UO‘K 534.21;538.951

NANOSUYUQLIKLARDAN TOVUSH TO‘LQINLARI O‘TGANDA ENERGIYANING SO‘NISH MEXANIZMLARI VA ULARNING NAZARIY TAHLILI

Soliyeva Nilufar Mashrabboy qizi,
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi
Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti
stajor-tadqiqotchisi
nilufarsoliyeva90gmail.com

Annotatsiya. *Mazkur maqolada nanosuyuqliklardan ultratovush to‘lqinlari o‘tganda yuzaga keladigan energiyaning so‘nish mexanizmlari nazariy jihatdan o‘rganilgan. Zamonaviy ilmiy adabiyotlarni o‘rganish va mavjud nazariy yondashuvlarni qiyosiy tahlil qilish asosida Stoks-Kirxgofning klassik gidrodinamik so‘nishi, termal relaksatsiya, visko-inersion mexanizmlar hamda Reley sochilishi jarayonlari batafsil ko‘rib chiqilgan. Shuningdek, ularni tavsiflovchi asosiy matematik formulalar keltirilib, tizimning chastotaviy va struktura parametrlarga bog‘liqligi aniqlangan. Olingan nazariy natijalar nanosuyuqliklarning akustik xossalarini tahlil qilish va ularni zamonaviy texnologiyalarda qo‘llash imkoniyatlarini yanada kengaytirishda muhim ilmiy-amaliy ahamiyat kasb etadi.*

Kalit so‘zlar: *nanosuyuqlik, tovush to‘lqini, so‘nish koeffitsiyenti, termal relaksatsiya, viskozlik, Reley sochilishi, akustika.*

МЕХАНИЗМЫ ЗАТУХАНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЗВУКОВЫХ ВОЛН ЧЕРЕЗ НАНОЖИДКОСТИ И ИХ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Аннотация. *В данной статье теоретически рассмотрены механизмы затухания энергии при прохождении ультразвуковых волн через наножидкости. На основе анализа современной научной литературы и сравнительного изучения существующих подходов подробно рассмотрены классическое гидродинамическое затухание Стокса-Кирхгофа, термическая релаксация, вязко-инерционные механизмы, а также процессы релеевского рассеяния. Приведены основные математические формулы, описывающие данные процессы, и определена зависимость характеристик системы от частотных и структурных параметров. Полученные теоретические результаты имеют важное научно-практическое значение для анализа акустических свойств наножидкостей и расширения возможностей их применения в современных технологиях.*

Ключевые слова: *наножидкость, звуковая волна, коэффициент затухания, термальная релаксация, вязкость, релеевское рассеяние, акустика.*

ENERGY ATTENUATION MECHANISMS OF SOUND WAVES PROPAGATING THROUGH NANOFLUIDS AND THEIR THEORETICAL ANALYSIS

Abstract. *This paper theoretically examines the energy attenuation mechanisms that occur when ultrasonic waves propagate through nanofluids. Based on a modern literature review and a comparative analysis of existing approaches, the classical Stokes-Kirchhoff hydrodynamic attenuation, thermal relaxation, visco-inertial mechanisms, and Rayleigh scattering processes are discussed in detail. The fundamental mathematical formulas describing these processes are presented, and the dependence of system characteristics on frequency and structural parameters is determined. The obtained theoretical results are of significant scientific and practical importance for analyzing the acoustic characteristics of nanofluids and expanding their application potential in modern technologies.*

Keywords: *nanofluid, sound wave, attenuation coefficient, thermal relaxation, viscosity, Rayleigh scattering, acoustics.*

Kirish. Nanosuyuqliklar – bu bazaviy suyuqlik (suv, etilen-glikol, moy va boshqalar) ichiga nanoo‘lchamdagi (1–100 nm) qattiq zarrachalar dispersiyalangan kolloid tizimlardir. So‘nggi yillarda nanosuyuqliklarning issiqlik fizikasi, gidrodinamikasi va akustik xususiyatlarini o‘rganishga bo‘lgan qiziqish keskin ortdi. Xususan, ulardan ultratovush to‘lqinlari o‘tganda to‘lqin energiyasining so‘nishi (absorbsiyasi va sochilishi) muhim ilmiy-amaliy masalalardan biridir. Hozirgi kunda issiqlik almashinuv jarayonlarini intensivlashtirish va zamonaviy texnologiyalarda yuqori termofizik xususiyatga ega nanosuyuqliklarni

qo‘llash jadal rivojlanmoqda. Shu bilan birga, ularning fizik-kimyoviy xossalarini buzmagan holda tezkor nazorat qilishda akustik va ultratovush diagnostika usullari eng ustuvor yo‘nalishlardan biri hisoblanadi.

