o‘quvchilarda matematik tafakkurni rivojlantirish, masalaga turli nuqtai nazardan qarash va murakkab masalalarni sodda ko‘rinishga keltirish ko‘nikmalarini shakllantirishda muhim ahamiyatga ega.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati:

[1]. Xudoyberganov G., Vorisov A., Mansurov X., Shoimulov B. Matematik analizdan ma’ruzalar. “Voris” nashriyoti, Toshkent, 2010, 2;45–48-betlar.

[2]. Azlarov T., Mansurov X., Matematik analiz. 1-qism, “O‘qituvchi”, Toshkent, 1994, 5;110–115-b.

[3]. Terence Tao. Analysis I, Graduate Studies in Mathematics, vol. 37, American Mathematical Society, Providence, RI, 2006, 3;75–80-betlar.

[4]. Gelca, R., Andreescu. T., Putnam and Beyond, Springer, New York, 2007, 1;30–32-betlar.

[5]. Titu Andreescu, Vasile Cirtoaje. Mathematical Olympiad Challenges. Boston: Birkhäuser, 2000, 6;152–155-betlar.

(6). Andreescu T., Gelca R. Mathematical Olympiad Challenges. Boston: Birkhäuser, 2000.

Sadullayev Jurabek Oybekovich (UrDU tayanch doktoranti), Axmedov Munisbek Muhammad o‘g‘li, Vapayev Murodbek Ergashovich, Davletov Ikram Yusubovich (UrDU Texnika fakulteti)

GRAFEN ISHLAB CHIQARISH JARAYONIDA HARORAT MAYDONI VA ISSIQLIK TARQATILISHINING TAHLILI

Annotatsiya. *Ushbu tadqiqotda millisekundlik impulsli lazer nurlanishi ostida poliimid substratida grafen hosil bo‘lishi paytida harorat maydoni va issiqlik uzatilishi raqamli modellashtirish yordamida o‘rganildi. Vaqtga bog‘liq issiqlik uzatish tenglamasi Gauss issiqlik manbai bilan yechildi. Natijalar lazer parametrlari va skanerlash tezligi issiqlik to‘planishiga va grafen sintezi uchun kritik harorat zonasining shakllanishiga sezilarli ta’sir ko‘rsatishini ko‘rsatadi. Olingan natijalar lazer bilan induksiyalangan grafen ishlab chiqarish jarayonlarini optimallashtirish uchun ilmiy asos yaratadi.*

Kalit so‘zlar: *grafen sintezi, harorat maydoni, issiqlik tarqalishi, raqamli modellashtirish, COMSOL multifizikasi, lazer bilan induksiyalangan grafen, issiqlik uzatish.*

Садуллаев Джурабек Ойбекович (аспирант УрГУ), Ахмедов Мунисбек Мухаммад оглы, Вапаев Муродбек Эргашович, Давлетов Икрам Юсубович (УрГУ)

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ И ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА ГРАФЕНА

Аннотация. *В данном исследовании с помощью численного моделирования изучались температурное поле и теплопередача в процессе формирования графена на полиимидной подложке под воздействием миллисекундного импульсного лазерного излучения. Было решено зависящее от времени уравнение теплопередачи с гауссовым источником тепла. Результаты показывают, что параметры лазера и скорость сканирования оказывают существенное влияние на накопление тепла и формирование критической температурной зоны для синтеза графена. Полученные результаты обеспечивают научную основу для оптимизации процессов лазерно-индуцированного производства графена.*

Ключевые слова: *синтез графена, температурное поле, теплоотдача, численное моделирование, COMSOL Multiphysics, лазерно-индуцированный графен, теплопередача.*

Sadullayev Jurabek Oybekovich (UrSU, basic doctoral student), Akhmedov Munisbek Muhammad oglu, Vapayev Murodbek Ergashovich, Davletov Ikram Yusubovich (UrSU)

