanmasına imkan verir. Əgər Kuper cütlərinin orta sürəti sıfırdan fərqlidirsə, yəni sönməyən elektrik cərəyanı varsa, o zaman ifratkeçiricilik hadisəsinin baş verdiyini söyləyirlər.

Əgər Cozefson keçidinin hər iki tərəfinə U potensiallar fərqi tətbiq etsək, onda Kuper elektron cütü bir ifratkeçiricidən digərinə keçdikdə, onun malik olduğu $2eU$ enerji artıqlığı işıq kvantı – foton şəklində buraxılır (emissiya edilir). Bu kvantın ν_0 tezliyi enerjinin saxlanması qanunu ilə müəyyən edilir:

$$h\nu_0 = 2eU \quad (1)$$

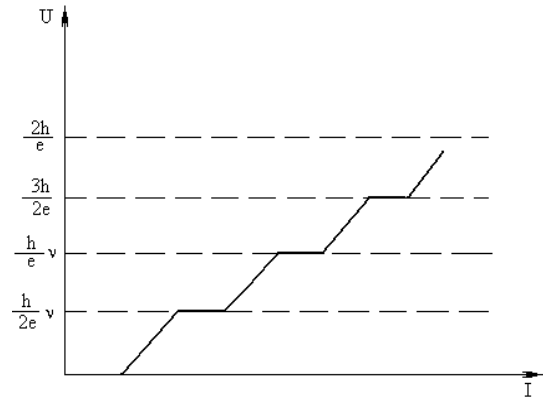
Bu fenomen qeyri-stasionar Cozefson effekti adlanır. Əksinə, Cozefson keçidini ν tezlikli elektromaqnit dalğası ilə şüalandırısaq, onda bu tezlik verilmiş U gərginliyi üçün xarakterik olan ν_0 tezliyi ilə üst-üstə düşəndə rezonans qarşılıqlı təsir baş verir. Bu cür rezonans $\nu_0 = \nu/n$ şərti ödənilirdiyi hallarda da baş verir; burada n istənilən tam ədəddir. Bunun nəticəsində bu keçidin volt-ampere xarakteristikasında (şək. 2.)

$$U = \frac{nh}{2e} \nu \quad (2)$$

ifadəsi ilə təyin olunan gərginliklərdə pilləkənvari (addımlar) şəklində xüsusiyyət yaranır.

Elektronun e yükü yuxarıda qeyd olunan h , c , γ kimi fundamental fiziki sabitdir. Maqnit axını kvantı adlandırılan $h/2e$ -in qiyməti h və e -nin ayrı-ayrılıqda götürülmüş qiymətlərindən daha böyük dəqiqliklə müəyyən edilir.

Tezlik, hal-hazırda, ən dəqiq ölçüləbilən kəmiyyət olduğundan, Cozefson effektindən alınan gərginliyin qiymətinin dəqiqliyi $h/2e$ kəmiyyətinin dəqiqliyi ilə məhdudlaşır. Volt vahidinin reproduksiyası vaxtı standart kənaraçıxma xətası hazırda $5 \cdot 10^{-9}$ tərtibindədir.



Şəkil 2 – Cozefson keçidinin volt-ampere xarakteristikası.

Figure 2 – Volt-ampere characteristic of Josephson junction.

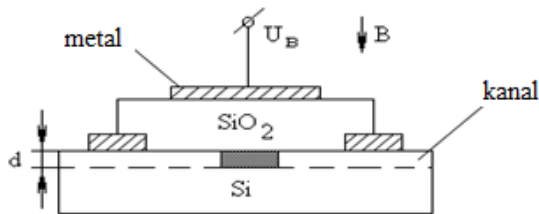
Cozefson effektinə əsasən, 1980-ci ilin əvvəlindən sənayesi inkişaf etmiş bütün ölkələrdə gərginlik vahidl *Volt* üçün etalonlar hazırlanmışdır. Etalona, adətən $8 \dots 10$ GHz tezliyində mikrodalğalı radiasiya ilə həyəcanlanan diskret Cozefson keçidi daxildir; bu halda alınan kvantlanmış gərginliyin qiyməti $4 \dots 10$ mV-a bərabər olur. Bu çox kiçik gərginliyi etalon kimi istifadə olunabilən *volt* səviyyəsinə yüksəltmək üçün müxtəlif konstruksiyalı gərginlik çeviriciləri və normal elementlərdən ibarət iri miqyaslı qurğulardan istifadə etmək dəqiqliyin itirilməsinə gətirib çıxarır. Ona görə də son zamanlar 1000-ə yaxın Cozefson keçidindən ibarət $1V$ və daha yüksək gərginlikləri birbaşa əldə etməyə imkan verən integral sxemlər yaradılmışdır. Cozefson effektinə əsaslanan *Volt* etalonlarının stabilliyi 10^{16} -a çata bilər.

