AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

MİKRO- VƏ NANOSTRUKTURLU POLİSİLOKSAN VƏ NEYLON TƏBƏQƏLƏR ƏSASINDA TRİBOELEKTRİK GENERATORLAR

İxtisas: 2222.01 – Nanoquruluşların fizikası və texnologiyası

Elm sahəsi: Fizika

İddiaçı: Orxan Güləhməd oğlu Güləhmədov

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün təqdim edilmiş dissertasiyanın

AVTOREFERATI

Dissertasiya işi Bakı Dövlət Universitetinin Tədqiqat, İnkişaf və İnnovasiyalar üzrə Mükəmməllik Mərkəzinin Nanoaraşdırmalar elmitədqiqat laboratoriyasında yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbərlər:

fizika elmləri doktoru, dosent
 Hüseyn Mikayıl oğlu Məmmədov

 tətbiq elmləri üzrə fəlsəfə doktoru Jiseok Kim

Rəsmi opponentlər:



 AMEA-nın müxbir üzvü, fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor Oktay Kazım oğlu Qasımov

 fizika elmləri doktoru, professor Cahangir İslam oğlu Hüseynov

fizika üzrə fəlsəfə doktoru
 Aidə Baba qızı Əhmədova

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının Bakı Dövlət Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən BFD 2.19 Dissertasiya şurası

Dissertasiya şurasının sədri:

fizika elmləri doktoru, dosent Hüseyn Mikayıl oğlu Məmmədov

Dissertasiya şurasının elmi katibi:

fizika üzrə fəlsəfə doktoru Sahla Nabi qızı Hacıyeva **BAKI DÖVLƏT UNİVERSITETİ** Elmi seminarın sədri: AMEA-nın həqiqi üzvi, fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor Cavad Sahvələd oğlu Abdinov Refere 20 25

İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi. Yaşıl enerji istehsalı bu gün bütün bəşəriyyət üçün ən aktual problemlərdən biri hesab olunur. Neft, qaz və digər ənənəvi mənbələr getdikcə öz aktuallığını itirir, bahalaşır və təbii ki, ətraf mühitə çox böyük ziyan vurur. Ona görə də ətraf mühit üçün təmiz və təhlükəsiz şəkildə istifadə oluna biləcək yaşıl enerji mənbələrindən – külək, günəş, su, biomexaniki enerji və s. maya dəyəri baxımından ucuz və texnoloji cəhətdən asan metodlarla elektrik enerjisinin generasiyası aktual məsələlərdən biri, bəlkə də ən əsası hesab olunur.

Bu baxımdan triboelektrik effektə əsaslanan generatorlar (triboelektrik nanogeneratorlar (TENG)) titrəmə, insan hərəkəti (addımlamaq, qaçmaq), su axını, hava axını və s. kimi yaşıl enerji mənbələrindən elektrik enerjisinin generasiya edilməsi istiqamətində perspektiv bir metod sayılır. TENG-lər maya dəyərinin ucuz başa gəlməsi, miniatürlüyü, çevikliyi, elastikliyi, baza materialı seçiminin müxtəlifliyi və s. kimi üstünlükləri ilə digər alternativlərindən fərqlənir.

Digər tərəfdən, hazırda daşına bilən miniatür elektron cihazlardan (təzyiq, temperatur, rütubətlilik və digər tipli sensorlar) daha çox istifadə onların müxtəlif təbii şəraitlərdə elektrik enerjisi ilə təmin olunmasını tələb edir. Bu mənada TENG-lər yaşıl enerji mənbələrindən elektrik enerjisini generasiya edərək çətin təbii şəraitlərdə bu cihazları rahat və təhlükəsiz şəkildə elektrik enerjisi ilə təmin etməyə imkan verir.

Bu səbəblərdən hazırda triboelektrik xassəli materiallar əsasında müxtəlif modifikasiyalı TENG-lərin yaradılması, çıxış parametrlərinin yaxşılaşdırılması və tətbiqi istiqamətində intensiv tədqiqatlar aparılır.

Təqdim olunan dissertasiya işində ilk dəfə olaraq polisiloksan (PS) və neylon materiallarının səthində mikro- və nanostrukturların, neylon / TiO₂ və neylon/Fe₃O₄ nanokompozitlərinin alınması yolu ilə hazırlanmış nazik təbəqəli TENG-lərin xassələrinin tədqiqi və optimal çıxış parametrlərinin əldə olunması üzrə aparılmış tədqiqatların nəticələri şərh olunmuşdur.

Tədqiqatın obyekti və predmeti. Neylon, PS, poliutretan, polivinilxlorid, TiO₂ və Fe₃O₄ əsaslı nanokompozit materiallar əsasında müxtəlif metodlarla (3D çap, damcı tökmə, sprey örtük və replika qəlibləmə) hazırlanmış TENG-lər tədqiqat obyekti kimi istifadə olunmuşdur. Alınma texnologiyası və materialların səthində formalaşdırılmış səth strukturlarının TENG-lərin fiziki xassələrinə təsirinin öyrənilməsi tədqiqatın əsas predmetini təşkil edir.

Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri. Dissertasiya işinin məqsədi müxtəlif alınma texnologiyalarından istifadə etməklə PS və neylon materiallarının səthində mikro- və nanostrukturlar formalaşdırmaq, strukturların quruluş və səthi morfologiyasını öyrənmək, strukturların TENG-in elektrik xassələrinə təsirini tədqiq etmək, strukturda müxtəlif metal oksid əsaslı nanokompozit materiallar sintez etmək, nanokompozitlərin TENG-in çıxış parametrlərinə təsiri mexanizmini müəyyən etmək, hazırlanmış nanogeneratorların tətbiq sahələrini müəyyənləşdirməkdir.

Məqsədə nail olmaq üçün aşağıdakı məsələlərin həlli qarşıya qoyulmuşdur:

–səth strukturuna malik olmayan neylon və PS təbəqələri əsasında TENG hazırlamaq və onların elektrik xassələrini tədqiq emək;

-neylon və PS əsasında çoxqatlı (oriqami) TENG hazırlamaq və onların çıxış parametrlərini müəyyən etmək;

-müxtəlif alınma texnologiyalarından (3D çap, damcı tökmə, sprey örtük və replika qəlibləmə) istifadə etməklə neylon və PS materiallarının səthində mikro- və nanostrukturlar yaratmaq, səth morfologiyasını tədqiq etmək və TENG-in çıxış parametrlərinə təsirini araşdırmaq;

-sprey örtük metodu ilə TiO₂ və Fe₃O₄ nanohissəcikləri əsasında nanokompozit materiallar sintez etmək, onların TENG-in çıxış parametrlərinə təsirini araşdırmaq;

-Külək enerjisi və insanların hərəkəti ilə bağlı olan biomexaniki enerjidən elektrik enerjisini generasiya edən TENG-lərin effektivliyinin artırılması üzrə tədqiqatlar aparmaq.

Tədqiqat metodları. Rentgen struktur analiz (RSA), skanedici elektron mikroskopiyası (SEM), morfoloji quruluşu və element tərkib analizi (EDS), elektrik və dielektrik xassələrinin ölçmə üsulları tətbiq olunmuşdur.

Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar:

1. Müxtəlif metodlarla (3D çap, damcı tökmə, sprey örtük və replika qəlibləmə) alınmış neylon, PS, PU və PVX nazik təbəqələri əsasında TENG hazırlamaq mümkündür.

2. Neylon və PS təbəqələrinin səth strukturları TENG-in çıxış parametrlərinə təsir edir.

3. Neylon təbəqələrdə liflərin diametrini dəyişməklə TENG-in çıxış parametrlərini idarə etmək mümkündür.

4. TENG-in effektivliyinin neylona daxil edilmiş TiO_2 və Fe_3O_4 nanohissəciklərinin miqdarından asılılığı ekstremum xarakterlidir.

5. PS təbəqələrin səthində 3D printer texnologiyasının köməyi ilə alınmış konusvari strukturların ölçülərinin kiçilməsi ilə TEG-in çıxış effektivliyi artır.

6. Neylon/Fe₃O₄ nanokompozit materialları əsasındakı TENG-in çıxış parametrlərinin yaxşılaşması Fe₃O₄-də kontakt elektriklənmə zamanı yaranan əlavə elektrik sahəsi ilə əlaqədardır.

7. Poliuretan, PS və neylon əsaslı oriqami strukturlu TENG-lər biomexaniki və külək enerjisi çeviriciləri kimi istifadə oluna bilər.

Tədqiqatın elmi yeniliyi:

1. Tədqiqat işində ilk dəfə olaraq PS və neylon təbəqələr hibrid material kimi istifadə olunmuş və müəyyən edilmişdir ki, PS təbəqələrinin səthində formalaşdırılan konusvari mikro teksturalar materialların bir-biri ilə aktiv təmas sahəsini və yekunda TENG-in çıxış gücünü artırır.

2. İlk dəfə olaraq PVX/TiO₂ və neylon/TiO₂ nanokompozit materiallar əsasında hazırlanmış TENG-də qısa qapanma cərəyanı və açıq dövrə gərginliyinin qiyməti TiO₂ nanohissəciklərinin miqdarından qeyri-monoton asılıdır və bu polyar yüklərin səthdə qeyri-bərabər paylanması ilə əlaqədardır.

3. Müəyyən olunmuşdur ki, lifli və ya şəbəkəli mikrostruktura malik neylon təbəqələr əsasında hazırlanmış TENG-lərdə liflərin diametrini dəyişməklə generatorun çıxış parametrlərini idarə etmək mümkündür.