ANALYSIS OF TEMPERATURE FIELD AND HEAT DISTRIBUTION IN THE GRAPHENE PRODUCTION PROCESS

Annotation. *In this study, the temperature field and heat transfer during graphene formation on a polyimide substrate under millisecond pulsed laser irradiation were studied using numerical modeling. The time-dependent heat transfer equation was solved with a Gaussian heat source. The results show that the laser parameters and scanning speed have a significant effect on heat accumulation and the formation of a critical temperature zone for graphene synthesis. The obtained results provide a scientific basis for optimizing laser-induced graphene production processes.*

Keywords: *Graphene synthesis, temperature field, heat dissipation, numerical modeling, COMSOL multiphysics, laser-induced graphene, heat transfer.*

Kirish. So‘nggi yillarda grafen o‘zining yuqori elektr va issiqlik o‘tkazuvchanligi, mexanik mustahkamligi hamda atom darajasidagi yupqaligi tufayli materialshunoslikda keng e’tibor qozondi [1,2]. Ushbu xossalar uni nanoelektronika, energiya saqlash va sensor texnologiyalarida istiqbolli materialga aylantirdi

[3]. Grafen mexanik, termik va lazerli usullar orqali sintez qilinadi [4]. Ushbu jarayonlarda harorat asosiy boshqaruvchi omil bo‘lib, u grafenning tuzilishi va sifatiga bevosita ta’sir ko‘rsatadi [5]. Haroratning notekis taqsimlanishi grafen qatlamining bir jinsli bo‘lmasligiga olib kelishi mumkin [6]. So‘nggi yillarda lazerli grafen (Laser-Induced Graphene, LIG) texnologiyasi alohida ahamiyat kasb etmoqda [7,8]. Lazer ta’sirida hosil bo‘ladigan tezkor va lokal qizish grafen strukturasining shakllanishiga hal qiluvchi ta’sir ko‘rsatadi.

Shunga qaramay, grafen hosil bo‘lish jarayonida harorat maydonining vaqtga bog‘liq o‘zgarishi va issiqlik tarqalishining kompleks sonli tahliliga bag‘ishlangan ishlar yetarli emas. Ayniqsa, lokal qizdirish sharoitida issiqlik yig‘ilishi va tarqalishining grafen hosil bo‘lish mexanizmiga ta’siri chuqur o‘rganilmagan [9, 10, 11].

Biroq mavjud tadqiqotlarning aksariyati eksperimental natijalarga tayangan bo‘lib, grafen hosil bo‘lish jarayonida haroratning vaqt va fazo bo‘yicha taqsimlanishi yetarlicha o‘rganilmagan. Shu sababli issiqlik jarayonlarini COMSOL muhitida sonli modellashtirish dolzarb hisoblanadi. Mazkur ishda millisekund impulsli lazerda skanerlash tezligining issiqlik yig‘ilishiga ta’siri vaqtga bog‘liq issiqlik uzatilishi tenglamasi asosida sonli tarzda baholandi.

Issiqlik uzatilishining umumiy differensial tenglamasi quyidagi ko‘rinishda yoziladi:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla * (\mathrm{k}\nabla \mathrm{T}) + \mathrm{Q} \quad (1)$$

bu yerda: T=T(x,y,z,t) – harorat, ρ – material zichligi, C_P – solishtirma issiqlik sig‘imi, k – issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti, Q – ichki yoki tashqi issiqlik manbayi.

Issiqlik manbayi Q tashqi energiya ta’sirini ifodalaydi va lazer yoki intensiv qizdirish holatida fazoda Gauss tipidagi taqsimot bilan ifodalaymiz:

$$Q(x,y,z,t) = Q_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right) f(t) \quad (2)$$

bu yerda: Q_0– maksimal issiqlik manbayi intensivligi, r – markazdan radial masofa, ω – energiya ta’sir radiusi, $f(t)$ – vaqt bo‘yicha ta’sir funksiyasi.

Boshlang‘ich shart quyidagicha aniqlanadi:

$$T(x,y,z,0) = T_0 \quad (3)$$

bu yerda T_0 – materialning boshlang‘ich harorati.

