

UO'K: 536.24:532.529:620.92

NANO-SUYUQLIKLARNING ISSIQLIK-FIZIK XOSSALARINI MODELLASHTIRISH: VISKOZITET, ISSIQLIK O'TKAZUVCHANLIK VA KONVEKTIV ISSIQLIK ALMASHUV

Xamrayev Sardor Ilxomovich – texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), dotsent,
ORCID: 0000-0002-0847-9488, E-mail: xamrayevs@bk.ru

Qarshi davlat texnika universiteti, Qarshi, O'zbekiston

***Annotatsiya.** Energetika tizimlarida issiqlik uzatish samaradorligini oshirish dolzarb ilmiy muammolardan biri hisoblanadi. An'anaviy issiqlik tashuvchilarning past issiqlik o'tkazuvchanligi issiqlik almashuv jarayonlarini cheklaydi.*

Mazkur tadqiqotda nano-suyuqliklarning issiqlik-fizik xossalarini baholash uchun klassik nazariy modellar qo'llanildi. Xususan, viskozitet uchun Einstein va Brinkman, issiqlik o'tkazuvchanlik uchun Maxwell va Hamilton-Crosser modellaridan foydalanildi.

Tahlillar natijasida nanozarrachalar konsentratsiyasi ortishi issiqlik o'tkazuvchanlikni oshirishi bilan birga viskozitetning ham ortishiga olib kelishi aniqlandi, bu esa gidravlik qarshilikning oshishiga sabab bo'ladi.

Nano-suyuqliklardan foydalanish issiqlik uzatish samaradorligini oshiradi, biroq optimal konsentratsiyani tanlash zarur.

***Kalit so'zlar:** nano-suyuqliklar, viskozitet, issiqlik o'tkazuvchanlik, konvektiv issiqlik almashuv, Nusselt soni.*

УДК: 536.24:532.529:620.92

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОЖИДКОСТЕЙ: ВЯЗКОСТЬ, ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

Хамраев Сардор Илхомович - доктор философии по техническим наукам (PhD), доцент
Каршинский государственный технический университет, г. Карши, Узбекистан

***Аннотация.** Повышение эффективности теплопередачи в энергетических системах является одной из актуальных научных задач. Низкая теплопроводность традиционных теплоносителей ограничивает интенсивность процессов теплообмена.*

В данном исследовании для оценки термofизических свойств наножидкостей применены классические теоретические модели. В частности, для определения вязкости использованы модели Эйнштейна и Бринкмана, а для теплопроводности – модели Максвелла и Гамильтона–Кроссера.

Установлено, что увеличение концентрации наночастиц приводит к росту теплопроводности, однако сопровождается увеличением вязкости, что вызывает рост гидравлического сопротивления.

Применение наножидкостей повышает эффективность теплообмена, однако требует оптимального выбора концентрации наночастиц.

***Ключевые слова:** наножидкости, вязкость, теплопроводность, конвективный теплообмен, число Нуссельта.*

UDC: 536.24:532.529:620.92

MODELING OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF NANOFUIDS: VISCOSITY, THERMAL CONDUCTIVITY, AND CONVECTIVE HEAT TRANSFER

Khamraev, Sardor – Doctor of Philosophy in Technical Sciences (PhD), Associate Professor
Karshi State Technical University, Karshi, Uzbekistan

***Abstract.** Enhancing heat transfer efficiency in energy systems is a critical scientific challenge. The relatively low thermal conductivity of conventional heat transfer fluids limits the intensity of heat exchange processes.*

In this study, classical theoretical models were employed to evaluate the thermophysical properties of nanofluids. Specifically, Einstein and Brinkman models were used for viscosity prediction, while Maxwell and Hamilton–Crosser models were applied to estimate thermal conductivity.

The analysis revealed that increasing nanoparticle concentration enhances thermal conductivity; however, it also leads to an increase in viscosity, resulting in higher hydraulic resistance.