Tovush to‘lqinlarining nanosuyuqliklarda so‘nishi faqat bazaviy suyuqlikning xususiyatlariga emas, balki nanozarrachalarning o‘lchami, shakli, konsentratsiyasi, shuningdek, zarracha bilan suyuqlik orasidagi termodinamik va mexanik o‘zaro ta’sirlarga bog‘liq. Akustik usullar nanosuyuqliklarning strukturasini buzmasdan ularning fizik-kimyoviy xossalarini tekshirish imkonini beradi. Tadqiqotning ilmiy yangiligi shundaki, unda nanosuyuqliklardagi energiyaning so‘nish jarayoni faqat bitta mexanizm doirasida emas, balki Stoks-Kirxgof, termal relaksatsiya, visko-inersion va Reley sochilishi mexanizmlarining o‘zaro qo‘shma ta’siri nuqtayi nazaridan kompleks qiyosiy tahlil qilingan. Nanosuyuqliklarda akustik to‘lqinlarning tarqalishi va energiyaning so‘nish qonuniyatlarini o‘rganish bo‘yicha so‘nggi yillarda ko‘plab ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilgan bo‘lib, keng qamrovli adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, bu jarayon bir nechta raqobatdosh mexanizmlar majmuidan iborat. Ilmiy manbalarda asosan Stoks-Kirxgofning klassik gidrodinamik modeli, Epstein-Carstens va Allegra-Settii kabi termal-viskoz relaksatsiya nazariyalari hamda Reley sochilish qonuniyatlari keng o‘rganib chiqilgan. Mavjud adabiyotdagi yondashuvlarni o‘zaro taqqoslaganda quyidagi farqlar ko‘zga tashlanadi:

Klassik yondashuvlar faqat bir jinsli muhitlar uchun mos kelib, nanozarrachalarning o‘lchami va relaksatsiya effektlarini to‘liq qamrab ololmaydi.

Termal va visko-inersion modellar esa zarracha va suyuqlik orasidagi harorat hamda tezliklar gradiyentini hisobga olishi bilan ustunlik qiladi, biroq ular murakkab chastotaviy bog‘liqliklarga ega.

Ushbu obzorda tahlil qilingan adabiyotlar shuni ko‘rsatadiki, turli zarracha o‘lchamlari va konsentratsiyalarida qaysi so‘nish mexanizmi ustuvor kelishini aniqlashda yagona qiyosiy yondashuv zarur bo‘lib, quyida ana shu mexanizmlarning nazariy taqqosi keltiriladi.

Klassik gidrodinamik so‘nish (Stoks-Kirxgof mexanizmi). Oddiy suyuqliklarda tovush to‘lqinining so‘nishi asosan qovushqoqlik (viskozlik) va issiqlik o‘tkazuvchanlik jarayonlari bilan belgilanadi. Nanosuyuqliklar uchun bu ko‘rsatkichlar zarrachalar mavjudligi sababli o‘zgaradi va samarali qovushqoqlik (η_{eff}) hamda samarali issiqlik o‘tkazuvchanlik (k_{eff}) tushunchalari kiritiladi.

Klassik so‘nish koeffitsiyenti ($\alpha_{klassik}$) quyidagi Stoks-Kirxgof formulasi yordamida aniqlanadi:

$$\alpha_{klassik} = \frac{\omega^2}{2\rho_0 v_s^3}\left[\frac{4}{3}\eta_{eff} + (\gamma - 1)\frac{k_{eff}}{C_p}\right]$$

Bu yerda:

$\omega = 2\pi f$—siklik chastota (f — tovush chastotasi);

$2\rho_0$—nanosuyuqlikning zichligi;

v_s—tovush to‘lqinining fazaviy tezligi;

γ—adiabatik ko‘rsatkich (C_ρ / C_V);

C_p—solishtirma issiqlik sig‘imi.

