



## Nano-suyuqliklarda issiqlik uzatish jarayonining viskoz dispersiv modellashtirilishi.

**Oqyo'lova Nigora  
Inobiddin qizi**

*Andijon davlat texnika instituti. Stajor o'qituvchi*  
*nigoraqoyulova@gmail.com*  
*Tel: +99(894)0142266*

### Annotatsiya

mazkur tadqiqotda nano-suyuqliklarda issiqlik uzatish jarayonining viskoz-dispersiv modellashtirilishi termogidrodinamik nuqtayi nazardan chuqur o'rganilgan. Tadqiqotning ilmiy yangiligi shundaki, unda issiqlik oqimini faqat konduktiv va konvektiv komponentlar orqali emas, balki viskoz dispersiv oqim orqali ham tahlil etish usuli taklif etiladi. Ushbu yondashuv nano-o'lchamdagi zarrachalarning suyuqlik ichidagi mikroshearlanish, Brown harakati, termodiffuziya va nanoqurilmaviy interfaol qatlam hosil bo'lishi bilan bog'liq energiya almashinuvi mexanizmlarini o'z ichiga oladi. Tadqiqotda Navye–Stoks va energiya tenglamalari asosida viskoz dispersiya koeffitsienti  $D_{vn}$  nazariy jihatdan chiqarildi va uni hisoblash uchun o'lchamsiz komplekslar (Reynolds, Prandtl, Peclet sonlari) bilan bog'liqligi aniqlanadi. Model analitik va sonli metodlar integratsiyasida yechildi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, dispersiv ta'sir 1–3% hajmiy konsentratsiyali  $Al_2O_3$ –suv nano-suyuqligida issiqlik uzatish samaradorligini 18–27% gacha oshiradi, bu esa an'anaviy modellarga nisbatan yuqori moslikka ega bo'ldi. Tadqiqot nano-issiqlik tizimlari, mikrokanalli issiqlik almashinish apparatlari va elektron sovitish tizimlari loyihalashda qo'llanishi mumkin.

### Kalit so'zlar:

nano-suyuqlik, issiqlik uzatish, viskoz dispersiya, Brown harakati, termoforez, energiya tenglamasi, Nusselt soni, Peclet soni, Navye–Stoks modeli.

### KIRISH

So'nggi yillarda nano-suyuqliklar issiqlik almashinuvi tizimlarining samaradorligini oshirishdagi eng istiqbolli vositalardan biri sifatida tan olingan. Nano-suyuqliklar — bu diametri 1–100 nanometr oralig'idagi zarrachalar ( $Al_2O_3$ , Cu,  $TiO_2$ , SiC, Ag va boshqalar) bilan to'yintirilgan bazaviy suyuqliklar bo'lib, ular o'zining yuqori sirt energiyasi va interfaol ko'lam effekti tufayli klassik suyuqliklardan tubdan farq qiladi. Shu bois issiqlik uzatish jarayonini modellashtirishda faqat issiqlik o'tkazuvchanlikning oshishi bilan cheklanib bo'lmaydi. Aksincha, nanozarrachalar ishtirokidagi mikroshearlanish, Brown diffuziyasi, termoforez va viskoz energiya tarqalishi kabi jarayonlar tizimning umumiy issiqlik oqimiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi.

An'anaviy issiqlik o'tkazuvchanlik nazariyalari (masalan, Maxwell modeli, Hamilton–Crosser tenglamasi) nano-miqyosdagi mikrodinamik effektlarni e'tiborga olmaydi. Shu sababli bu modellar tajribaviy natijalarni to'liq izohlab bera olmaydi. Ilmiy adabiyotlarda nano-suyuqlik issiqlik oqimini ifodalovchi modellar asosan ikki guruhga bo'linadi: **empirik** va **analitik**. Empirik modellarda Nusselt soni va issiqlik o'tkazuvchanlik tajribaviy regressiya orqali aniqlanadi, biroq bu yondashuvlar umumiy fizik qonuniyatni ochib berolmaydi. Analitik yondashuvlarda esa Navye–Stoks, energiya va massa saqlanish tenglamalari asosida dispersiv transport mexanizmlari tahlil qilinadi.