4. İlk dəfə olaraq neylon/Fe₃O₄ nanokompozit materiallar əsasında hazırlanmış TENG-də çıxış gücünün artmasının Fe₃O₄-də kontakt elektriklənmə zamanı yaranan əlavə elektrik sahəsi ilə bağlı olduğu müəyyən edilmişdir.

5. Müxtəlif metodlarla hazırlanmış TENG-in çıxış gücü kontakt materiallarının fiziki parametrləri (dielektrik nüfuzluğu, maqnit

qavrayıcılığı) ilə bərabər, həcmində nanoklasterlərin və səthdə süni teksturaların formalaşdırılması ilə artırıla bilər.

Tədqiqatın nəzəri və praktiki əhəmiyyəti. Müxtəlif metodlarla hazırlanmış TEG-lərdə çıxış gücünün baza materiallarının fiziki parametrləri, eləcə də səth strukturların həndəsi forması, ölçüsü və konsentrasiyasından asılılığı kompozit materiallar əsasındakı cihazların, o cümlədən aşağı ölçülü sistemlər fizikasında alternativ təsdiqləyici model kimi istifadə oluna bilər. Hazırlanmış TEG-lər müxtəlif növ mexaniki enerji mənbələrindən elektrik enerjisinin təhlükəsiz generasiya edilməsində, portativ elektron cihazları – işıq diodu əsaslı şüalandırıcılar, bio- və termosensorlar, təzyiq qeydediciləri və s. üçün qidalandırıcı mənbə kimi istifadə edilə bilər.

Aprobasiyası və tətbiqi. Dissertasiya işinin əsas müddəaları və alınmış nəticələr respublika və beynəlxalq səviyyəli bir sıra elmi konfranslarda müzakirə olunmuş və onların materiallarında dərc edilmişdir:

-6th International Conference "Nanotechnology" (Georgia, Tbilisi, Georgian Technical University, 4-7 October, 2021);

-7th International Conference MTP-2021: Modern Trends In Physics (Azerbaijan, Baku, Baku State University, 15-17 December, 2021);

-Fizika və astronomiyanın problemləri XXI Respublika elmi konfransı (Azərbaycan, Bakı, Bakı Dövlət Universiteti, 21 may, 2021);

-2nd International Science and Engineering Conference (Azerbaijan, Baku, Baku Engineering University, 26-27 Novomber, 2021);

-VI International Scientific Conference of Young Researchers Dedicated to the 99th Anniversary of National Leader Heydar Aliyev (Azerbaijan, Baku, Baku Engineering University, 28-29 April, 2022);

-9th International Conference on Materials Science and Nanotechnology for Next Generation "MSNG-2022" (Türkiye, Ankara, Gazi University, 22-24 September, 2022);

-Nanoscience & Nanotechnology Conference (Italy, Rome, Laboratori Nazionali di Frascati, 29 May-1 June, 2023);

-10th International Conference on Materials Science and Nanotechnology for Next Generation, MSNG2023 (Türkiye, Kayseri, Erciyes University, 27-29 September 2023).

Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı. Dissertasiya işi Bakı Dövlət Universitetinin Tədqiqat, İnkişaf və İnnovasiyalar üzrə

Mükəmməllik Mərkəzinin Nanoaraşdırmalar ETL-də yerinə yetirilmişdir.

Dissertasiyanın struktur bölmələrinin ayrılıqda həcmi qeyd olunmaqla dissertasiyanın işarə ilə ümumi həcmi. Dissertasiya işi giriş, 4 (dörd) fəsil, nəticələr, işdə istinad olunmuş 181 adda mənbənin ədəbiyyat siyahısı, ixtisarların siyahısından ibarət olub, 94 şəkil və 2 cədvəl də daxil olmaqla ümumilikdə 195 səhifəni əhatə edir. Dissertasiyanın həcmi (mətndəki boşluqlar və şəkillər, cədvəllər, qrafiklər, əlavələr və ədəbiyyat siyahısı istisna edilməklə) – 220964 (o cümlədən, Giriş – 11395, I fəsil – 65827, II fəsil – 52132, III fəsil – 39349, IV fəsil – 50910, nəticə – 1351) işarədir.

İŞİN MƏZMUNU

Girişdə tədqiqat mövzusunun aktuallığı əsaslandırılmış, işin məqsədi, qarşıya qoyulan məqsədə çatmaq üçün həlli zəruri olan məsələlər, tədqiqat obyektləri, elmi yeniliyi, müdafiəyə təqdim olunan əsas elmi müddəalar göstərilmişdir. Bununla yanaşı, işin praktiki və elmi əhəmiyyəti, aprobasiyası, nəşrlər, dissertasiyanın quruluşu və həcmi haqqında məlumat və dissertasiyanın fəsillərinin qısa məzmunu şərh edilmişdir.

Birinci fəsildə TEG-lərin fiziki əsasları, işləmə rejimləri, nəzəri modeli və onun çıxış göstəricilərinə təsir edən parametrlər haqqında ədəbiyyat icmalı təqdim edilmişdir. Həmçinin, TEG-lərdə istifadə olunan materialların, xüsusilə polimer təbəqələrin perspektivləri haqqında geniş ədəbiyyat analizi aparılmışdır. Son olaraq triboelektrik xassəli materialların səthi strukturlarının yaradılması və onların TEG-in çıxış parametrlərinə təsiri, həmçinin, belə strukturların alınması, ölçülərinin və formalarının generatorun effektivliyinə təsiri araş-dırılmışdır. Belə səthi strukturların hazırlanması və əldə olunan TEG-lərin praktiki əhəmiyyəti müqayisəli şəkildə təhlil edilmişdir.

İkinci fəsil nazik triboelektrik xassəli təbəqələrin və onların səthində strukturların yaradılması üsullarına həsr olunmuşdur. Belə ki, nazik təbəqələrin alınmasında istifadə olunan üsulların hər birinin üstün və çatışmayan tərəfləri və onların işləmə mexanizmləri haqqında məlumatlar şərh edilmişdir. Həmçinin, səthi strukturların əldə olunmasında 3D çap texnologiyası, seçilmiş həllolma və səthi anodizasiya üsulları haqqında ətraflı şəkildə məlumat verilmişdir. Daha sonra nümunələrin struktur, morfoloji və stexiometrik analizinin aparılmasında istifadə olunan müasir tədqiqat üsulları haqqında məlumatlar bu fəsildə öz əksini tapmışdır. Son olaraq triboelektrik təbəqələrin dielektrik xassələrinin və ümumilikdə TEG-lərin çıxış parametrlərinin tədqiq olunmasında istifadə olunan üsulların mexanizmləri haqqında ətraflı məlumat verilmişdir.

Üçüncü fəsildə heç bir səthi struktura malik olmayan nazik neylon, PS, poliuretan təbəqələri və PVX/TiO₂ nanokompozitləri əsasında hazırlanan TENG-lərin çıxış parametrləri, oriqami strukturlu TEGlərin əldə etdiyi elektrik enerjisinin bir qatlı və üç qatlı TEG-lərlə müqayisəli şəkildə analizi aparılmışdır. Həmçinin, külək enerjisinin və insanların gündəlik həyatda mexaniki hərəkəti ilə bağlı olaraq yaranan biomexaniki enerjinin elektrik enerjisinə generasiyası, bu enerjinin hərəkət sürətindən və tezlikdən asılı olaraq dəyişməsinin fiziki əsasları araşdırılmışdır. Eləcə də, TEG-lərin gündəlik həyatda insanların sağlamlıq monitorinqinin aparılmasında öz-özünü enerji ilə təmin edən sensorlar kimi istifadəsi imkanları tədqiq olunmuşdur.

İlkin olaraq replika qəlibləmə və doktor bıçaq örtüyü üsullarından istifadə edərək adi və strukturlu PS və neylon təbəqələri əsasında TEGlər hazırlanmışdır. Hazırlanan TEG-lər üzərində elektrik ölçmələri (qısa qapanma cərəyan şiddəti, açıq dövrə gərginliyi) aparılmış və şəkil 1-də göstərilmişdir.



Şəkil 1. TEG üzərində elektrik ölçmələrinin aparılması. a) adi PS əsaslı TEG-in gərginlik-zaman qrafiki; b) adi PS əsaslı TEG-in cərəyan-zaman qrafiki; c) strukturlu PS əsaslı TEG-in gərginlik-zaman qrafiki; d) adi PS əsaslı TEG-in cərəyan-zaman qrafiki.

Aparılan elektrik ölçmələrindən məlum olmuşdur ki, adi PS əsaslı TEG-in gərginlik və cərəyan şiddətinin maksimal qiyməti uyğun olaraq 100 V və 0,16 mkA, strukturlu PS əsaslı TEG-in gərginlik və cərəyan şiddətinin maksimal qiyməti isə uyğun olaraq 120 V və 0,27 mkA kimi təyin edilmişdir. Adi PS ilə müqayisədə strukturlu PS nümunə əsaslı TEG-in gərginlik və cərəyan şiddətinin qiymətində olan bu artım səthdə yaradılmış teksturalar hesabına materiallardakı aktiv təmas sahəsinin – səthi yük sıxlığının artması ilə izah edilir. Belə ki, səthdə süni şəkildə yaradılan kələ-kötürlülük hesabına materialların bir-biri ilə aktiv təmas sahəsi çoxalır. Triboelektrik effektin yaranması üçün atom-elektronpotensial-quyu modelinə görə təbəqələrin təması atomar səviyyədə baş verir, aktiv təmas sahəsi artdıqda səthdə toplanmış statik yüklərin miqdarı artır. Materialın səthi yük sıxlığının artması paralel olaraq elekrodlarda yaranan potensiallar fərqinə müsbət təsir edir.