Bu mexanizm to‘lqin tarqalishi paytida hosil bo‘ladigan siqilish va kengayish sikllarida mexanik energiyaning qovushqoq ish tufayli issiqlikka aylanishini ifodalaydi.

Termal relaksatsiya mexanizmi. Nanosuyuqliklarda tovush to‘lqini o‘tayotganda mahalliy bosim va harorat o‘zgarishlari ro‘y beradi. Nanozarrachaning issiqlik o‘tkazuvchanligi va issiqlik sig‘imi uni o‘rab turgan bazaviy suyuqliknikidan farq qilgani sababli, zarracha va suyuqlik chegarasida harorat gradiyenti yuzaga keladi. Natijada, issiqlik oqimi paydo bo‘lib, energiya yo‘qolishiga olib keladi.

Termal relaksatsiya vaqti (τ_T) quyidagi formula bilan belgilanadi:

$$\tau_T = \frac{R^2}{D_T}$$

Bu yerda:

R—nanozarrachaning radiusi;

D_T—zarrachaning termal diffuziya koeffitsiyenti ($D_T = k / (\rho C)_\rho$).

Termal so‘nish koeffitsiyenti (α_{therm}) chastotaning ortishi bilan keskin ortadi va zarracha o‘lchamining kvadratiga teskari proportsional ravishda o‘zgaradi.

Visko-inersion (mexanik relaksatsiya) mexanizmi. Tovush to‘lqini fronti o‘tayotganda suyuqlik muhiti tezlik bilan tebranadi. Zarrachaning massasi (inertligi) mavjud bo‘lgani sababli, uning tebranish tezligi suyuqlikning tebranish tezligidan farq qilishi mumkin (siljish effekti). Bu tezliklar farqi zarracha atrofida qovushqoq to‘lqinlarning tarqalishiga va qo‘shimcha energiya yo‘qolishiga sabab bo‘ladi.

Mexanik relaksatsiya vaqti (τ_v) quyidagicha ifodalanadi:

$$\tau_v = \frac{R^2}{9\nu_f}$$

Bu yerda:

ν_f—bazaviy suyuqlikning kinematik qovushqoqligi.

Bu mexanizm, ayniqsa, yuqori chastotali ultratovush diapazonida o‘ta sezilarli bo‘lib, nanozarrachalarning suyuqlik ichidagi harakatchanligini baholashda muhim rol o‘ynaydi.

Reley sochilishi (Rayleigh scattering). Agar nanozarrachalarning o‘lchami tovush to‘lqin uzunligidan (λ) sezilarli darajada kichik bo‘lsa (R≪λ), tovush to‘lqinlari zarrachalar tomonidan har tomonga tarqaladi (sochiladi). Sochilish jarayoni to‘lqin energiyasining asosiy yo‘nalishdan chetga chiqishiga va natijada to‘lqinning so‘nishiga olib keladi.

Reley sochilishi bo‘yicha so‘nish koeffitsiyenti (α_{scat}) quyidagi qonuniyatga bo‘ysunadi:

$$\alpha_{scat} \sim \phi \cdot k^4 R^3$$

Bu yerda:

Φ – nanozarrachalarning hajmiy konsentratsiyasi;

$k = \frac{\omega}{v_s}$—to‘lqin soni.

Ko‘rinib turibdiki, sochilish orqali so‘nish chastotaning to‘rtinchi darajasiga (ω^4) to‘g‘ridan-to‘g‘ri proporsionaldir.

Umumiy so‘nish koeffitsiyenti. Nanosuyuqliklardan tovush to‘lqinlari o‘tganda kuzatiladigan umumiy so‘nish koeffitsiyenti (α_{total}) yuqorida keltirilgan mustaqil mexanizmlarning hissalarini yig‘ish orqali aniqlanadi:

$$\alpha_{total} = \alpha_{klassik} + \alpha_{therm} + \alpha_{visco} + \alpha_{scat}$$

Ushbu yig‘indi tenglama eksperimental natijalarni nazariy jihatdan tushuntirishda asosiy poydevor hisoblanadi.