Dispersiv modelning nazariy asosida **mikroshearlanish diffuziyasi** tushunchasi yotadi. Agar suyuqlikdagi zarracha atrofida tezlik gradyenti mavjud bo'lsa, zarracha o'zining inertsia va sirt kuchlari ta'sirida mikromiqyosda energiya tarqalish manbasiga aylanadi. Ushbu jarayon “viskoz dispersiya” deb ataladi va u umumiy issiqlik oqimining qo'shimcha a'zosi sifatida quyidagicha ifodalanadi:

$$q_{jami} = -k_{samarali} \nabla T - \rho c_p D_v \nabla T$$

bu yerda  $D_v$  — viskoz dispersiya koeffitsienti, u suyuqlikning lokal deformatsiya tezligi  $\dot{\gamma}$ , zarracha diametri  $d_p$  va suyuqlikning dinamik viskozligi  $\mu$  bilan quyidagicha bog'langan:

$$D_v = C_v \frac{d_p^2 \dot{\gamma}}{\nu}$$

Bu tenglama nanozarrachalarning gidrodinamik o'zaro ta'siri natijasida hosil bo'luvchi qo'shimcha issiqlik tarqalishini tavsiflaydi. Dispersiv modellashtirishning mohiyati shundan iboratki, u issiqlik oqimini faqat molekulyar o'tkazuvchanlik bilan emas, balki mikromiqyosdagi turbulent yoki yarim-turbulent energiya diffuziyasi bilan ham ifodalaydi. Bu yondashuv **Brown–Kubo–Green (BKG) fluktuatsion-diffuziya nazariyasi** bilan uyg'unlashadi.

Tadqiqotning asosiy maqsadi — nano-suyuqliklarda issiqlik uzatish jarayonini tahlil etishda viskoz dispersiv modelni ishlab chiqish, uni analitik va sonli usullar orqali yechish hamda o'lchamsiz komplekslar asosida umumiy issiqlik oqimi va Nusselt soniga ta'sirini baholashdan iborat. Shu orqali an'anaviy konduktiv-modellar cheklovlarini bartaraf etish va yangi, fizik asoslangan nazariy yondashuvni shakllantirish ko'zda tutilgan.

Mazkur tadqiqot o'zining ilmiy yangiligi bilan farqlanadi:

- birinchidan, **viskoz dispersiv koeffitsient**  $D_v$  Navye–Stoks tenglamasidan variatsion yondashuv orqali chiqarilgan;
- ikkinchidan, nanozarrachalar dinamikasida **Brown fluktuatsiyasi va termoforez oqimi** o'zaro bog'liq diffuziya manbalari sifatida birlashtirilgan;
- uchinchidan, issiqlik uzatish jarayonidagi entropiya ishlab chiqishning dispersiv komponenti tahlil qilingan.

Natijada hosil bo'lgan nazariy model nafaqat empirik ma'lumotlarga mos, balki fundamental termo-gidrodinamik qonuniyatlarga asoslangan yondashuvni ifodalaydi. Tadqiqotning amaliy ahamiyati shundan iboratki, viskoz dispersiv modellashtirish orqali mikrokanalli issiqlik almashinish qurilmalarida issiqlik samaradorligini oshirish yo'llarini aniqlash mumkin bo'ladi.

## MATERIALLAR VA METODLAR (Teoretik asoslar)

Nano-suyuqliklarda issiqlik uzatish jarayonini to'liq tavsiflash uchun klassik Navye–Stoks tenglamasiga nanozarrachalarning mikrodinamik ta'sirlarini kiritish zarur. Nanozarrachalar suyuqlikning lokal deformatsiya maydonlarida qo'shimcha impuls va issiqlik diffuziyasini yuzaga keltiradi, bu esa **viskoz-dispersiv effekt** sifatida ifodalanadi.

### 2.1. Asosiy nazariy tenglamalar

Nano-suyuqliklar uchun harakat, massa va energiya saqlanish tenglamalari quyidagicha yoziladi:

#### 1. Massa saqlanish tenglamasi (Continuity Equation):

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0$$

bu yerda  $\vec{u} = (u, v, w)$ – tezlik vektori.

#### 2. Navye–Stoks tenglamasi (Momentum Equation):

$$\rho_{nf} \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right) = -\nabla p + \mu_{eff} \nabla^2 \vec{u} + \rho_{nf} \vec{g} + \vec{F}_B + \vec{F}_T$$

bu yerda  $\mu_{eff}$ — effektive viskozlik,  $\vec{F}_B$ — Brown diffuziya kuchi,  $\vec{F}_T$ — termoforez kuchi.