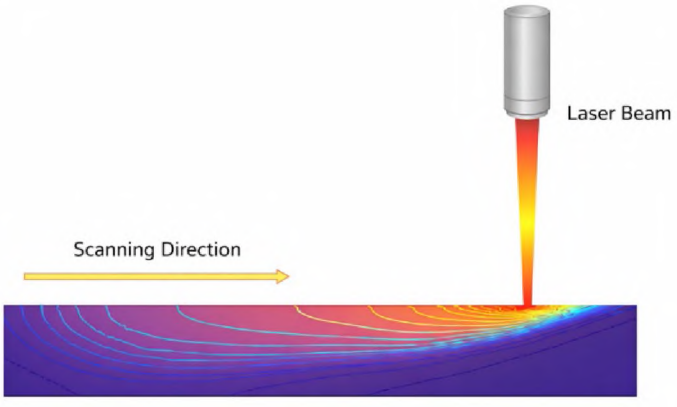
Chegaraviy sharoitlarda material sirtidan issiqlikning atrof-muhitga uzatilishi konveksiya va nurlanish orqali hisobga olinadi. Konvektiv issiqlik uzatilishi esa quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$-k\nabla T * n = h(T - T_{amb}) \quad (4)$$

bu yerda: h – konvektiv issiqlik uzatish koeffitsiyenti, T_{amb} – atrof-muhit harorati.

Ushbu tadqiqotning ilmiy yangiligi shundan iboratki, millisekund impulsli lazer ta’siri ostida polimid substratda grafen hosil bo‘lish jarayonida harorat maydonining vaqt va fazo bo‘yicha evolutsiyasi ilk bor skanerlash tezligini hisobga olgan holda, sonli modellashtirish asosida tahlil qilindi. Gaussian issiqlik manbai modeli yordamida kritik harorat zonalarining shakllanishi aniqlanib, grafen hosil bo‘lishi uchun optimal skanerlash tezligi diapazoni belgilandi. Olingan natijalar lazerli grafen sintezi jarayonini optimallashtirishda harorat yig‘ilishi mexanizmlarini chuqurroq tushunishga imkon beradi.

Tadqiqot metodologiyasi.



1-rasm. Exprimental sxema.

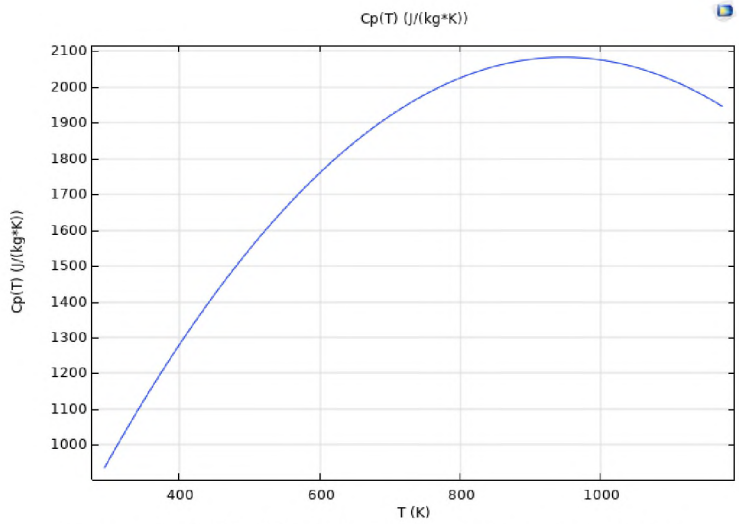
Grafen hosil bo‘lish jarayonida harorat maydoni va issiqlik tarqalishini o‘rganish uchun sonli modellashtirish COMSOL Multiphysics dasturiy muhiti yordamida amalga oshirildi. Ushbu dastur ko‘p fizikaviy jarayonlarni yagona hisoblash muhitida tahlil qilish imkonini berishi bilan ajralib turadi va issiqlik uzatilishi bilan bog‘liq masalalarda keng qo‘llaniladi.