Kvant Hall effektinə əsaslanan Om standartı (etalonu). Kvant Hall effekti 1980-ci ildə Von Klitzinq tərəfindən kəşf edilmişdir. Onun mahiyyəti ondan ibarətdir ki, metal-izolyator-yarımkeçirici tipli xüsusi strukturlarda (şək.3) maye helium temperaturunda və güclü maqnit sahəsində elektrik müqaviməti ciddi şəkildə sabit diskret qiymətlər alır.

$$R_H = \frac{h}{e^2 n} = \frac{\mu_0 c}{2n\alpha} \quad (3)$$

burada μ_0 – vakuumin maqnit nüfuzluğu, $\alpha = \frac{\mu_0 c e^2}{2h}$ – incə quruluş sabitidir.

Əgər metal lövhəyə müsbət U_B gərginliyi tətbiq edilərsə, onda silisium (Si) yarımkeçiricisindən elektronların bir hissəsi SiO_2 dielektrikinə sərhədinə çəkiləcək və bu sərhəddə nazik bir təbəqə şəklində lokallaşacaq (şək. 3-də punktir xəttlə göstərilib), çünki dielektrik elektronlar üçün keçilməzdir və metal lövhəyə verilmiş gərginlik isə onların yarımkeçiriciyə qayıtmasına imkan vermir.



Şəkil 3 – Metal-dielektrik-yarımkeçirici tipli Hall strukturu.

Figure 3 – Metal-dielectric-semiconductor type Hall structure.

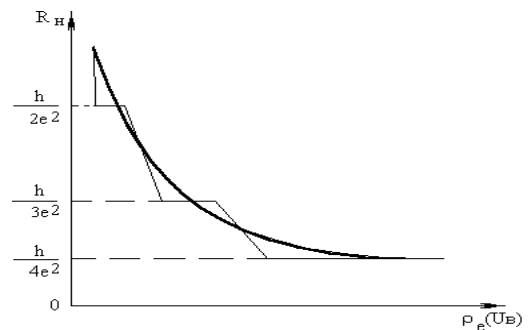
Kvant mexanikasına əsasən, d qalınlıqlı kanalda kilidlənmiş (lokallaşmış) elektronlar bu təbəqənin eninə boyunca hərəkətə uyğun gələn mümkün ən aşağı diskret enerji səviyyələrini tutacaq. Əgər elektrodlara düz istiqamətdə gərginlik tətbiq edilərsə, onda onlar arasında I cərəyanı axacaq və əgər əlavə olaraq, kanalın müstəvisinə perpendikulyar B maqnit sahəsi tətbiq edilərsə, B sahəsində

elektronların traektoriyaları əyiləcək və strukturun yan kənarlarında yükdaşıyıcılar yığılaraq, Hall kontaktları arasında potensial fərqi yaranacaq. Bu, klassik Hall effektidir və Hall müqaviməti $R_H = U_H/I$ düsturu ilə təyin edilir. Ümumi fizika kursunda göstərilirdi ki, R_H -in qiyməti kanaldakı elektronların ρ_e sıxlığı ilə tərs mütənasibdir (şək. 4).

Lakin maqnit sahəsində elektronların hərəkətinin kvant xarakterini nəzərə alanda fərqli vəziyyət yaranır. Kvant mexanikasına görə, təbəqə müstəvisində elektronların enerjisi yalnız diskret qiymətlər ala bilər.