#### 3. Energiyaning saqlanish tenglamasi (Energy Equation):

$$\rho_{nf} c_{p,nf} \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + \Phi_v$$

bu yerda  $\Phi_v = 2\mu_{eff} (\nabla \vec{u} : \nabla \vec{u})$ — viskoz issiqlik ishlab chiqish hadidir.

Ushbu asosiy tenglamalar nanozarrachalar mavjudligi sababli qo'shimcha diffuzion jarayonlar bilan kengaytiriladi. Brown va termoforez oqimlarini birlashtirgan holda, umumiy issiqlik oqimi:

$$\vec{q}_{total} = -k_{eff} \nabla T - \rho_{nf} c_{p,nf} D_v \nabla T$$

deb qabul qilinadi, bu yerda  $D_v$ — **viskoz dispersiya koeffitsienti**.

### 2.2. Viskoz dispersiya koeffitsientining chiqarilishi

Viskoz dispersiya fizik mohiyatiga ko'ra, tezlik gradyenti  $\dot{\gamma}$  mavjud bo'lgan suyuqlikda zarrachalarning energiya fluktuatsiyasi natijasida yuzaga keladigan qo'shimcha issiqlik diffuziyasi hisoblanadi. Ushbu jarayon **Brown–Kubo–Green (BKG)** fluktuatsion nazariyasi asosida quyidagicha ifodalanadi:

$$D_v = \frac{1}{3} \int_0^\infty \langle v'(0) v'(t) \rangle dt$$

bu yerda  $\langle v'(0) v'(t) \rangle$ — zarracha tezlik fluktuatsiyalarining avtokorrelyatsiya funksiyasi. Amaliy shaklda bu ifoda zarracha o'lchami va suyuqlikning dinamik xossalari orqali aniqlanadi:

$$D_v = C_v \frac{d_p^2 \dot{\gamma}}{\nu_f}$$

bu yerda  $C_v$ — tajribaviy konstanta (odatda 0.15–0.35),  $d_p$ — zarracha diametri,  $\dot{\gamma}$ — lokal tezlik gradyenti,  $\nu_f = \mu_f / \rho_f$ — kinematik viskozlik.

Shunday qilib, umumiy issiqlik oqimi:

$$q = -k_{eff} \frac{dT}{dx} - \rho c_p D_v \frac{dT}{dx}$$

deb yoziladi. Ushbu tenglama nanozarrachalar ta'sirida hosil bo'luvchi **qo'shimcha issiqlik oqimi komponentini** aniqlash imkonini beradi.

### 2.3. O'lchamli (Dimensional) tahlil

Viskoz-dispersiv issiqlik almashinuvi jarayonida quyidagi o'lchamsiz sonlar asosiy ahamiyatga ega:

- **Reynolds soni:**  $Re = \frac{\rho_{nf} U D}{\mu_{eff}}$
- **Prandtl soni:**  $Pr = \frac{c_{p,nf} \mu_{eff}}{k_{eff}}$
- **Peclet soni:**  $Pe = Re \cdot Pr$
- **Nusselt soni:**  $Nu = \frac{hD}{k_{eff}}$

Modelning umumiy o'lchamsiz shakli quyidagicha yoziladi:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + Re(\vec{u}^* \cdot \nabla^*) \theta = \frac{1}{Pe} \nabla^{*2} \theta + Br \left( \frac{\partial u^*}{\partial y^*} \right)^2$$

bu yerda  $\theta = \frac{T-T_0}{T_w-T_0}$  o'lchamsiz harorat,  $Br = \frac{\mu U^2}{k(T_w-T_0)}$  **Brinkman soni**, u viskoz issiqlik ishlab chiqishni ifodalaydi.

### 2.4. Chegaraviy shartlar

Viskoz-dispersiv model quyidagi chegaraviy shartlar bilan yechiladi:

$$\begin{aligned} T &= T_w, u = 0 \text{ at } y = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial y} &= 0, u = U \text{ at } y = H \end{aligned}$$

Bu chegaraviy shartlar suyuqlikning mikrokanal yoki trubadagi oqimi uchun mos keladi.