Nanosuyuqliklarda ultratovush to‘lqinlarining so‘nish jarayonini har tomonlama o‘rganish maqsadida asosiy mexanizmlarning qiyosiy xarakteristikalari jadvalda keltirilgan. Tahlillar shuni ko‘rsatadiki, har bir mexanizm o‘zining fizik tabiati, ta’sir etuvchi parametrlari hamda chastotaga bog‘liqligi bilan ajralib turadi.

Xususan, klassik Stoks-Kirxgof mexanizmi chastotaning kvadratiga proporsional holda umumiy fonni tashkil etsa, termal relaksatsiya va visko-inersion mexanizmlar nanozarracha va bazaviy suyuqlik orasidagi termodinamik hamda kinematik farqlarga bog‘liq holda yuqori chastotalarda yaqqol namoyon bo‘ladi. Reley sochilishi esa zarracha o‘lchamining to‘lqin uzunligidan kichik bo‘lgan sharoitda chastotaning to‘rtinchi darajasiga bog‘liqligi bilan ajralib turadi. Ushbu 1-jadval turli chastota diapazonlarida qaysi so‘nish mexanizmi ustuvor ekanligini aniqlash va nazariy modellarni tanlashda muhim qo‘llanma vazifasini bajaradi.

1-jadval. So‘nish mexanizmining ustvor yo‘nalishlari

Mexanizm nomi	**Asosiy fizik sababi**	**Asosiy ta’sir etuvchi parametrlar**	**Chastotaga bog‘liqligi**
Klassik gidrodinamik (Stoks-Kirxgof)	Suyuqlik qovushqoqligi va issiqlik o‘tkazuvchanligi	Samarali qovushqoqlik (η_{eff}), issiqlik sig‘imi (C_p)	Chastotaning kvadrati (ω^2)
Termal relaksatsiya	Zarracha va bazaviy suyuqlik orasidagi harorat farqi	Zarracha radiusi (R), termal diffuziya (D_T)	Yuqori chastotalarda kuchayadi ($\tilde{\approx}\omega^2$)
Visko-inersion mexanizm	Zarracha va suyuqlik tezliklarining fazaviy siljishi	Kinematik qovushqoqlik (ν_f), zarracha massasi	Chastotaga murakkab bog‘liq

Mexanizm nomi	Asosiy fizik sababi	Asosiy ta’sir etuvchi parametrlar	Chastotaga bog‘liqligi
Reley sochilishi	Zarracha o‘lchamining to‘lqin uzunligidan kichikligi ($R \ll \lambda$)	Hajmiy konsentratsiya (ϕ), to‘lqin soni (k)	Chastotaning 4-darajasi (ω^4)

Nanozarrachalar konsentratsiyasi va o‘lchamining so‘nishga ta’siri

Nanosuyuqliklarda akustik to‘lqinlarning tarqalishi va energiyaning so‘nish jarayoniga nanozarrachalarning hajmiy konsentratsiyasi (ϕ) hamda ularning geometrik o‘lchamlari (R) hal qiluvchi ta’sir ko‘rsatadi.

1. Konsentratsiyaning roli:

Zarrachalar konsentratsiyasi oshgani sayin muhitning zichligi, samarali qovushqoqligi va zarrachalararo gidrodinamik o‘zaro ta’sirlar ortib boradi. Bu o‘z navbatida klassik gidrodinamik so‘nish va Reley sochilishi koeffitsiyentlarining chiziqli yoki nochiziqli o‘sishiga olib keladi. Yuqori konsentratsiyali tizimlarda zarrachalarning aglomeratsiyalanish (to‘planish) ehtimoli yuqori bo‘lib, bu samarali zarracha radiusining o‘zgarishiga va akustik spektrning siljishiga sabab bo‘ladi.