Beləliklə, elektronun hərəkəti hər üç koordinat üzrə kvantlanmış olur. Bunun nəticəsində R_H -nin ρ_e elektron sıxlığından asılılığı qrafikində plato şəklində üfqi hissələr yaranır ki, bu da (3) düsturuna görə kvantlanmış qiymətlərə uyğun gəlir (şək.4). Praktikada ρ_e -nin qiyməti U_B -nin dəyişdirilməsi ilə tənzimlənir. Bu effekt kvant Hall effekti adlanır.

Əldə edilən eksperimental nəticələr müqavimətin belə təyin edilmə metodunun digərləri ilə müqayisədə daha üstün olduğunu göstərir. Kvant etalonundan istifadə edərək müqavimət vahidinin reproduksiyaının orta-kvadratik sapması $3 \cdot 10^{-7}$ istisna edilməyən sistemə xəta ilə $3 \cdot 10^{-8}$ -dən çox deyil.



Şəkil 4 – Hall müqavimətinin qatdakı elektron sıxlığından asılılığı.

Figure 4 – Dependence of the Hall resistance on the electron density in the layer.

Nəticə

Fundamental elmin sürətli inkişafı kvant effektləri əsasında yaradılmış etalonların (standartların) dəqiqliyi və etibarlılığı üzrə yüksək nəticələr əldə etməyə imkan vermişdir ki, bu da yaxın gələcəkdə yeni standartların yaradılması üçün möhkəm zəmin olacaqdır. Yeni metodların və ölçmə vasitələrinin köməyi ilə fundamental fiziki sabitlərin qiymətləri dəqiqləşdirilir, buna görə də kvant standartlarının dəqiqliyi getdikcə artacaq. Bu cür standartlar "əbədi ölçülər" hesab edilə bilər, çünki bu cür standartlarda fiziki kəmiyyət vahidlərinin reproduksiyası (təkrarlanma qabiliyyəti) xarici şəraitdən, coğrafi mövqedən

və zamandan asılı deyil. Belə olan halda hazırda dövlət standartlarına (etalonlarına) bağlı olan yoxlama və kalibrəmə sistemi də dəyişəcək, yəni onun qeyri-mərkəzləşdirilməsi baş verəcək ki, bu da əhəmiyyətli iqtisadi nəticələr verəcək. Yaxın gələcəkdə hüquqi metrologiyanın inkişaf perspektivləri, ilk növbədə yerli normativ sənədlərin beynəlxalq qaydalara uyğunlaşdırılması ilə müəyyən ediləcəkdir.

Maraqlar münaqişəsi

Müəlliflər bu məqalədə araşdırılması tələb olunan maraqlar münaqişəsinin olmadığını qeyd edirlər.

REFERENCES

1. **Əsgərov K.Ə.** Ümumi metrologiya və kalibrasiya nəzəriyyəsi. Monoqrafiya. – Bakı. - MAA. – 2024. *(in Azerbaijani)*
2. **Jamalov Y.T., Asgarov K.A.** Sovershenstvovanie raboty metrologicheskikh i kalibrovочnykh laboratorij // *Vestnik Azerbajdzhanskoj Inzhenernoj Akademii*, 2016, Tom 8, №.4, s.7-16. *(in Russian)*
3. **Jamalov Y.T., Asgarov K.A.** Konceptiya razvitiya optiko-elektronnykh priborov // *Vestnik Azerbajdzhanskoj Inzhenernoj Akademii*, 2017. T.9, №4, s. 86-92. *(in Russian)*
4. **Ernst O. Göbel, Uwe Siegner.** Quantum Metrology: Foundation of Units and Measurements. Wiley-VCH, 2015. *(in English)*
5. "2022 CODATA Value: Planck length". The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty. NIST. <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?plkl> *(in English)*
6. "2022 CODATA Value: Planck time". The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty. NIST. <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?plkt> *(in English)*
7. "2022 CODATA Value: Planck mass". The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty. NIST. <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?plkm> *(in English)*
8. **Tomilin K.A.** (1999). Natural Systems of Units. To the Centenary Anniversary of the Planck System. Proceedings of the XXII Workshop on High Energy Physics and Field Theory. pp. 287–296. *(in English)*
9. **Тодуа И.** Nanometrologiya i standartizaciya v nanotekhnologiyah. «*Nanoindustriya - nauchno-tekhnicheskij zhurnal*». Vypusk 5, (2010). *(in Russian)*