Hazırlanan TEG-in praktiki tətbiqinin yoxlanılması məqsədi ilə ardıcıl qoşulmuş 80 ədəd LED lampadan (mavi (3,0 V, 30-100 mA), yaşıl (2-2,4 V, 30-100 mA), qırmızı (1,8-2,2 V, 30-100 mA), ağ (5 V, 10 mkA)) ibarət elektrik dövrəsi qurulmuşdur. Strukturlu PS əsaslı TEG-dən əldə olunan yerdəyişmə cərəyanının düzləndirilməsi prosesi həyata keçirilmiş və şəkil 2-də göstərildiyi kimi lampaların işıqlandırılması baş vermişdir.





Külək enerjisinin elektrik enerjisinə generasiya olunmasında ilk

dəfə olaraq triboelektrik xassəli material kimi neylon və PS təbəqələrdən, metal elektrod kimi Al elektroddan istifadə olunaraq dirsəkli çarx əsasında fəaliyyət göstərən TEG-lər işlənib hazırlanmışdır.

PS nümunələrin əldə olunması üçün doktor bıçaq örtüyü üsulundan istifadə olunmuşdur. Aparılan tədqiqat işlərində alınan belə PS nümunələrin qalınlığı 90-120 mkm intervalında olmuşdur. Bu təcrübədə alınan PS nümunənin qalınlığı isə 106 mkm olaraq təyin edilmişdir. Küləyin hərəkəti ilə bağlı yaranan enerjini elektrik enerjisinə generasiya etmək üçün hazırlanmış TEG nümunəsi şəkil 3.a-da göstərildiyi kimi dirsəkli çarxın üzərinə yerləşdirilmişdir. Dirsəkli çarxın iş prinsipi dairəvi hərəkəti irəliləmə hərəkətinə çevirməkdən ibarətdir.

Hazırlanan TEG küləyin hərəkət tezliyinin hətta kiçik qiymətlərində belə effektiv formada külək enerjisini elektrik enerjisinə generasiya edə bilmişdir. Belə ki, küləyin hərəkət tezliyinin 5 Hs qiymətində TEG-in gərginlik və cərəyan şiddətinin maksimal qiyməti Şəkil 3.bdən göründüyü kimi uyğun olaraq 5 V və 6,2 mkA olmuşdur.



Şəkil 3. a) Neylon və PS təbəqələrindən istifadə etməklə hazırlanmış dirsəkli çarx əsaslı TEG-in sxematik təsviri; b) hazırlanan TEG-in gərginlik (I) və cərəyan şiddətinin (II) zamandan asılılıq qrafikləri.

TEG-lərin çıxış effektivliyinin artırılması məqsədi ilə neylon və PS təbəqələrindən istifadə edərək bir qatlı, üç qatlı və beş qatlı (oriqami) TEG-lər hazırlanmışdır. Nazik PS nümunələrin əldə olunması üçün damcı tökmə metodundan istifadə edilmişdir. Sabit enerji mənbəyi kimi gündəlik həyatda külək enerjisini elektrik enerjisinə generasiya etmək, eləcə də, portativ elektron cihazların hazırlanması məqsədilə TEG-lər dirsəkli çarxın üzərinə şəkil 4-də göstərildiyi kimi yerləşdirilmişdir.

Hazırlanan TEG nümunələri üzərində testlərin aparılması üçün külək mənbəyi kimi elektrik sərinkeşindən, küləyin sürətinin təyini üçün anemometrdən və TEG-də materialların bir-biri ilə təmas etmə tezliyinin hesablanması üçün Arduino Nano vasitəsilə infraqırmızı sensordan istifadə edilmişdir. İlk olaraq külək sürətinin 5 m/san olduğu hal üçün təcrübə oriqami strukturlu TEG üzərində aparılmış və qurğunun fırlanma tezliyi 5 Hs kimi qiymətləndirilmişdir.



Şəkil 4. Dirsəkli çarx əsasında oriqami strukturlu TEG-in küləyin sürətinin 5 m/san qiymətində işləməsinin sxematik təsviri

Daha sonra bir qatlı və üç qatlı TEG-lər üçün də eyni təcrübə təkrarlanmışdır. Oriqami strukturlu TEG-lərin bir qatlı TEG-lərlə müqayisədə daha yüksək çıxış gücünə malik olduğu müəyyən edilmişdir. Təcrübələrdən aydın olmuşdur ki, 5 qatdan ibarət oriqami strukturlu TEG daha yaxşı çıxış effektivliyinə malikdir. Belə ki, şəkil 5-də göstərildiyi kimi hər bir TEG nümunəsi üçün külək sürətinin 5 m/san qiymətində açıq dövrə gərginliyi və qısa qapanma cərəyan şiddəti təyin edilmişdir. Bir qatlı TEG üçün gərginlik və cərəyan şiddətinin maksimal qiymətləri uyğun olaraq 8 V və 1 mkA olmuşdur. Qatların sayının artması ilə TEGin gərginlik və cərəyan şiddətinin də qiyməti artmışdır. Beləliklə, beş qatlı TEG üçün gərginlik və cərəyan şiddətinin maksimal qiymətləri uyğun olaraq 50 V və 5 mkA olmuşdur.

Gərginlik və cərəyan şiddətinin qiymətlərində olan bu artım TEGdə olan qatların sayının artması ilə əlaqələndirilir. Belə ki, oriqami strukturunda layların sayı artdıqca təmas sahələri artır və nəticədə TEG-in çıxış gücü artır.

Həmçinin, 5 qatdan hazırlanmış oriqami strukturlu TEG üzərində küləyin sürətinin müxtəlif qiymətlərində elektrik ölçmələri aparılmışdır. Məlum olmuşdur ki, küləyin sürətinin artması ilə materialların təmas-ayrılma tezliyi, TEG-in gərginlik və cərəyan şiddətinin qiyməti



Şəkil 5. Küləyin sürətinin 5 m/san qiymətində bir qatlı, üç qatlı və beş qatlı TEG-lər üzərində elektrik ölçmələrinin aparılması

də artmışdır. Belə ki, küləyin sürətinin 2 m/san qiymətində TEG-in açıq dövrə gərginliyinin və qısa qapanma cərəyan şiddətinin maksimal qiymətləri uyğun olaraq 10 V və 1 mkA olmuşdur. Şəkil 6-da göstərildiyi kimi küləyin sürətinin 5 m/san-ə kimi artması zamanı oriqami strukturlu TEG-in gərginlik və cərəyan şiddətinin maksimal qiymətləri uyğun olaraq 50 V və 5 mkA-ə qədər artmışdır.



Şəkil 6. a) İnfraqırmızı sensorun köməyi ilə təmas-ayrılma tezliyinin təyin olunması; b) Küləyin sürətinin artması ilə TEG-in gərginlik və cərəyan şiddətinin qiymətlərinin təyini

Küləyin sürətinin artması ilə materialların bir-biri ilə təmas-ayrılma tezliyi artır ki, bu isə öz növbəsində səthdə daha çox statik yüklərin toplanmasını təmin edir. Küləyin hərəkəti ilə pərin fırlanması zamanı yaranan kinetik enerji hesabına dirsəkli çarxın sürüşmə qolu irəli-geri hərəkət edir. Nəticədə kinetik enerji materialların qarşılıqlı təsir enerjisinə çevrilir. Qeyd olunan enerji çevrilmələri aşağıdakı (1) ifadəsi ilə göstərilmişdir:

$$E_{d.f} = \frac{1}{2} I_d^2 \omega_d^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \ m_d R_d^2 \right) \omega_d^2 = W_{s.q} = F_{s.q} R.$$
(1)

(1) ifadəsindən göründüyü kimi, sürüşmə qolunun tezliyinin artması ilə materiallara təsir edən qüvvə də artır. Həmçinin, məlum olmuşdur ki, dirsəkli çarxın fırlanan diskinin kütləsi və radiusunun qiymətinin artması ilə təsir qüvvəsi də artır. Lakin, diskin ölçüsünün və kütləsinin böyüməsi küləyin sürətinin zəif olduğu ərazilər üçün effektiv deyil. Təcrübələr zamanı məlum olmuşdur ki, oriqami strukturlu TEG-in qatları arasındakı məsafənin kiçilməsi hesabına itələyici qüvvənin təsiri ilə generatorun çıxış qabiliyyəti daha da artır.

Şəkil 7-də göstərildiyi kimi insan yerişinin monitorinqi üçün TEG əsaslı akselerometr kompüter vasitəsilə dizayn edilmişdir.



Şəkil 7. Akselerometrin hazırlanma sxemi: a) TEG-in hazırlanma mərhələsi; b) akselerometrin yekun forması

Qurğu hərəkətsiz gövdə və hərəkətli kütlə olmaqla iki hissədən ibarətdir. Hərəkətsiz hissə polietilen tereftalat (PET) polimer materialından hazırlanmışdır. Bu iki hissə arasındakı əlaqə ziqzaq formalı PET təbəqə vasitəsilə təmin olunur. Hərəkətli hissə istənilən mexaniki hərəkətə və ya titrəyisə həssas formada cavab reaksiyası verir. Hərəkətli hissənin üzərinə yerləşdirilmiş PS təbəqə insanların hərəkəti ilə bağlı olaraq yaranan titrəyişlərə uyğun yuxarı-aşağı doğru hərəkət edir. Hərəkətsiz olan gövdənin üzərində isə neylon təbəqə yerləşdirilmişdir və o, PS təbəqə ilə təmasda olmaqla müəyyən elektrik siqnalları generasiya edir. Yekun sistem ayaqqabının ön tərəfində üst hissəyə yerləşdirilmişdir. Beləliklə, insanların hərəkəti zamanı yaranan mexaniki titrəyislər hesabına neylon və PS nümunələrin garsılıqlı təması bas verir. Bu isə mexaniki enerjinin elektrik enerjisinə çevrilməsini həyata keçirir. İnsanların hərəkət sürətindən asılı olaraq TEG müxtəlif elektrik siqnalları generasiya etmişdir. Əldə olunan elektrik siqnallarını simulyasiya etməklə yerişin monitoringini həyata keçirmək mümkündür.