The use of nanofluids improves heat transfer performance, but requires careful optimization of nanoparticle concentration.

Keywords: *nanofluids, viscosity, thermal conductivity, convective heat transfer, Nusselt number.*

Kirish

Energetika tizimlarida issiqlik uzatish samaradorligini oshirish zamonaviy ilmiy tadqiqotlarning ustuvor yoʻnalishlaridan biri hisoblanadi. Issiqlik almashuv jarayonlarining intensivligi issiqlik taʼminoti tizimlari, quyosh issiqlik qurilmalari, issiqlik almashuv qurilmalari hamda sanoat texnologiyalarining umumiy energiya samaradorligini belgilovchi asosiy omillardan biridir. Amaliyotda keng qoʻllaniladigan anʼanaviy issiqlik tashuvchilar, jumladan suv, etilen glikol va issiq moylar nisbatan past issiqlik oʻtkazuvchanlik koeffitsiyentiga ega boʻlib, bu holat issiqlik almashuv jarayonlarining intensivligini sezilarli darajada cheklaydi va tizimlarda energiya sarfining ortishiga olib keladi [1-4].

Nanotexnologiyalarning jadal rivojlanishi natijasida issiqlik tashuvchi muhitlarning yangi turi - nano-suyuqliklar taklif etildi. Nano-suyuqliklar asosiy suyuqlik tarkibiga yuqori issiqlik oʻtkazuvchanlikka ega nanozarrachalarni dispers holatda qoʻshish orqali hosil qilinadigan kolloid tizimlar boʻlib, ular issiqlik uzatish jarayonlarini sezilarli darajada intensivikasiya qilish imkoniyatiga ega. Tadqiqotlar shuni koʻrsatadiki, nanozarrachalarning mavjudligi issiqlik oʻtkazuvchanlikni oshirish, mikro miqyosdagi konvektiv jarayonlarni kuchaytirish hamda issiqlik oqimining tarqalish tezligini orttirishga xizmat qiladi [5-6].

Shu bilan birga, nano-suyuqliklarning amaliy qoʻllanilish samaradorligini baholash ularning issiqlik-fizik xossalarini aniqlashga bevosita bogʻliqdir. Hozirgi kunda viskozitet, issiqlik oʻtkazuvchanlik va konvektiv issiqlik almashuv jarayonlarini tavsiflash uchun bir qator nazariy va yarim empirik modellar ishlab chiqilgan. Biroq mavjud modellar asosan ideal dispers tizimlar uchun ishlab chiqilgan boʻlib, nanozarrachalarning agregatsiyasi, zarracha shakli va oʻlchami, shuningdek zarracha-suyuqlik oʻzaro taʼsirining murakkab mexanizmlarini toʻliq hisobga olmaydi. Natijada nazariy hisoblash natijalari bilan eksperimental maʼlumotlar oʻrtasida sezilarli farqlar yuzaga keladi. Shu sababli nano-suyuqliklarning asosiy issiqlik-fizik xossalarini aniqlashda qoʻllaniladigan modellarni tizimli ravishda tahlil qilish hamda ularning qoʻllanilish chegaralarini aniqlash dolzarb ilmiy vazifa hisoblanadi.

Usul va materiallar

Mazkur tadqiqotda nano-suyuqliklarning asosiy issiqlik-fizik xossalarini aniqlash va baholash uchun nazariy hamda analitik yondashuvlardan foydalanildi. Tadqiqot obyekti sifatida amaliyotda keng qoʻllaniladigan tipik nano-suyuqlik tizimlari, yaʼni Al_2O_3/suv (Al_2O_3 -water), CuO/suv (CuO – water) hamda SiO_2 /etilen glikol (SiO_2 -ethylene glycol) nano-suyuqliklari koʻrib chiqildi. Asosiy suyuqlik sifatida suv va etilen glikol tanlanib, ular issiqlik tashuvchi muhit sifatida yuqori issiqlik sigʻimi va barqaror issiqlik-fizik xossalari bilan tavsiflanadi. Dispers faza sifatida esa yuqori issiqlik oʻtkazuvchanlikka ega nanozarrachalar, xususan alyuminiy oksidi (Al_2O_3), mis oksidi (CuO), kremniy dioksidi (SiO_2) hamda karbon asosidagi materiallar (masalan, koʻp devorli karbon nanotubalar - $MWCNT$) nazariy jihatdan tahlil qilindi [7].