Material xossalari sifatida zichlik, issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti va issiqlik sig‘imi kiritildi. 2-rasmda issiqlik sig‘imining temperaturaga bog‘lanishi keltirilgan. Bu yondashuv yuqori haroratlarda yuzaga keladigan issiqlik jarayonlarini realroq ifodalash imkonini beradi.

Sonli modellashtirishda millisekund impulsli lazer nurlanishi Gaussian fazoviy taqsimotga ega issiqlik manbai sifatida qabul qilindi. Lazerning to‘lqin uzunligi $\lambda = 1064$ nm bo‘lib, impuls davomiyligi $\tau = 50$ ms deb olindi. Lazer nuri radiusi $r_0 = 75$ μm etib belgilandi. Lazer quvvati $P = 8–12$ W oralig‘ida o‘zgartirilib, energiyaning material tomonidan yutilishi polimid uchun mos yutilish koeffitsiyenti hisobga olingan holda kiritildi.

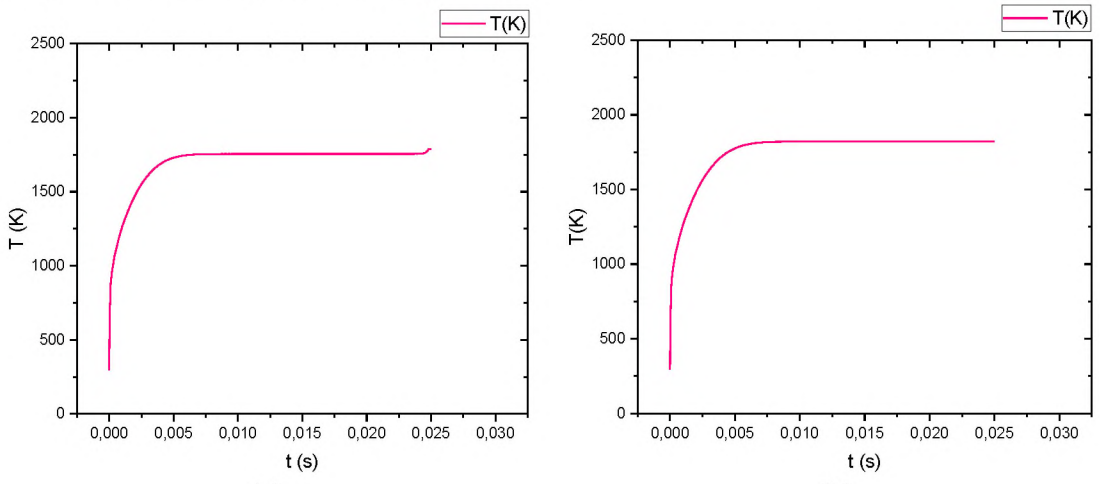
Lazer impulslari skanerlash rejimida material sirtiga ta’sir etib, nurning harakat tezligi $v = 40–55$ mm/s diapazonida 5 mm/s qadam bilan o‘zgartirildi. Har bir nuqtada lazer ta’sirining samarali davomiyligi skanerlash tezligi va nurlanish radiusi orqali aniqlanib, issiqlik yig‘ilishi effekti vaqtga bog‘liq issiqlik uzatilishi tenglamasi orqali baholandi. Ushbu parametrlar lazerli grafen sintezida keng qo‘llaniladigan real eksperimental sharoitlarga mos ravishda tanlandi [3,5].

Boshlang‘ich shart sifatida butun hisoblash sohasida material harorati atrof-muhit haroratiga teng deb qabul qilindi.