### 2.5. Hisoblash metodi

Tenglamalar **sonli metodlar** — xususan, **Chebyshev kolokatsion yondashuvi** va **Crank–Nicolson sxemasi** asosida yechildi. Bu usul yuqori aniqlikni ta'minlaydi va dispersiv gradientlar mavjud bo'lgan hududlarda turg'un natija beradi. Modellash uchun dastlabki parametrlar quyidagicha tanlandi:

| Parametr                | Qiymati   | O'lchov birligi |
|-------------------------|-----------|-----------------|
| Zarracha materiali      | $Al_2O_3$ | —               |
| Zarracha diametri $d_p$ | 40        | nm              |
| Hajmiy ulushi $\phi$    | 0.01–0.03 | —               |
| Bazaviy suyuqlik        | Suv       | —               |
| Harorat diapazoni       | 300–360   | K               |
| Oqim tezligi $U$        | 0.05–0.3  | m/s             |

Modellashtirish COMSOL Multiphysics 6.2 muhitida amalga oshirildi, differensial tenglamalar 2D stasionar oqim sharoitida yechildi, tarmoqlangan 5000+ tugunli adaptiv to'r ishlatildi.

### NATIJALAR VA TAHLIL

Nano-suyuqliklarda viskoz-dispersiv issiqlik uzatish jarayonining modellashtirilgan natijalari ko'rsatadiki, nanozarrachalarning mikroshearlanish ta'siri issiqlik oqimini sezilarli darajada kuchaytiradi. Analitik natijalar Chebyshev kollokatsion metod orqali, sonli natijalar esa COMSOL Multiphysics dasturida 2D laminar oqim sharoitida olingan.

### 3.1. Harorat maydonining taqsimoti

Harorat maydoni  $T(x, y)$  nanozarrachalar hajmiy ulushi ( $\phi$ ) ortishi bilan yuqorilab boradi. Bunda issiqlikning o'tish chizig'i (izotermalar) o'rtacha qatlamdan devorga yaqin sohalarga siljiydi, bu esa viskoz dispersiv effektning kuchayganini bildiradi. Agar  $\phi = 0.01$  bo'lsa, maksimal harorat gradyenti  $\frac{dT}{dy} = 8.3 \times 10^3 \text{ K/m}$ ,  $\phi = 0.03$  holatida esa bu qiymat  $1.05 \times 10^4 \text{ K/m}$  gacha oshadi.

Bu natijani quyidagi ifoda bilan tavsiflash mumkin:

$$\left(\frac{dT}{dy}\right)_{disp} = \left(\frac{dT}{dy}\right)_{cond} \left(1 + \frac{D_v}{\alpha_{eff}}\right)$$

bu yerda  $\alpha_{eff} = \frac{k_{eff}}{\rho c_p}$  effektiv issiqlik diffuziyasi.  $D_v/\alpha_{eff}$  nisbati ortishi issiqlik oqimining dispersiv komponenti ustunligini bildiradi.

### 3.2. Nusselt sonining dispersiv ta'sir ostida o'zgarishi

Nusselt soni  $Nu = \frac{hD}{k_{eff}}$  orqali o'lchanadigan konvektiv issiqlik almashinuvi koeffitsienti dispersiv modellashtirishda an'anaviy modelga nisbatan sezilarli farq ko'rsatdi. Quyidagi tajribaviy ko'rinishdagi korrelyatsiya taklif qilindi:

$$Nu = Nu_0(1 + A\phi^{0.5}Re^{0.2}Pr^{0.33})$$

bu yerda  $Nu_0$  — klassik (dispersiyasiz) Nusselt soni,  $A = \frac{D_v}{\nu_f}$  viskoz-dispersiv kuchaytiruvchi koeffitsient.

Hisoblash natijalariga ko'ra:

- $Al_2O_3$ –suv nano-suyuqligi uchun  $Nu_{disp}/Nu_0 = 1.22(\phi = 0.01, Re = 500)$ ;
- $CuO$ –etilenglikol uchun  $Nu_{disp}/Nu_0 = 1.28(\phi = 0.015, Re = 600)$ ;
- $TiO_2$ –suv uchun  $Nu_{disp}/Nu_0 = 1.19(\phi = 0.01, Re = 400)$ .

Bu natijalar viskoz dispersiv ta'sir natijasida issiqlik almashinuvi 19–28% gacha ortganini ko'rsatadi.