Nano-suyuqliklarning issiqlik-fizik xossalarini aniqlashda klassik nazariy modellar asos qilib olindi. Xususan, viskozitetni baholash uchun Einstein va Brinkman modellari qoʻllanilib, ular nanozarrachalar hajmiy ulushining suyuqlikning dinamik viskozitetiga taʼsirini baholash imkonini beradi. Issiqlik oʻtkazuvchanlikni aniqlash uchun Maxwell hamda Hamilton-Crosser modellaridan

foydalanildi, ular dispers tizimlarda issiqlik oqimining tarqalish mexanizmlarini tavsiflab, zarracha shakli va konsentratsiyasining ta'sirini hisobga oladi.

Konvektiv issiqlik almashuv jarayonlarini tahlil qilishda o'lchamsiz mezonlar usuli qo'llanildi. Jumladan, oqim rejimini aniqlash uchun Reynolds soni (Re), issiqlik almashuv intensivligini baholash uchun Nusselt soni (Nu) hamda suyuqlikning termofizik xossalarini ifodalash uchun Prandtl soni (Pr) ishlatildi. Ushbu mezonlar asosida nano-suyuqliklarning konvektiv issiqlik uzatish koeffitsiyenti baholandi va quyidagi umumiy bog'lanish asosida tahlil qilindi:

$$Nu = f(Re, Pr, \varphi)$$

Tahlil jarayonida nanozarrachalar konsentratsiyasi (φ), zarracha o'lchami (d_p) hamda asosiy suyuqlikning termofizik xossalari (ρ , μ , k , c_p) ning issiqlik va gidravlik parametrlar o'zgarishiga ta'siri tizimli ravishda o'rganildi. Modellar o'zaro solishtirilib, ularning qo'llanish chegaralari, aniqlik darajasi hamda fizik cheklovlari aniqlashtirildi.

Mazkur metodologik yondashuv nano-suyuqliklarning issiqlik uzatish xususiyatlarini kompleks baholash, issiqlik o'tkazuvchanlikni oshirish va gidravlik yo'qotishlar o'rtasidagi o'zaro bog'liqlikni aniqlash hamda ularni quyosh issiqlik kollektorlarida va past haroratli gidronik tizimlarda qo'llash imkoniyatlarini ilmiy asoslash imkonini beradi.

Natijalar va muhokama

Nano-suyuqliklarning tarkibi va tayyorlash usullari. Nano-suyuqliklar ko'p fazali kolloid tizim bo'lib, ular odatda ikki asosiy komponentdan iborat: asosiy suyuqlik (base fluid) va dispers faza sifatida qo'shilgan nanozarrachalar. Mazkur tadqiqot doirasida amaliyotda keng qo'llaniladigan tipik tizimlar, xususan Al_2O_3/suv , CuO/suv hamda $SiO_2/etilen$ glikol nano-suyuqliklari asosiy model obyektlari sifatida qabul qilindi.

Asosiy suyuqlik sifatida suv, etilen glikol, propilen glikol hamda silikon moylari kabi issiqlik tashuvchi muhitlar qo'llanilib, ular yuqori issiqlik sig'imi, kimyoviy barqarorligi va texnologik qo'llanish imkoniyatlari bilan tavsiflanadi. Dispers faza sifatida esa yuqori issiqlik o'tkazuvchanlikka ega nanozarrachalar, jumladan metall zarrachalar (Cu , Ag , Al), metall oksidlari (Al_2O_3 , CuO , TiO_2) hamda karbon nanostrukturallari (grafen, MWCNT) qo'llanildi.