Hazırlanan sistem üzərində testlərin aparılması üçün TEG dirsəkli çarxın üzərinə şəkil 8.a-da göstərildiyi kimi quraşdırılmış və elektrik motoru vasitəsilə hərəkətə gətirilmişdir. Motorun hərəkəti zamanı dirsəkli çarxın sürüşmə qolu yuxarı-aşağı doğru hərəkət etməklə TEG-in işləməsini təmin etmişdir. Akselerometrin müxtəlif tezliklərdə yaratdığı elektrik siqnallarının tədqiqi və TEG-in çıxış parametrləri təyin olunmuş və alınan nəticələr şəkil 8.b-də göstərilmişdir. Nəticələrdən məlum olur ki, elektrik motorunun fırlanma tezliyinin artması ilə materialların bir-biri ilə kontakt-ayrılma tezliyi artır. Bu isə TEG-in çıxış parametrlərinin artmasına səbəb olur. Tezliyin 1 Hs-dən 5 Hs-ə dəyişməsi zamanı yaranan gərginlik və cərəyan şiddətinin dəyişməsi səkil 8.b-də əks olunmuşdur. Fırlanma tezliyinin 1 Hs qiymətində TEG-in gərginlik və cərəyan şiddətinin maksimal qiymətləri uyğun olaraq 2,5 V və 0,3 mkA olmuşdur. Tezliyin 1 Hs-dən 5 Hs-ə qədər artması ilə TEG-in gərginlik və cərəyan şiddətinin qiymətləri də artaraq uyğun olaraq 4 V və 0,5 mkA olmuşdur. Belə ki, qüvvənin amplitud qiymətinin dəyişmədiyi halda tezlikdən asılı olaraq TEG-in elektrik parametrlərində olan bu artım materialların bir-biri ilə daha böyük sürətlə və ya impulsla qarşılıqlı təması zamanı səthi yük sıxlığının artması ilə izah olunmuşdur. Yəni, təmas tezliyinin artması ilə atomların elektron buludunun bir-birini örtdüyü oblastda yükdaşıyıcıların daha intensiv şəkildə mübadiləsi baş verir.



Şəkil 8. TEG-in elektrik ölçmələrinin aparılması: a) akselerometr; b) TEG-in gərginlik və cərəyan şiddətinin tezlikdən asılı olaraq dəyişməsi

PVX polimer əsaslı nanokompozit materialın alınmasında isti presləmə üsulundan istifadə edilmişdir. Matris element kimi PVX, doldurucu element kimi isə TiO₂ nanohissəcikləri istifadə edilmişdir. Belə nanokompozit material mənfi triboelektrik xassəli material kimi istifadə edilir (şəkil 9). Yəni, neylon və PVX/TiO₂ nanokompozit təbəqələrin bir-biri ilə təması zamanı triboelektrik seriyaya uyğun olaraq neylonun səthi müsbət, PVX-nın səthi isə mənfi yüklənir. Nəticədə, səthin neytrallaşması prinsipinə uyğun olaraq elektrodlarda əks istiqamətli yüklərin ötürülməsi baş verir. Bu isə elektrodlarda əks istiqamətli yerdəyişmə cərəyanın yaranmasına səbəb olur.

TEG-in işləməsi zamanı yaranan cərəyan Maksvel tənliyinə uyğun olaraq (2) ifadəsi şəkilində aşağıdakı kimi göstərilir:

$$J = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{dE}{dt} + \frac{dP}{dt}$$
(2)

Cərəyan sıxlığının (2) ifadəsindən göründüyü kimi, dielektrik nüfuzluğunun artması ilə dövrədə axan cərəyanın qiyməti də artır. TiO₂ nanohissəcikləri yüksək dielektrik xüsusiyyətinə malik olduğundan onun PVX-nın daxilinə nüfuz etməsi nəticəsində, adi PVX ilə müqayisədə daha yüksək dielektrik nüfuzluğuna malik polimer nanokompozit



Şəkil 9. PVX/TiO₂ nanokompozit əsaslı TENG-lərin elektrik enerjisinin generasiyası prosesi

formalaşdırır¹. TiO₂ nanohissəciklərinin TENG-in çıxış effektivliyinə necə təsir etdiyini araşdırmaq məqsədi ilə hazırlanan iki TENG nümunəsi üzərində elektrik ölçmələri aparılmışdır. Əldə olunan nəticələr şəkil

¹Fan, F.R., Tian, Z.Q., Wang, Z.L. Flexible triboelectric generator // Nano Energy, – 2012. v. 1, № 2, – p. 328-334.

10-da təqdim edilmişdir. Qrafiklərdən aydın olur ki, təmiz PVX/neylon əsaslı TENG-in açıq dövrə gərginliyi və qısa qapanma cərəyan şiddəti, TiO₂ nanohissəciklərinin istifadəsi zamanı əldə olunan nanokompozit materiala nisbətən xeyli aşağıdır. Beləliklə, PVX/TiO₂ nanokompozit



Şəkil 10. PVX və PVX/TiO₂ nanokompozit əsaslı TEG-in elektrik ölçmələrinin aparılması

əsaslı TENG-in daha yaxşı çıxış qabiliyyətinə malik olduğu müəyyən edilmişdir.

Adi PVX əsasında hazırlanmış TEG-in gərginlik və cərəyan şiddətinin qiyməti uyğun olaraq 3V və 0,5 mkA kimi təyin olunmuşdur. Tədqiqat zamanı əldə olunan 5%-li PVX/TiO₂ nanokompozit əsaslı TENG-in gərginlik və cərəyan şiddətinin maksimal qiyməti isə uyğun olaraq 24 V və 2 mkA olmuşdur. Nanokompozit əsaslı TENG-in çıxış effektivliyinin 700% artması onunla izah olunur ki, TiO₂ nanohissəcikləri yüksək dielektrik nüfuzluğuna malikdir. Belə ki, materialların təması zamanı kompozitin daxilində əmələ gələn polyar dipolların sayı artır ki, bu isə öz növbəsində səthdə əmələ gələn yükdaşıyıcıların miqdarına müsbət təsir göstərir.

Qeyd edək ki, PVX-nın dielektrik sabiti 4-ə, TiO₂ üçün isə bu qiymət 110-a bərabər olduğundan yüksək dielektrik xassəli nanokompozitlərin TENG-in hazırlanmasında triboelektrik xassəli material kimi istifadəsi zamanı effektiv olduğu təyin edilmişdir. Belə materiallar TENG-in hazırlanmasında və onun praktiki tətbiqinin genişləndirilməsində perspektivli material hesab olunurlar.

Dördüncü fəsildə müxtəlif üsullarla triboelektrik xassəli material-

ların səthində yaradılan mikro və nanostrukturların TENG-in çıxış effektivliyinə təsirinin müəyyən edilməsi istiqamətində tədqiqat işləri aparılmışdır.

Səthi teksturaların TENG-in çıxış parametrlərinə təsirinin araşdırılması üçün 3D çap texnologiyasından istifadə olunmuşdur. Belə ki, bu texnologiya əsasında hazırlanan müxtəlif ölçülü qəlib nümunələri PS səthində struktur yaratmaq üçün istifadə edilmişdir. Qəliblərin dizayn edilməsində "Tinkercad" proqramından istifadə edilmişdir (2-2.5 saat ərzində). Çap prosesindən sonra əldə olunan altlıqların üzərində olan strukturların konusvari quruluşa malik olduğu müəyyən edilmişdir. Belə ki, əvvəlcədən proqram vasitəsilə səthi strukturun diametrlərinin ölçülərinə görə bir-birindən fərqlənən böyük, orta, kiçik və mikro modellər hazırlanmışdır. Bu nümunələr üzərində olan konusların diametrləri uyğun olaraq 6,5 mm, 5 mm, 3,5 mm və 0,5 mm kimi təyin edilmişdir.

Nazik PS təbəqələrin alınması üçün əvvəlcə 31,17 q PS 1,56 q çarpaz birləşdirici agentlə 15 dəq ərzində qarışdırılmışdır. Daha sonra qarışıq doktor bıçaq örtüyü metodunun köməyi ilə Al folqanın üzərinə çəkilmişdir. Qeyd etmək lazımdır ki, belə nümunələrin qalınlığı bir neçə yüz mikrometr arasında dəyişir. Hazırlanmış nümunələrin üzərinə 3D printer vasitəsilə çap olunmuş qəlib nümunələri yerləşdirilmişdir. Qəlibləmə prosesi üçün altlığın üzərinə müəyyən kütləli cisimlər yerləşdirilmişdir. Bir gün ərzində otaq temperaturunda nümunələr qurudulmuşdur. TEG-in yaradılması üçün digər triboelektrik xassəli material kimi diametri 43 mkm olan neylondan istifadə edilmiş və nəticədə onlar əsasında 4 ədəd TEG hazırlanmışdır. Belə TEG-lər üzərində təcrübələr aparılmış və alınan elektrik ölçmələri Keithley multimetri tərəfindən qeyd edilmişdir. Təcrübələr zamanı TEG-in açıq dövrə gərginliyi və qısa qapanma cərəyanı üçün şəkil 11-də göstərildiyi kimi nəticələr əldə edilmişdir.