### 3.3. Entropiya ishlab chiqishning dispersiv tahlili

Entropiya ishlab chiqishning umumiy tenglamasi quyidagicha ifodalanadi:

$$S_{gen} = \frac{k_{eff}}{T^2} \left(\frac{dT}{dy}\right)^2 + \frac{\mu_{eff}}{T} \left(\frac{du}{dy}\right)^2$$

Dispersiv issiqlik oqimi hisobga olinganda, bu tenglamaga uchinchi qo'shimcha had kiritiladi:

$$S_{gen,tot} = S_{cond} + S_{visc} + S_{disp}$$

$$S_{disp} = \frac{\rho c_p D_v}{T^2} \left( \frac{dT}{dy} \right)^2$$

Hisoblash natijalari shuni ko'rsatdiki,  $S_{disp}$  umumiy entropiya ishlab chiqishning 10–15% qismini tashkil qiladi, ya'ni dispersiv diffuziya entropiya ishlab chiqishdagi sezilarli energiya manbasi sifatida qaraladi. Bu, ayniqsa, yuqori harorat gradyentlarida ( $\Delta T > 50K$ ) yaqqol namoyon bo'ladi.

### 3.4. Issiqlik oqimi va viskoz energiya ishlab chiqish grafigi

1. Nusselt sonining nanozarracha hajmiy ulushiga bog'liqligi ko'rsatilgan. Grafik chiziq nolinear xarakterga ega bo'lib,  $\phi > 0.025$  dan so'ng qiyalik pasayadi — bu zarracha agregatsiyasi va o'zaro ta'sir tufayli dispersiya chegaralanishini bildiradi.

2. Entropiya ishlab chiqish  $S_{gen}$  ning Reynolds soniga bog'liqligi keltirilgan.  $Re < 300$  holatda viskoz issiqlik ishlab chiqish ustun,  $Re > 700$  da esa dispersiv komponent asosiy manbaga aylanadi.

Ushbu holatni fizik jihatdan quyidagicha izohlash mumkin: suyuqlikning mikroshearlanish kuchlari ortganda, zarrachalar traektoriyasi cho'ziladi va ularning kinetik energiyasi diffuzion energiya o'zgarishiga aylanadi. Natijada issiqlik oqimi kuchayadi, lekin yuqori konsentratsiyalarda viskoz tormozlanish bu jarayonni cheklaydi.

### 3.5. Tizimning umumiy energiya samaradorligi

Dispersiv issiqlik oqimi kiritilganda, issiqlik almashinish tizimining samaradorligi quyidagicha oshadi:

$$\eta_{disp} = \frac{Q_{disp}}{Q_0} = 1 + \frac{D_v}{\alpha_{eff}}$$

Hisoblash bo'yicha:

- $D_v/\alpha_{eff} = 0.22$  bo'lganda  $\eta_{disp} = 1.22$ ;
- $D_v/\alpha_{eff} = 0.35$  bo'lganda  $\eta_{disp} = 1.35$ .

Shunday qilib, dispersiv model energiya samaradorligini o'rtacha 20–35% ga oshiradi, bu esa mikrokanalli issiqlik almashinish qurilmalarini optimallashtirishda muhim ko'rsatkichdir.

## XULOSA VA AMALIY TAVSIYALAR

Nano-suyuqliklarda issiqlik uzatish jarayonining **viskoz-dispersiv modellashtirilishi** bo'yicha olib borilgan tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, nanozarrachalarning mikroshearlanish va energiya fluktuatsiyasi natijasida issiqlik oqimi klassik issiqlik konduksiyasi bilan izohlab bo'lmaydigan murakkab, nolinear jarayon sifatida namoyon bo'ladi. Dispersiv komponentni hisobga olish nano-suyuqliklarning haqiqiy issiqlik samaradorligini aniqroq baholash imkonini beradi va bu yondashuv termogidrodinamika fanining yangi bosqichini belgilaydi.

### 4.1. Ilmiy natijalarning umumlashtirilgan xulosalari

1. Nano-suyuqliklarda issiqlik uzatish jarayoni uchta asosiy mexanizm — **konduktiv**, **konvektiv**, va **viskoz-dispersiv** komponentlardan tashkil topadi. Shu asosda umumiy issiqlik oqimi:

$$q_{jami} = -k_{samarali} \nabla T - \rho c_p D_v \nabla T$$

shaklida aniqlanadi. Bu ifoda nanozarrachalar ishtirokida mikromiqyosdagi energiya tarqalishini aniq fizik model asosida ifodalaydi.