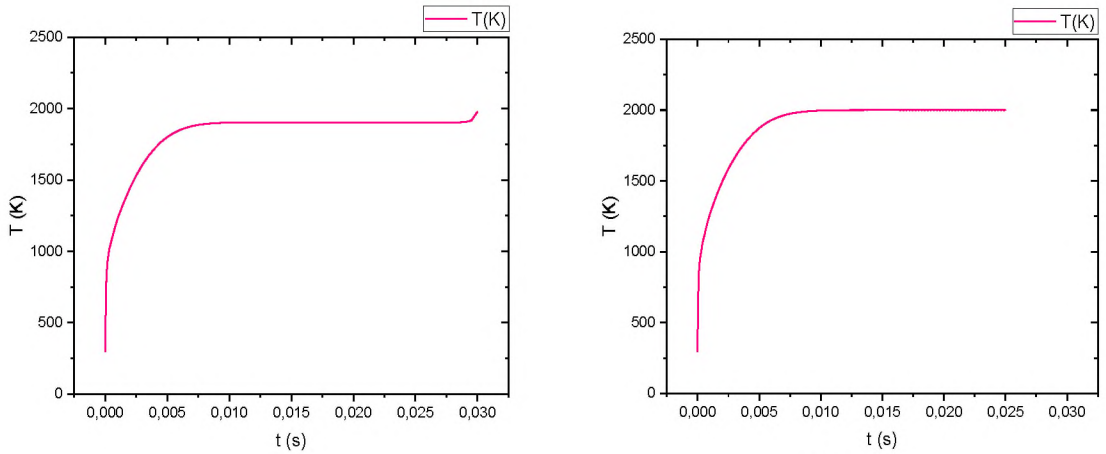


2-rasm. Issiqlik sig‘imining temperaturaga bog‘liqligi.

Tahlil va natijalar. Ushbu ishda millisekund impulsli lazer yordamida grafen hosil bo‘lish jarayonida issiqlik tarqalishi va harorat maydonining fazoviy hamda vaqt bo‘yicha o‘zgarishi COMSOL Multiphysics muhitida sonli modellashtirish orqali o‘rganildi.



(a) **(b)**

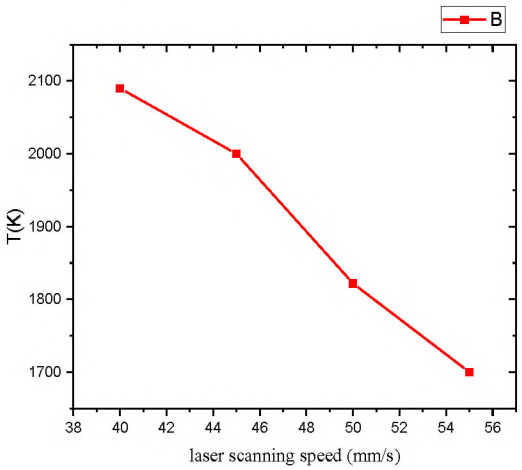


(c) **(d)**

3-rasm. Haroratning vaqat bo‘yicha o‘zgarishi. Skanerlash tezligi: a) 55 mm/s; b) 50 mm/s; d) 45mm/s; e) 40 mm/s.

Hisoblash natijalari lazer nuri tushgan hududda haroratning keskin ortishini ko‘rsatadi. Skanerlash tezligi 55 mm/s bo‘lganda, maksimal harorat qiymati ~1700 K ga yetib, lazer nuri markazida shakllanadi. Hosil bo‘lgan issiqlik energiyasi material chuqurligi va skanerlash yo‘nalishi bo‘ylab tarqalib, lazer markazidan uzoqlashgan sari, harorat gradientlari kamayadi. Issiqlik tarqalishining vaqtga bog‘liq evolutsiyasi 3-a rasmda ko‘rsatilgan. Ushbu sharoitda polimid sirtida grafen hosil bo‘lishi boshlanadi, biroq issiqlikning yetarlicha barqaror bo‘lmasligi sababli grafen strukturasida nuqsonlar saqlanib qoladi.

Skanerlash tezligi 40 mm/s.gacha kamaytirilganda, maksimal harorat ~2100 K ga yetib (3-d rasm), grafen qatlamining barqaror va bir jinsli shakllanishi uchun qulay sharoit yuzaga keladi hamda natijalar avvalgi eksperimental ma’lumotlar bilan mos keladi. Millisekund impuls davomiyligi tufayli issiqlik materialning ichki qatlamlariga ham tarqalib, harorat grafitlash uchun zarur bo‘lgan kritik qiymatlardan (T > 2000 K) oshadi. Sovish jarayonining nisbatan sekin kechishi uglerod atomlarining sp^2-gibridlangan tuzilmalarga qayta tashkil topishiga imkon yaratadi.