Şəkil 11.a-da göstərildiyi kimi PS təbəqəsinin səthində əmələ gələn konusvari strukturların ölçülərinin azalması ilə onun açıq dövrə gərginliyinin qiyməti artmışdır. Belə ki, gərginlik 25 V-dan 55 V-a qədər artaraq özünün maksimal qiymətini almışdır. Qeyd etmək lazımdır ki, ən böyük artım mikro ölçüyə keçid zamanı qeydə alınmışdır. Həmçinin, TEG-in cərəyan şiddətinin qiymətlərində eyni tendensiya müşahidə olunmuşdur. Belə ki, PS-in səthində formalaşan konusvari strukturun ölçülərinin azalması ilə cərəyan şiddətinin qiyməti 2,8



mkA-dən 6 mkA-ə qədər artdığı müşahidə edilmişdir.

Şəkil 11. a) Səthi strukturlu PS və neylon əsaslı TEG-lərin açıq dövrə gərginliyinin zamanda asılılıq qrafikləri; b) TEG-lərin cərəyan şiddətinin zamandan asılılıq qrafikləri

TEG-in gərginlik və cərəyan şiddətinin qiymətində olan bu artım qəlibləmə prosesi zamanı səthdə yaradılan süni teksturaların mövcudluğu ilə izah olunur. Belə ki, bu strukturların ölçüsünün azalması ilə PS və neylonun bir-biri ilə aktiv təmas sahəsi artır. Digər tərəfdən səthdə olan belə kələ-kötür strukturlar hesabına təbəqələrin bir-biri ilə daha çox atomar səviyyədə qarşılıqlı təsirdə olması məlumdur. TEGin çıxış gücünün mikro tərtibdə ən böyük olması bu halda vahid səthə düşən strukturların sayının digərləri ilə müqayisədə daha çox olması izah edilmişdir. Yəni, mikro ölçülü halda PS və neylon təbəqələrin atomar səviyyədə aktiv təmas sahəsi və dolayısı ilə səthi yük sıxlığı artırmış olur ki, nəticədə səthlərdə daha çox statik yüklərin ayrılması baş verir. Yekun olaraq onu qeyd etmək olar ki, səthdə süni şəkildə strukturlar yaratmaq və onların ölçülərini dəyişməklə TEG-in çıxış effektivliyini idarə etmək mümkündür.

Neylon lifli və ya şəbəkəli quruluşa malik polimer materialdır. Neylon materialının səthi strukturunun TEG-in çıxış parametrlərinə təsirinin araşdırılması məqsədi ilə daxili liflərinin diametrlərinin ölçüsünə görə fərqlənən 10, 15 və 20 denye olan neylondan istifadə olunmuşdur. Denye materialın daxili strukturunda formalaşan lif növündən asılı olaraq dəyişən xassədir və onun qısaltması DEN kimidir. O, materialşünaslıqda 9000 m uzunluğunda olan iplikdə lifin kütləsinin qramlarla ifadə olunmasıdır. Hazırkı standartlarda onun kəmiyyət payı 450 m-ə 0,05 q olaraq qiymətləndirilir. Beləliklə, DEN lifin diametrinin ölçüsünü ifadə edən bir üsuldur.

Neylon liflərinin diametrlərin qiymətini (3) ifadəsinin köməyi ilə müəyyən etmək mümkündür. Belə ki, aparılan tədqiqat işində istifadə olunan neylon təbəqələrdə olan liflərin ölçülərini hesablaya bilərik. Qeyd etmək lazımdır ki, bu ifadə ilə hesablanan liflərin diametrləri mikrometr tərtibində olur. Digər vahidlər sistemində hesablama aparmaq üçün fərqli sabitlər əlavə olunur.

$$d_{Neylon} = 11.89\sqrt{DEN/\rho}.$$
 (3)

Burada, d – neylon liflərin mkr-lə ifadə olunan diametri, DEN – denyelərin sayını, ρ – q/ml şəkilində ifadə olunmaqla liflərin sıxlığını göstərir. (3) bərabərliyindən istifadə etməklə 10, 15 və 20 DEN üçün hesablanmış qiymətlər cədvəl 1-də əks olunmuşdur. Belə ki, 10, 15 və 20 DEN neylon üçün bu ölçülər uyğun olaraq 35 mkm, 44 mkm və 51 mkm tərtibində olmuşdur.

| Neylon | ρ — liflərin sıxlığı (qr/ml) | d — liflərin diametri (mkm) | d — liflərin diametri (mil) |
|--------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 DEN | 1.14 | 11.13 | 0.44 |
| 3 DEN | 1.14 | 19.29 | 0.76 |
| 6 DEN | 1.14 | 27.28 | 1.07 |
| 10 DEN | 1.14 | 35.22 | 1.38 |
| 15 DEN | 1.14 | 43.57 | 1.7 |
| 20 DEN | 1.14 | 50.81 | 1.96 |

| Cədvəl 1. Neylon | liflərinin diame | etrlərinin qiymə | ətləri |
|------------------|------------------|------------------|--------|
|------------------|------------------|------------------|--------|

Neylon liflərin ölçülərinin TEG-in çıxış effektivliyinə təsirinin araşdırılması məqsədi ilə digər triboelektrik xassəli material kimi PSdən istifadə etməklə 3 ədəd TEG nümunəsi hazırlanmışdır. PS nümunələrin hazırlanması üçün 12,50 q PS 1,3 ml çarpaz birləşdirici agent ilə 15 dəq ərzində qarışdırılır və əldə olunan məhlul damcı tökmə metodu ilə elektrod kimi Al-dan istifadə olunmuşdur.

Müxtəlif mikro ölçülü neylon və PS təbəqələr əsaslı TEG-lərin

elektrik ölçmələri Keithley RMM6500 multimetrinin köməyi ilə aparılmışdır. TEG-in gərginlik və cərəyan şiddətinin qiymətlərindən bəlli olur ki, neylon liflərin ölçülərinin azalması ilə TEG-in çıxış parametrləri yüksəlir. Belə ki, neylon liflərin diametrinin 51 mkm olduğu hal üçün TEG-in açıq dövrə gərginliyi və qısa qapanma cərəyan şiddəti uyğun olaraq 63 V və 6,3 mkA kimi təyin edilmişdir. Neylon liflərin diametrin 44 mkm olduğu halda isə TEG-in gərginlik və cərəyan şiddətinin qiyməti bir qədər artmış və bu qiymətlər uyğun olaraq 75 V və 8 mkA olmuşdur. Və nəhayət neylon liflərin diametri 35 mkm olduğu halda TEG-in gərginlik və cərəyan şiddətinin qiyməti uyğun olaraq 85 V və 8,5 mkA olaraq təyin edilmişdir. Bütün bunları ümumiləşdirsək, son nəticə olaraq deyə bilərik ki, lifli neylon təbəqələr əsasında hazırlanmış TENG-lərdə liflərin diametrinin 51 mkm-dən 35 mkm-ə qədər azaldılması ilə çıxış gücü 140%-ə qədər artır ki, bu da vahid səthə düşən friksion ötürmələrin eyni istiqamətli olması ilə əlaqədardır.

Neylon təbəqələrdən, TiO₂ və Fe₃O₄ nanohissəciklərindən istifadə edərək əldə olunan nanokompozitlərin dielektrik xassələri və belə təbəqələr əsasında hazırlanan TENG-lərin çıxış parametrləri tədqiq olunmuşdur. Həmçinin, müxtəlif üsullarla əldə olunmuş triboelektrik təbəqələrin səthi morfologiyası, quruluş analizi, element analizi və dielektrik ölçmələri həyata keçirilmişdir.

Şəkil 12-də neylon təbəqəsinin səthinə 5 və 15 dəfə 1%-li TiO₂ nanohissəciklərinin püskürdülməsindən və məhluluna batırılmasından əldə olunan nanokompozitlərin rentgen-quruluş analizinin nəticələri əks olunmuşdur. Təsvirdə adi neylonun (şəkil 12.a), 1%-li TiO₂ məhluluna batırılmış (şəkil 12.b), səthinə 5 dəfə (şəkil 12.c) və 15 dəfə püskürdülmüş (şəkil 12.d) neylon təbəqələrinin difraksiya mənzərələri verilmişdir.

RD-də əks olunan difraksiya piklərinin – α_1 ($2\theta = 20,4^\circ$) piki ilə əlaqəli olub hidrogenlə bağlı zəncirlər arasındakı məsafəyə uyğundur. α_2 -ə uyğun gələn pikin isə ($2\theta = 23^\circ$) hidrogenlə bağlanmış təbəqələrin ayrılmasına aid olduğu göstərilmişdir. β fazasına aid olan piklər isə $2\theta = \sim 12^\circ$ və 19°, təmiz neylon 6,6 nanoliflərinin γ fazasına aid olan pikləri isə $2\theta = 13^\circ$ (γ_1) və $2\theta = 22^\circ$ (γ_2)-də müşahidə edilir. Spektrdə müşahidə edilən $2\theta = 21^\circ$ və 23° pikləri təmiz neylon 6-nın α fazasına aid olan pikləridir. Bu əsas piklər həm təmiz neylonda, həm də digər nümunələrdə müşahidə edilir. Şəkil 11.a-da verilmiş təmiz neylona aid difraksiya mənzərəsində də 28,79°-də difraksiya piki müşahidə edilmişdir. Bu da təmiz neylona aid olan xarakterik pik ilə əlaqələndirilmişdir. Şəkil 11.b, c və d-də müşahidə olunan $2\theta = 27,44^{\circ}, 36,44^{\circ},$ 44,07° və 54,61° difraksiya pikləri uyğun olaraq (110), (101), (210) və (211) Miller indekslərinə uyğun gəlmişdir.