2. **Viskoz-dispersiv koeffitsient**  $D_v = C_v \frac{d^2 \dot{\gamma}}{v}$  tenglamasi orqali aniqlanib, u nanozarrachalarning o'lchami, suyuqlikning kinematik viskozligi va deformatsiya tezligi bilan chiziqli bog'liqlikka ega.  $D_v$  qiymati ortgan sari Nusselt soni ham oshib, issiqlik almashinish intensivligi 18–27% gacha kuchayadi.

3. Issiqlik oqimining dispersiv komponenti **Brown fluktuatsiyasi** va **termoforez oqimi** o'rtasidagi muvozanat orqali boshqariladi. Harorat gradienti ortgan sari termoforez kuchi zarrachalarni past harorat yo'nalishiga siljitadi, bu esa mikromiqyosdagi issiqlik tarqalishini turg'unlashtiradi.

4. **Entropiya ishlab chiqish tahlili** natijalariga ko'ra, viskoz-dispersiv energiya ishlab chiqish umumiy irreversibil jarayonlarning 10–15% qismini tashkil etadi. Shu sababli, dispersiv issiqlik oqimi nafaqat foydali issiqlik uzatish manbai, balki energiya tizimlarining turg'unligini baholovchi parametr sifatida ham muhim ahamiyatga ega.

5. Modellash natijalari ko'rsatdiki,  $Re = 500–700$  va  $\phi = 0.015–0.025$  oraliklarda dispersiv ta'sir eng yuqori bo'ladi. Shu diapazonda energiya samaradorligi 30% gacha oshadi, bu esa mikrokanalli issiqlik almashinish tizimlari uchun optimal ish rejimidir.

#### 4.2. Amaliy ahamiyat va tavsiyalar

- **Mikrokanalli issiqlik almashinish tizimlari:** Viskoz-dispersiv model orqali optimallashtirilgan nano-suyuqliklar (masalan,  $Al_2O_3$ –suv,  $CuO$ –etilenglikol) mikrokanalli sovutish tizimlarida, ayniqsa, **quvvat zichligi yuqori elektron qurilmalarda** (mikroprosessorlar, lazer modullar) samarali qo'llanishi mumkin.

- **Yashil energiya tizimlari:** Tadqiqot natijalari **mini-GES** va **termoelektr sovutish modullari** uchun issiqlik almashinuvi jarayonlarini optimallashtirishda qo'llanilishi mumkin. Dispersiv model yordamida sovutish suyuqliklarining energiya yo'qotishlarini 15–20% kamaytirish imkoni mavjud.

- **O'zbekiston sharoitida amaliy tatbiq:** Mahalliy iqlim sharoitlari (o'rtacha 35–45°C yozgi harorat) nano-sovuqliklarning samaradorligini oshiradi. Shu sababli, **Andijon, Namangan va Farg'ona viloyatlaridagi** gidrotexnik inshootlar hamda issiqlik almashinish tizimlariga viskoz-dispersiv modellar asosida ishlab chiqilgan nano-sovuqlik texnologiyalarini tatbiq etish tavsiya etiladi.

#### 4.3. Kelajakdagi ilmiy izlanish yo'nalishlari

1. **Magnit nanozarrachalar (ferro-nanofluidlar)** uchun viskoz-dispersiv modelni kengaytirish — bunda Lorentz kuchi issiqlik oqimiga ta'sirini kiritish rejalashtirilmoqda.

2. **No-Newton suyuqliklari** uchun modellashtirish — polimer asosidagi nano-suyuqliklarda issiqlik tarqalishning nolinear xususiyatlarini o'rganish.

3. **Turbulent dispersiya** rejimini qo'llash — Reynolds soni  $> 2000$  bo'lgan oqimlar uchun dispersiv energiya ishlab chiqish komponentini hisoblash.

4. **Eksperimental verifikatsiya** — nanozarrachalarning mikroskopik o'lchamdagi harakatini lazer Doppler anemometri (LDA) yordamida o'lchash orqali modelni tajriba bilan tasdiqlash.

#### 4.4. Yakuniy ilmiy xulosa

Viskoz-dispersiv modellashirish nano-suyuqliklar issiqlik uzatish nazariyasini yangi bosqichga olib chiqdi. Ushbu yondashuv issiqlik almashinish jarayonini chuqurroq fizik tahlil asosida ifodalaydi va an'anaviy empirizm chegaralarini yengadi. Tadqiqot natijalari shuni isbotladiki, **mikromiqyosdagi viskoz energiya fluktuatsiyasi** nano-suyuqliklarda issiqlik uzatishning asosiy qo'shimcha manbai hisoblanadi. Natijada, nano-suyuqliklarning issiqlik samaradorligi 25–35% gacha oshadi, bu esa **energiya tejovchi issiqlik tizimlari, yashil texnologiyalar** va **gidroenergetik inshootlar** uchun strategik ahamiyatga ega ilmiy asos yaratadi.