4-rasm. Skanerlash tezliginng maksimal temperaturaga bog‘liqligi.

Lazer skanerlashi natijasida hosil bo‘ladigan assimmetrik va cho‘zilgan yuqori harorat zonasi grafen qatlamining uzluksiz va bir jinsli shakllanishiga ijobiy ta’sir ko‘rsatadi.

Olingan sonli natijalar avval e’lon qilingan eksperimental tadqiqotlar bilan sifat jihatidan solishtirildi. Xususan, Lin va hammualliflar tomonidan olib borilgan lazerli grafen sintezi bo‘yicha ishlarda polimer substratda grafen hosil bo‘lishi uchun zarur bo‘lgan kritik harorat 2000–2500 K oralig‘ida ekanligi ko‘rsatilgan [3]. Ushbu ishda olingan maksimal harorat qiymatlari (≈1700 K va ≈2100 K) mazkur eksperimental natijalar bilan yaxshi mos keladi.

Shuningdek, Y. va Tour tomonidan keltirilgan tadqiqotlarda lazerli grafen hosil bo‘lish jarayonida harorat yig‘ilishi va sovish tezligining grafen strukturasining sifati va bir jinsliligiga bevosita ta’sir ko‘rsatishi ta’kidlangan [5]. Ushbu modellashtirish natijalari ham skanerlash tezligi kamayganda haroratning

barqarorroq kritik zonasi shakllanishini ko‘rsatib, eksperimental kuzatuvlarni tasdiqlaydi. Bu holat taklif etilgan modelning fizik jihatdan asoslangan va real jarayonni yetarli darajada ifodalay olishini ko‘rsatadi.

Mazkur modellashtirishda grafen hosil bo‘lish jarayoni haroratning kritik qiymatdan ($T \gtrsim 2000$ K) oshishi orqali baholandi. Biroq amalda polimid substratning grafitlash va grafenlash jarayoni nafaqat maksimal harorat, balki lazer ta’sirining davomiyligi, sovish tezligi hamda uglerod atomlarining qayta tashkil topish kinetikasiga ham bog‘liq ekanligi ma’lum. Ushbu ishda kimyoviy parchalanish va fazaviy o‘zgarishlar kinetikasi alohida hisobga olinmagan bo‘lib, ularning ta’siri harorat maydonining vaqt bo‘yicha evolutsiyasi orqali bilvosita inobatga olindi. Shunga qaramay, olingan natijalar yuqori harorat zonalarining davomiyligi va barqarorligi grafen qatlamining bir jinsli shakllanishi uchun hal qiluvchi omil ekanini ko‘rsatadi.

Xulosa va takliflar. Ushbu ishda millisekund impulsli lazer ta’siri ostida polimid substratda grafen hosil bo‘lish jarayonidagi harorat maydoni sonli modellashtirish orqali tahlil qilindi. Gaussian issiqlik manbayi asosida lazer parametrlari va skanerlash tezligining issiqlik jarayonlariga ta’siri aniqlandi. Natijalar skanerlash tezligi grafen hosil bo‘lishida hal qiluvchi omil ekanini ko‘rsatdi: 55 mm/s.da maksimal harorat ~1750 K bo‘lib, barqaror struktura uchun yetarli emas, 40 mm/s.da esa~2100 Kga yetib, grafen qatlamining bir jinsli va barqaror shakllanishi uchun optimal sharoit yuzaga keladi. Tezlikning ortiqcha kamayishi issiqlik yig‘ilishini kuchaytirib, material shikastlanishiga olib kelishi mumkin.