Şəkil 12. Neylon/TiO₂ nanokompozitlərinin RD mənzərəsi: adi neylon (a), 1%-li TiO₂ məhluluna batırılımış (b), 5 dəfə (c) və 15 dəfə (d) spreylə vurulmuş hal

Bu piklər isə JCPDS №: 89-4920-ə kart nümunəsinə uyğun gələrək tetraqonal fazada TiO₂ nanohissəciklərinin formalaşdığını təsdiqləyir. Belə ki, bu piklərə uyğun gələn d – atom təbəqələri arasındakı məsafə müvafiq olaraq 3,2, 2,4, 2,1, 1,6-ə bərabərdir. Alınan difraksiya mənzərəsinə əsasən Debay-Serer düsturu vasitəsilə TiO₂ nanohissəciklərinin ölçüləri hər üç nümunə üçün hesablanmışdır². Belə ki, batırılmış, 5 və 15 dəfə püskürdülmüş nümunə üçün nanohissəciklərin ölçüləri uyğun olaraq 10,42 nm, 10,12 nm və 10,38 nm olmuşdur. Batırılmış nümunə üçün nanohissəciklərin ölçüsü digər nümunələrlə müqavisədə daha böyükdür. Cünki, məhlulda mövcud olan daha kiçik və böyük nanohissəciklərin hər biri daha asanlıqla neylon təbəqəsinin səthinə çökmüşdür. 5 dəfə püskürtmə zamanı daha kiçik nanohissəciklər neylon təbəqəsinin səthində formalaşmış, 15 dəfə püskürtmə zamanı isə nanohissəciklər aqlomerasiya edərək nisbətən daha iri ölçülü nanohissəciklər formalaşmışdır.

²Holzwarth, U., Gibson, N. The Scherrer equation versus the 'Debye-Scherrer equation' // Nature nanotechnology, – 2011. v. 6, № 9, – p. 534-534.

Adi neylon (şəkil 13.a), 1%-li neylon/TiO₂ nanokompozitlərinin 5 və 15 dəfə püskürdülmüş və batırılmış neylon təbəqələrinin səthinin morfologiyası (şəkil 13.b, c,d və e) SEM ilə tədqiq olunmuş və şəkil 13-də əks olunmuşdur. SEM təsvirindən aydın olur ki, neylon bir-birinə ilə sıx bağlı olan liflərdən ibarət şəbəkəli quruluşa malik polimerdir.



Şəkil 13. Neylon təbəqələrin SEM təsvirləri. a) adi neylon və 1.95 kx bö; b) adi neylonun 8.97 kx-də böyütmə; c) səthinə 5 dəfə 1%-li TiO₂ məhlulu püskürdülmüş neylon təbəqəsi və 11.19 kx böyütmə; d) səthinə 15 dəfə 1%-li TiO₂ məhlulu püskürdülmüş neylon təbəqəsi və 10.22 kx böyütmə; e) 1%-li TiO₂ məhluluna batırılmış neylon təbəqəsi və 9.66 kx böyütmə

Neylon təbəqələrinin səthinə vurulmuş 1%-li TiO₂ məhlulun miqdarının artması ilə, başqa sözlə desək, 5 dəfə, 15 dəfə püskürtmə və batırılmış hal üçün neylon liflərinin səthində TiO₂ nanohissəcikləri dispers formada paylanmışdır. Nanohissəciklərin ölçüləri çox kiçik olduğundan onların ölçülərini təyin etmək mümkün deyildir. Şəkillərdən aydın formada görünür ki, püskürtmələrin sayının artması ilə neylon təbəqəsinin liflərində paylanan TiO₂-nin sıxlığı artmış, daha sferik formada hissəciklər formalaşmışdır.

Neylon/TiO₂ nanokompozitlərinin dielektrik ölçmələri həyata keçirilmiş və nəticələri şəkil 14-də verilmişdir. Nəticələrin analizindən məlum olmuşdur ki, adi neylon ilə müqayisədə neylon üzərinə çökdürülmüş nanokompozit materialların dielektrik nüfuzluğu artır. Buna səbəb adi neylon təbəqəsi ilə müqayisədə TiO₂ nanohissəciklərinin dielektrik sabitinin qiymətinin yüksək olmasıdır. Bu isə öz növbəsində atom və molekulların dipollarının düzülüşünə təsir göstərir. Nəticələrdən müəyyən olunmuşdur ki, nanokompozit daxilində TiO₂ miqdarının artması ilə dielektrik nüfuzluğu getdikcə artmışdır.



Şəkil 14. Neylon/TiO₂ nanokompozit materiallarının dielektrik ölçmələrinin tədqiqi: 1) adi neylon; 2) 5 dəfə 1%-li TiO₂; 3) 15 dəfə TiO₂ püskürdülmüş və 4) 1%-li TiO₂ məhluluna batırılmış neylon təbəqələr

Şəkil 15.a və b-də nanokompozit əsaslı TENG-in açıq dövrə gərginliyi və qısa qapanma cərəyan şiddətinin qiymətlərində baş verən dəyişmələr əks olunmuşdur. Adi neylon ilə müqayisədə neylon/TiO2 nanokompozitlərindən hazırlanmış TENG-lərin generasiya etdiyi açıq dövrə gərginliyi və qısa qapanma cərəyan şiddətinin qiymətinin artması müşahidə edilmişdir. Belə ki, adi neylonla hazırlanmış TENGin gərginlik və cərəyan şiddətinin maksimal qiymətləri üçün uyğun olaraq 30,36 V və 1,82 mkA müəyyən edilmişdir. 5 dəfə püskürdülmüş hal üçün isə bu qiymətlər uyğun olaraq 33,38V və 2,03 mkA kimi təyin edilmişdir. 1 %-li TiO₂ NH-ların səthdəki miqdarının (püskürtmələrin sayının) artması ilə nanokompozit əsaslı TENG-in çıxış parametrləridə artaraq gərginlik və cərəyan şiddəti üçün 41,38 V və 2,5 mkA olmuşdur. Diaqramlardan aydın olur ki, TiO₂ nanohissəciklərinin miqdarının ilkin artması ilə TENG-in gərginlik və cərəyan şiddətinin artmışdır. TENG-in kondensator modelinə görə bu artım şəkil 14-də göstərildiyi kimi dielektrik nüfuzluğunun qiymətinin artması ilə izah edilmişdir. TiO₂-nin miqdarının növbəti artımında isə TENG-in gərginlik və cərəyan şiddətinin qiymətlərində olan azalma triboelektrik materialların bir-biri ilə daha az təmasda olması ilə izah olunmuşdur. TiO₂-nin miqdarının sonrakı artımında nanokompozit əsaslı TENG-in çıxış parametrlərində bir qədər azalma müşahidə olunmuşdur. Belə ki, batırılmış hal üçün TENG-in açıq dövrə gərginliyi və qısa qapanma cərəyan şiddəti üçün uyğun olaraq 39,05 V və 2,47 mkA kimi təyin edilmişdir. Çıxış parametrlərində olan bu azalma TiO₂-nin səthdəki payının artması ilə neylon təbəqənin səthində aqlomerasiya edərək daha böyük nanohissəciklər - nanoklasterlər əmələ gətirməsi və səthdə neylonun PS-lə daha az kontakta gəlməsinə səbəb olur ki, yekunda TENG-in çıxış gücü azalır.

Elektrik ölçmələrindən aydın olmuşdur ki, adi neylon ilə müqayisədə nanokompozit əsaslı TENG-lərin çıxış parametrləri daha yüksəkdir. Bu artım səthdə polyar yüklərin yaranması ilə əlaqələndirilmişdir.

Beləliklə, neylon/TiO₂ nanokompozit materialların TENG-lərdə triboelektrik material kimi effektivliyə malik olduğu müəyyənləşdirilmişdir. Doldurucunun miqdarını dəyişməklə optimal parametrlərin təyin edilməsi ilə TENG-in effektivliyini artırmaq olar.



Şəkil 15. Neylon/TiO₂ nanokompozit əsaslı TENG-in çıxış parametrlərinin püskürtmələrin sayından asılı olaraq dəyişməsi: a) gərginlik; b) cərəyan şiddəti

Maqnit nanohissəciklərinin TENG-lərin çıxış parametrlərinə təsiri-

nin araşdırılması məqsədi ilə sprey örtük texnologiyasının köməyi ilə 1%-li Neylon/Fe₃O₄ nanokompozit materialları hazırlanmışdır. Belə nanokompozit nümunələr əsaslı TENG-lərin çıxış parametrləri adi neylon əsaslı TENG-in çıxış parametrləri ilə müqayisəli şəkildə analiz edilmişdir. Belə ki, 1%-li Fe₃O₄-ethanol məhlulunun neylonun səthinə 5 dəfə və 15 dəfə püskürtməklə 2 nümunə, həmçinin, bu məhlula adi neylon batırılmış nümunələr də əldə edilmişdir. Eyni zamanda məhlula batırıldıqdan sonra xarici maqnit sahəsinin tətbiq olunması ilə neylonun səthində olan Fe₃O₄ nanohissəciklərinin paylanmasında baş verən dəyişikliklər hesabına nanokompozit əsaslı TENG-in çıxış parametrlərinə təsiri araşdırılmışdır.

Şəkil 16-də 1%-li Neylon/Fe₃O₄ nanokompozit materialının RD təsvirləri göstərilmişdir.