2. Zarracha o‘lchamining ta’siri:

Nanozarrachalar o‘lchami (R) termal relaksatsiya va visko-inersion mexanizmlar uchun asosiy masshtab omili hisoblanadi. Zarracha hajmi kichik bo‘lgan sari (masalan, $R < 10$ nm) termal relaksatsiya vaqti keskin qisqaradi va issiqlik almashinuvi jarayoni yuqori chastota sohasiga ko‘chadi. Aksincha, zarrachalar kattalashgani sari visko-inersion yo‘qotishlar va zarrachaning inersion tebranishlari ustuvor ahamiyat kasb eta boshlaydi.

3. Akustik diagnostika imkoniyatlari:

Ushbu qonuniyatlar nanosuyuqliklarning akustik xossalarini o‘rganish orqali ularning disperslik darajasini, zarrachalar taqsimoti va konsentratsiyasini buzmasdan (non-destructive) aniqlash imkonini beradi. Ultratovush tezligi va so‘nish koeffitsiyentini o‘lchash usullari zamonaviy fizika va texnologiyada kolloid tizimlarning holatini tezkor nazorat qilishning eng samarali vositalaridan biri bo‘lib xizmat qiladi.

Xulosa. Nanosuyuqliklardan ultratovush to‘lqinlari o‘tganda yuzaga keladigan energiyaning so‘nish mexanizmlari ko‘p qirrali va murakkab fizik jarayon bo‘lib, u gidrodinamik, termodinamik hamda inersion omillarning o‘zaro ta’siriga asoslanadi. O‘tkazilgan nazariy tahlillar va mavjud adabiyotlar qiyoslashi shuni ko‘rsatadiki, Stoks-Kirxgofning klassik gidrodinamik so‘nishi, termal hamda visko-inersion relaksatsiyalar, shuningdek, Reley sochilishi mexanizmlari birgalikda geterogen tizimlarning akustik xossalarini to‘liq ochib berishda asosiy poydevor vazifasini bajaradi.

Xususan, aniqlanishicha, chastotaning ortishi va nanozarrachalarning o‘lchamlari o‘zgarishi turli so‘nish mexanizmlarining hissasiga sezilarli darajada ta’sir ko‘rsatadi. Olingan nazariy formulalar va umumiy so‘nish koeffitsiyentining yig‘indi tenglamasi kelgusida eksperimental natijalarni yuqori aniqlikda tushuntirish imkonini beradi. Mazkur tadqiqot natijalari nanosuyuqliklarning tuzilishini optimallashtirish, ularning disperslik darajasini akustik usullar yordamida buzmasdan nazorat qilish hamda ularni zamonaviy issiqlik almashinuv qurilmalari, optoelektronika va lazer texnikasida yuqori samaradorlik bilan qo‘llash imkoniyatlarini yanada kengaytiradi. Xususan, ishlab chiqilgan nazariy yondashuvlar issiqlik almashtirgichlardagi ishchi suyuqliklarning konsentratsiyasini buzmagan holda onlayn (real vaqt rejimida) akustik diagnostika qilish imkonini beradi.

ADABIYOTLAR:

1. Khattab, A., & Al-Taee, A. Acoustic properties and sound wave propagation in nanofluids: A review of attenuation mechanisms // Journal of Molecular Liquids. – 2021. – Vol. 335. – P. 116120.

2. Reshetnikov, A. V., et al. Ultrasonic wave propagation and relaxation phenomena in nanofluids containing metallic nanoparticles // Ultrasonics. – 2019. – Vol. 94. – pp. 112–119.

3. Bahrami, M., et al. A comprehensive review on the acoustic and thermophysical properties of nanofluids: Mechanisms and applications // Ultrasonics Sonochemistry. – 2020. – Vol. 64. – P. 104987.

4. Sundar, L. S., Singh, M. K., & Sousa, A. C. Investigation of thermal conductivity and viscosity of nanofluids: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – Vol. 25. – pp. 307–323.

5. Kakaç, S., & Pramuanjaroenkij, A. Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2012. – Vol. 55, № 11-12. – pp. 3187–3208.

6. Wang, L., & Fan, J. Research progress on acoustic attenuation and scattering characteristics in complex fluid-nanoparticle systems // Applied Acoustics. – 2022. – Vol. 193. – P. 108756.

7. Zhang, H., et al. Ultrasonic attenuation spectroscopy for particle size distribution and concentration in concentrated nanofluids // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2018. – Vol. 538. – pp. 210–218.