Olingan natijalar lazerli grafen sintezida kritik harorat zonasi va optimal skanerlash tezligi mavjudligini tasdiqlab, avvalgi eksperimental ma’lumotlar bilan mos keladi hamda jarayonni optimallashtirish uchun muhim nazariy asos yaratadi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati:

[1]. Reina A., Jia X., Ho J., Nezich D., Son,H., Bulovic V., Dresselhaus M.S., Kong J. Large area, few-layer graphene films on arbitrary substrates by chemical vapor deposition. Nano Letters, 9(1), p. 30–35 (2009).

[2]. Vlassiouk I., Regmi M., Fulvio P., Dai S., Datskos P., Eres G., Smirnov S. Role of hydrogen in chemical vapor deposition growth of large single-crystal graphene. Carbon, 54, p. 58–67 (2013).

[3]. Lin J., Peng Z., Liu Y., Ruiz-Zepeda F.Y.R., Samuel, E.L.G., Yacaman M.J., Yakobson B.I., Tour J.M. Laser-induced porous graphene films from commercial polymers. Nature Communications, 5, 5714 (2014).

[4]. Tour J.M. Laser-induced graphene. ACS Nano, 8(11), 10728–10732 (2014).

[5]. Ye, R., James, D. K., Tour, J. M. Laser-induced graphene: From discovery to translation. Carbon, 118, p. 640–651 (2017).

[6]. Bae S., Kim H., Lee Y., Xu X., Park J.-S., Zheng Y., Balakrishnan J., Lei T., Kim H. R., Song Y.I., Kim Y.-J., Kim K.S., Özyilmaz B., Ahn J.-H., Hong B.H., Iijima S. Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes. Nature Nanotechnology, 5, p. 574–578 (2010).

[7]. Reddy J.N. An Introduction to the Finite Element Method. 3rd Edition, McGraw-Hill Education, New York, USA, p. 26–28 (2014).

[8]. Kim H. et al. COMSOL modeling of LIG heat transfer. Carbon, 210, 118456 (2025).

[9]. Zhang Y., et al. Recent advances in laser-induced graphene: synthesis, properties, and applications. Carbon, p. 163, 256–289 (2020).

[10]. Wang M., et al. Laser-induced graphene: preparation, functionalization and applications. Carbon, 182, p. 14–45 (2021).

[11]. Smith J. et al. Millisecond laser graphene optimization. Advencet materials, 36, e2400123(2025).

Saydaliyev Abdulbori Abdulvohid o‘g‘li (Namangan davlat Pedagogika instituti o‘qituvchisi; E-mail: abdulborisaydaliyev21@gmail.com),

Yunusov Odiljon Maxmudjon o‘g‘li (O‘zbekiston Fanlar akademiyasi Fizika-texnika instituti, Chingiz Aytmatov ko‘chasi, 2^{b}-uy, 100084, Toshkent, O‘zbekiston),

Xoshimov Adxamjon, Sharifbayev Raximjon Nosir o‘g‘li, Xurshud Madaliyev, Mo‘minov Xurshidbek Adhamjon o‘g‘li (Namangan davlat Texnika universiteti, Namangan shahar, Islom Karimov ko‘chasi, 12-uy),

Knyazev Mixail Aleksandrovich (Belarussiya Milliy Texnika universiteti)

DISKRET WAVELET TRANSFORMATSIYA ASOSIDA TEXNIK KELIB CHIQADIGAN TENSO VA VIBROMETRIK SIGNALLARNING STOCHASTIC MODELLASHTIRILISHI VA DIAGNOSTIK XUSUSIYATLARI

Annotatsiya. *Murakkab mexanik tizimlarning texnik holatini erta aniqlash sanoat xavfsizligi va ekspluatatsion samaradorlikni oshirishda muhim ahamiyatga ega. Ushbu tadqiqotda tensometrik deformatsiya va vibratsion signallarning ko‘p masshtabli hamda no-statsionar xususiyatlarini aniqlash uchun diskret wavelet transformatsiyaga asoslangan matematik model ishlab chiqildi. Signal Hilbert fazosida stochastic differensial tenglama orqali generativ jarayon sifatida qaraldi, impulsli nosozliklar esa Dirak delta*