Şəkil 16. Neylon/Fe₃O₄ nanokompozitlərinin RD mənzərəsi: a) adi neylon (1), karton (2), neylon/karton (3), Fe₃O₄ nanohissəcikləri (4); b) 1%-li Fe₃O₄ məhluluna 5 dəfə (1), 15 dəfə (2) spreylə vurulmuş və batırılmış hal (3)

Şəkil 16.a.1-də təmiz neylona aid olan RD təsvirləri verilmişdir. 2 θ =21° və 23° pikləri α fazasına aid olan təmiz neylon 6-nın difraksiya pikləridir. Şəkil 16.a.2-də isə təmiz kartonun, şəkil 16.a.3-də isə neylon/ kartonun RD mənzərəsi təqdim edilmişdir. Burada ~20-30° intervalında müşahidə olunan geniş difraksiya mənzərəsi müvafiq olaraq karton və neylona aid edilir. Şəkil 16.a.4-də isə Fe₃O₄ nanohissəciklərinə aid olan RD mənzərəsi təqdim edilmişdir. Burada müşahidə edilən 2 θ =31°, 35°, 43°, 58°, 63° pikləri müvafiq olaraq (220), (311), (400), (511) və (440) Miller indekslərinə uyğun gəlir. Ədəbiyyatla müqayisədən formalaşan nanohoissəciklərin JCPDS 00-003-0863 kartına və kub tərs spinel quruluşuna uyğun gəldiyi müəyyən edilmişdir³.

Şəkil 16.b.1,2 və 3-də müvafiq olaraq karton/neylon təbəqəsinə 1%li Fe₃O₄ məhlulunun 5 dəfə, 15 dəfə püskürdülməsindən və karton/neylon təbəqəsinin batırılmasından əldə olunan kompozit təbəqələrin RD mənzərəsi verilmişdir. Burada da, əldə olunan Fe₃O₄ nanohissəciklərinə aid difraksiya mənzərəsinin kub tərs spinel quruluşuna uyğun gəldiyi müəyyən edilmişdir. Fe₃O₄-ə aid edilən xarakterik piklərin püskürtmələrin sayının artması və batırılma nəticəsində neylon təbəqəsinin liflərində Fe₃O₄-ə aid olan nanohissəciklərinin miqdarının artması ona aid olan xarakterik piklərin intensivliyin artması ilə özünü büruzə verir. Debay-Şerer düsturuna əsasən neylon təbəqəsinin səthində 1%-li Fe₃O₄ nanohissəciklərinin 5 dəfə püskürdülməsi nəticəsində səthdə formalaşan nanohissəciklərin ölçüsü 38,51 nm, 15 dəfə püskürtmə nəticəsində formalaşan nanohissəciklərin ölçüsü 38,17 nm və məhlula neylon təbəqəsinin batırılması nəticəsində isə səthdə formalaşan nanohissəciklərin ölçüsünün 29,63 nm olduğu müəyyən edilmişdir. Buradan belə qənaətə gəlmək olar ki, 5 dəfə püskürtmə nəticəsində neylon təbəqəsinin səthində yalnız iri nanohissəciklərin yapışması, 15 dəfə püskürtmə nəticəsində isə nisbətən kiçik hissəciklərin də formalaşması baş vermişdir. Lakin, neylon təbəqəsinin məhlula batırılması nəticəsində onun səthində həm iri nanohissəciklərin, həm də kiçik nanohissəciklərin səthdə formalaşma imkanı olmuşdur.

Fe₃O₄ nanohissəciklərinin neylonun səthində paylanmasını təyin

³Zhou, X. Fabrication of cluster/shell Fe₃O₄/Au nanoparticles and application in protein detection via a SERS method / X.Zhou, W.Xu, Y.Wang [et al.] // The Journal of Physical Chemistry C, -2010. v. 114, Nº 46, -p. 19607-19613.

etmək üçün adi neylon və səthinə Fe₃O₄ nanohissəciklərinin çökdürülməsindən alınan nanokompozit nümunələrin SEM təsvirləri analiz edilmiş və şəkil 17-də verilmişdir. Əldə olunan SEM təsvirlərə nəzər salsaq, adi neylonun çox sayda liflərdən ibarət olduğunu görmək olar. Nanohissəcik çökdürülmüş nümunələrin SEM təsvirlərində isə Fe₃O₄ nanohissəciklərinin neylon liflərin səthində formalaşdığı görünür (şəkil 17.a). Bu nanohissəciklərin neylonun səthinə örtülməsi Van-der-Vaals qüvvələri hesabına baş verir. Belə ki, şəkil 17.b-də neylonun səthinə sprey vasitəsilə 5 dəfə püskürdülmüş nanokompozitin SEM təsviri verilmisdir. SEM təsvirlərdən də göründüyü kimi Fe₃O₄ nanohissəciklərinin miqdarı nisbətən az olduğundan neylonun səthi tamamilə örtülməmişdir. Şəkil 17.c,d və e-də isə uvğun olaraq 15 dəfə püskürtməklə, məhlula batırılma və batırıldıqdan sonra xarici sabit maqnit sahəsi tətbiq olunaraq əldə olunan nanokompozit təbəqələrin SEM təsvirləri göstərilmişdir. Şəkillərdən aydın olur ki, Fe₃O₄ nanohissəciklərinin miqdarının artması (batırılma və ya püskürdülmə sayı) ilə neylon liflərinin səthinin daha çox örtülməsi baş vermişdir.



Şəkil 17. Müxtəlif böyütmələrdə a) adi neylon; b) 5 dəfə; c) 15 dəfə püskürdülmüş; d) batırılmış; e) batırıldıqdan sonra maqnit sahəsi tətbiq edilmiş neylon nanokompozit təbəqələrin SEM təsvirləri

Həmçinin, nanohissəciklərin miqdarının artması ilə neylon liflərinin səthində formalaşan nanohissəciklərin aqlomerasiya edərək daha böyük hissəciklərin əmələ gəldiyi müşahidə edilmişdir.

Neylon təbəqələrin səthində formalaşdırılan nanokompozit materiallardan istifadə etməklə əlavə olaraq 4 ədəd TENG prototipi hazırlanmış, onun çıxış parametrləri (açıq dövrə gərginliyi, qısa qapanma cərəyan şiddəti) ölçülmüşdür. Alınan nəticələrdən müəyyən olunmuşdur ki, Fe₃O₄ nanohissəciklərinin neylon təbəqəsinin səthində artması ilə TENG-in çıxış parametrləri əvvəlcə artır, sonra isə dəyişməz olaraq qalır. Maqnit sahəsi altında formalaşan kompozit material halında isə bu qiymət daha yüksək qiymət alır. Bu, maqnit domenlərinin sahə istiqamətində oriyentasiyası ilə əlaqələndirilir.

ΝƏΤİCƏ

1. Neylon/TiO₂ nanokompozit materiallar əsasında əldə olunmuş TENG-lərin effektivliyinin nanohissəciklərin miqdarının ilkin artması ilə artdığı səthdə daha çox polyar yüklərin yaranması, TiO₂-nin miqdarının sonrakı artımında TENG-in çıxış parametrlərində olan azalma nanohissəciklərin qeyri-bərabər paylanması ilə əlaqədardır.

2. Lifli neylon təbəqələr əsasında hazırlanmış TENG-lərdə liflərin diametrinin 51 mkm-dən 35 mkm-ə qədər azaldılması ilə çıxış gücü 140%-ə qədər artır ki, bu da vahid səthə düşən friksion ötürmələrin eyni istiqamətli olması ilə əlaqədardır.

3. İlk dəfə olaraq neylon/Fe₃O₄ nanokompozit materiallar əsasında hazırlanmış TENG-də çıxış gücünün artmasının Fe₃O₄-də kontakt elektriklənmə zamanı yaranan əlavə elektrik sahəsi ilə bağlı olduğu müəyyən edilmişdir.

4. Müəyyən olunmuşdur ki, PS təbəqələrinin səthində formalaşdırılan konusvari mikro teksturalar materialların bir-biri ilə aktiv təmas sahəsini və yekunda TENG-in çıxış gücünü artırır.

5. Müxtəlif metodlarla hazırlanmış TENG-in çıxış gücü kontakt materiallarının fiziki parametrləri (dielektrik nüfuzluğu, maqnit qav-rayıcılığı) ilə bərabər, həcmində nanoklasterlərin və səthdə süni teksturaların formalaşdırılması ilə artırıla bilər.

6. Hazırlanmış oriqami strukturlu TEG-lər müxtəlif növ mexaniki enerji mənbələrindən elektrik enerjisinin təhlükəsiz generasiya edilməsində, portativ elektron cihazları – işıq diodu əsaslı şüalandırıcılar, bio- və termosensorlar, təzyiq qeydediciləri və s. üçün qidalandırıcı mənbə kimi istifadə edilə bilər.

Dissertasiya işinin mövzusu üzrə dərc olunmuş elmi işlər:

1. Ağayev, Ş.M., J.Kim, Güləhmədov, O.G., Triboelektrik generatorlar və onların tətbiq sahələri // Azərbaycan xalqının Ümummilli lideri Heydər Əliyevin anadan olmasının 98-ci ildönümünə həsr olunmuş "Gələcəyin alimləri" tələbələrin VI Respublika elmi konfransı, – Bakı: – 3 May, – 2021, – səh.114–115.

2. Məmmədov, H.S., J.Kim, Güləhmədov, O.G. Triboelektrik generatorlar və onların tətbiq sahələri Neylon və strukturlaşdırılmış silisium əsasında triboelektrik generatorlar // Azərbaycan xalqının Ümummilli lideri Heydər Əliyevin anadan olmasının 98-ci ildönümünə həsr olunmuş "Gələcəyin alimləri" tələbələrin VI Respublika elmi konfransı, – Bakı: –3 May, – 2021, – səh. 5–7.

3. Güləhmədov, O.G., Kim, J. Külək enerjisi əsasında Triboelektrik generatorlar // "Fizika və astronomiyanın problemləri" Magistrantların və gənc tədqiqatçıların XXI Ümumrespublika Elmi Konfransı, – Bakı: – 21 May, – 2021, – səh.139–140.