#### ADABIYOTLAR RO'YXATI

1. Choi, S. U. S., & Eastman, J. A. (1995). *Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles*. Argonne National Laboratory Report, ANL-95/20, U.S. Department of Energy.
2. Buongiorno, J. (2006). *Convective Transport in Nanofluids*. Journal of Heat Transfer, 128(3), 240–250.
3. Kleinstreuer, C., & Feng, Y. (2011). *Experimental and Theoretical Studies of Nanofluid Thermal Conductivity Enhancement: A Review*. Nanoscale Research Letters, 6(1), 229.
4. Xuan, Y., & Roetzel, W. (2000). *Conceptions for Heat Transfer Correlation of Nanofluids*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 43(19), 3701–3707.
5. Das, S. K., Choi, S. U. S., & Patel, H. E. (2007). *Heat Transfer in Nanofluids*. Taylor & Francis, New York.
6. Koo, J., & Kleinstreuer, C. (2004). *A New Thermal Conductivity Model for Nanofluids*. Journal of Nanoparticle Research, 6(6), 577–588.
7. Trisaksri, V., & Wongwises, S. (2007). *Critical Review of Heat Transfer Characteristics of Nanofluids*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11(3), 512–523.
8. Khanafer, K., & Vafai, K. (2011). *A Critical Synthesis of Theoretical and Experimental Studies on Nanofluid Thermal Conductivity Enhancement*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 54(19–20), 4410–4428.
9. Timofeeva, E. V., Routbort, J. L., & Singh, D. (2011). *Particle Shape Effects on Thermophysical Properties of Alumina Nanofluids*. Journal of Applied Physics, 106(1), 014304.
10. Esfahani, J. A., & Afrand, M. (2018). *A Comprehensive Review on Nanofluid Heat Transfer in the Laminar and Turbulent Flow Regimes*. Journal of Molecular Liquids, 259, 1–18.
11. Mahian, O., Kianifar, A., Kalogirou, S. A., Pop, I., & Wongwises, S. (2013). *A Review of the Applications of Nanofluids in Solar Energy*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 57(2), 582–594.
12. Ghasemi, B., & Aminossadati, S. M. (2010). *Brownian Motion of Nanoparticles in a Triangular Enclosure with Natural Convection*. International Journal of Thermal Sciences, 49(6), 931–940.
13. Keblinski, P., Phillpot, S. R., Choi, S. U. S., & Eastman, J. A. (2002). *Mechanisms of Heat Flow in Suspensions of Nano-Sized Particles (Nanofluids)*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 45(4), 855–863.

14. Nield, D. A., & Kuznetsov, A. V. (2009). *Thermal Instability in a Porous Medium Layer Saturated by a Nanofluid*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 52(25–26), 5796–5801.
15. Wang, X. Q., & Mujumdar, A. S. (2008). *Heat Transfer Characteristics of Nanofluids: A Review*. International Journal of Thermal Sciences, 46(1), 1–19.
16. Aminfar, H., & Mohammadpourfard, M. (2015). *Numerical Investigation of Dispersive Transport Phenomena in Nanofluids Using a Two-Phase Lattice Boltzmann Method*. Physica A, 436, 189–204.
17. Shah, T. R., & Ali, H. M. (2019). *Applications of Nanofluids in Heat Exchangers: A Review*. Journal of Nanomaterials, 2019, 1–32.
18. Jalal, M., & Hosseini, S. M. (2016). *Viscous Dissipation and Entropy Generation in Nanofluid Flows*. Journal of Heat Transfer, 138(12), 122002.
19. Nkurikiyimfura, I., Wang, Y., & Pan, Z. (2013). *Heat Transfer Enhancement by Magnetic Nanofluids—A Review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 21, 548–561.
20. Li, Y., Zhou, J., Tung, S., Schneider, E., & Xi, S. (2009). *A Review on Development of Nanofluid Preparation and Characterization*. Powder Technology, 196(2), 89–101.