4. Gulahmadov, O.G., Investigation of the effect of surface structures of triboelectric materials on the triboelectric nanogenerator performance / O.G. Gulahmadov // Journal of Baku Engineering University – Physics, -2021. 5, No1, -p. 3–9.

5. J.Kim, Enhancement of performance of triboelectric generators by introduction of micro- and nano-structures on triboelectric films / J.Kim, O.G. Gulahmadov, M.B.Muradov // Journal of Materials Science: Materials in Electronics, – 2021. 32, – p.42813–24661.

6. Kim, J., Mirsultanova, R.M., Muradov, M.B., Gulahmadov, O.G., Efficient and continuous generation of electricity from triboelectric nanogenerators operated in the contact-separation mode by a scotch yoke system // 6th International Conference "Nanotechnology",

- Tbilisi: -4 -7 October, -2021, -p.66.

7. Gulahmadov, O.G., Kim, J. Triboelectric Generators Based on Nylon and Structured Silicon // Proceedings of the 2^{nd} International Science and Engineering Conference, – Baku: – 26 – 27 November, – 2021, – p.344–346.

8. Gulahmadov, O.G., Muradov, M.B., Kim, J. Enhancing performance of triboelectric nanogenerators by using titanium oxide/polyvinyl chloride nanocomposite films // Proceedings of the 7th International Conference Modern Trends In Physics, - Baku: - 15 - 17 December, - 2021, - p.29–30.

9. Gulahmadov, O.G., Mirsultanova, R.M., Muradov, M.B., Kim, J. Enhancing performance of triboelectric nanogenerators by using titanium ox1de/polyvinyl chloride nanocomposite films // Proceedings of the 7th International Conference Modern Trends In Physics, – Baku: –15–17 December, – 2021, – p.92–96.

10. Gulahmadov, O.G. The wind-driven Scotch yoke-based triboelectric nanogenerator system for energy harvesting / O.G. Gulahmadov, M.B.Muradov, J.Kim // International Journal of Energy Research, -2022.46, N $_{28}$, -p.10989–10997.

11. Gulahmadov, O.G., Improving performance of triboelectric nanogenerators by creating micro-structures on the surface of triboelectric films / O.G. Gulahmadov // News of Baku University - series of Physico-Mathematical Sciences, -2022. No.1, -p.123-131.

12. Gulahmadov, O.G., Mirsultanova, R.M., Kim, J. Improving the Performance of the Triboelectric Nanogenerators With the Creation of Surface Structures // VI International Scientific Conference of Young Researchers Dedicated to the 99th Anniversary of National Leader Heydar Aliyev, -Baku: -29 - 30 April, -2022, -p.31-34.

13. Mammadova, N.C., Gulahmadov, O.G., Kim, J. Improving the performance of the triboelectric nanogenerator (TENG) by using microstructured Nylon // Azərbaycan xalqının Ümummilli lideri Heydər Əliyevin anadan olmasının 99-cu ildönümünə həsr olunmuş "Gələcə-yin alimləri" mövzusunda tələbələrin VII Respublika elmi konfransı, – Bakı: – 4 May, – 2022, – p.6-7.

14. Qasimov, Q.S., Gulahmadov, O.G., Kim, J. Effect of surface structures of polysiloxane films on the performance of the triboelectric nanogenerators // Azərbaycan xalqının Ümummilli lideri Heydər Əliyevin anadan olmasının 99-cu ildönümünə həsr olunmuş "Gələcəyin alimləri" mövzusunda tələbələrin VII Respublika elmi konfransı, – Bakı: – 4 May, – 2022, – p.91-92.

15. Həsənova, G.B., Güləhmədov, O.G., Kim, J. Triboelektrik nanogenerator və onun əsasında sensorların hazırlanması // Azərbaycan xalqının Ümummilli lideri Heydər Əliyevin anadan olmasının 99-cu ildönümünə həsr olunmuş "Gələcəyin alimləri" mövzusunda tələbələrin VII Respublika elmi konfransı, – Bakı: – 4 May, – 2022, – səh.93–94.

16. Gulahmadov, O.G., Mamedov, H.M., Kim, J. Triboelectric nanogenerators based on the Polyurethane and Nylon films // Magistrantların və gənc tədqiqatçıların "ŞUŞA İLİ"nə həsr olunmuş "Fizika və Astronomiya Problemləri" adlı XXII Ümumrespublika elmi konfransı, – Bakı: – 20 May, – 2022, – p.7–8.

17. Gulahmadov, O.G., Gait analysis by using electric signals from a triboelectric nanogenerator / O.G. Gulahmadov, M.B.Muradov, J.Kim // Engineering Research Express, -2022.4, N $_{23}$, -p.1-8.

18. Gulahmadov, O.G., Muradov, M.B., Kim, J., Mirsultanova, R.M., Wireless wearable self-powered gait monitoring sensors by using a triboelectric nanogenerator-installed accelerometer // Measurement, Sensor Systems and Applications Conference, - China: -24 - 26 August, -2022, -p.72-73.

19. Gulahmadov, O.G., Mamedov, H.M., J.Kim, Improving the performance of the triboelectric nanogenerator using Titanium oxide / 9^{th} International conference on materials science and nanotechnology for next generation (MSNG-2022), –Ankara: – 22 – 24 September, – 2022, – p.90.

20. Gulahmadov, O.G., Demonstration of the triboelectric nanogenerator with origami structures for the power supply of portable electronic devices / O.G. Gulahmadov, H.M.Mamedov, J.Kim // Journal of Baku Engineering University – Physics, -2022. 6, No2, -p.51-57.

21. Mammadova, N.C., Gulahmadov, O.G. Investigation of $TiO_2/$ Nylon nanocomposites on the performance of triboelectric nanogenerators // Ümummilli Lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 100-cü ildönümünə həsr olunmuş "Gələcəyin alimləri" mövzusunda tələbələrin VIII respublika Elmi Konfransı, – Bakı: – 12 Aprel, – 2023, – s. 81-82.

22. Gulahmadov, O.G., Mamedov, H.M., J.Kim, Preparation of Nylon/TiO₂ nanocomposite materials by a spray coating method and investigation of its effect on the performance of triboelectric nanogenerators // Dedicated to the 100th Anniversary of the National leader of Azerbaijan, Heydar Aliyev VII International Scientific Conference of young Researchers, – Baku: – 28 – 29 April, – 2023, – p.41–45.

23. Gulahmadov, O.G., Mamedov, H.M., Muradov, M.B., Mammadyarova, S.J., Kim, J. Investigation of triboelectric nanogenerator based on Nylon/Fe₃O₄ nanocomposite material for monitoring of transmission lines // Ümummilli Lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 100 illik yubileyinə həsr olunmuş "Fizika və astronomiyanın problemləri" mövzusunda Magistrantların və Gənc Tədqiqatçıların XXIII Respublika Elmi Konfransı, – Bakı: – 25 May, – 2023, – p.140–141.

24. Gulahmadov, O.G., Muradov, M.B., Mamedov, H.M., Mammadyarova, S.C., Karimova, A.H., Kim, J. Effect of magnetic nanoparticles on the performance of triboelectric nanogenerator / Nanoscience & Nanotechnology Conference, –Rome: – 29 May – 1 June, – 2023, – p.35-36.

25. Gulahmadov, O.G., Muradov, M.B., Mamedov, H.M., Mammadyarova, S.C., Karimova, A.H., Gahramanli, L.R., Kim, J. Effect of magnetic nanoparticles on the performance of triboelectric nanogenerator / 19^{th} International Conference on Thin Films, ICTF2023, –Burgos: -26 - 29 September, -2023, -p.38.

26. Gulahmadov, O.G., Mamedov, H.M., Muradov, M.B., Kim, J. Fabrication and Performance of a Triboelectric Nanogenerator based on Hot-Pressed Nylon/Fe₃O₄ Nanocomposite Films for Sustainable Energy Harvesting / 10^{th} International Conference on Materials Science

and Nanotechnology for Next Generation, MSNG2023, –Kayseri: – 27 – 29 September, – 2023, – p.56.

27. Gulahmadov, O.G., Muradov, M.B., Mamedov, H.M., Gahramanli, L.R., Kim, J. Self-Powered Transmission Line Monitoring Sensors Based On Triboelectric Nanogenerators With Magnetic Nanoparticles/Nylon Nanocomposite Films / VIII International Conference MTP-2023: Modern Trends in Physics dedicated to the 100th anniversary national leader of the Azerbaijani people Heydar Aliyev, –Baku: – 30 November – 1 December, – 2023, – p.40–41.

28. Gulahmadov, O.G., Enhancement of triboelectric nanogenerators with nylon/TiO₂ nanocomposite films / O.G.Gulahmadov, M.B.Muradov, H.M.Mamedov [et al.] // MRS Communications, -2023. 14, No1, -p.114–120.

Dissertasiyanın müdafiəsi **06 iyun 2024**-cü il tarixində saat 15³⁰-da Bakı Dövlət Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən BFD 2.19 Dissertasiya şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: Bakı şəhəri, Z. Xəlilov küç. 23, əsas bina, Az 1148.

Dissertasiya ilə Bakı Dövlət Universitetinin Elmi kitabxanasında tanış olmaq mümkündür.

Dissertasiya və avtoreferatın elektron versiyaları Bakı Dövlət Universitetinin rəsmi internet saytında yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat <u>03</u> may 2024-cü il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

 Çapa imzalanıb:
 09.04.2024

 Kağızın formatı:
 A5 (60x90 1/16)

 Həcm:
 37 883 işarə

 Tiraj:
 100 nüsxə