Nanozarrachalarning o'lchami odatda $d_p = 1 - 100$ nm diapazonda, hajmiy konsentratsiyasi esa $\varphi = 0 - 3\%$ oralig'ida qabul qilinib, bu parametrlar issiqlik uzatish tizimlarida optimal ishlash sharoitlariga mos keladi. Nanozarrachalarning kichik o'lchami va yuqori sirt maydoni ularning suyuqlik muhitida barqaror dispersiyalanishini ta'minlab, issiqlik o'tkazuvchanlikni oshirishda muhim rol o'ynaydi.

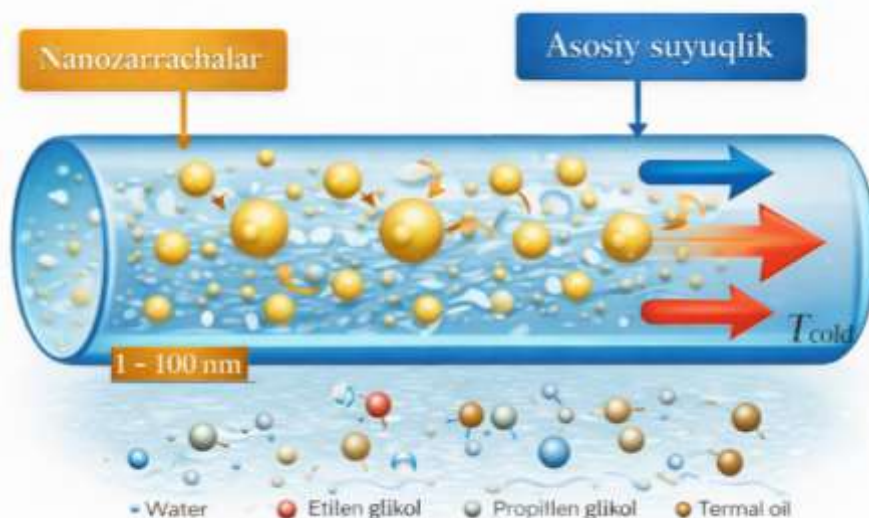
Nano-suyuqliklarning issiqlik uzatish xususiyatlari nanozarrachalarning termofizik xossalari, ularning hajmiy ulushi (φ), zarracha o'lchami (d_p) hamda suyuqlik muhitida bir tekis taqsimlanish darajasiga bevosita bog'liqdir. Shu sababli nano-suyuqliklarni tayyorlash jarayonida zarrachalarning agregatsiyalanishini oldini olish va dispersiyaning barqarorligini ta'minlash muhim ilmiy va texnologik vazifa hisoblanadi. Ushbu maqsadda ultratovush dispersiyasi (ultrasonication), mexanik aralashtirish hamda sirt faol moddalar (surfactants) qo'llaniladi [8].

Nano-suyuqliklarni tayyorlashning asosiy ikki usuli mavjud: bir bosqichli (one-step) va ikki bosqichli (two-step) usullar. Bir bosqichli usulda nanozarrachalar bevosita suyuqlik muhitida sintez qilinadi, bu esa zarrachalarning agregatsiyalanishini minimallashtirib, yuqori darajadagi dispersiya barqarorligini ta'minlaydi. Biroq ushbu usulning texnologik murakkabligi va yuqori xarajatligi uning sanoat miqyosida keng qo'llanishini cheklaydi.

Ikki bosqichli usul esa amaliyotda eng keng tarqalgan va iqtisodiy jihatdan samarali yondashuv hisoblanadi. Bu usulda nanozarrachalar avval alohida sintez qilinadi, so'ngra ular asosiy suyuqlikka qo'shib, mexanik aralashtirish va ultratovush yordamida dispers holatga keltiriladi. Biroq ushbu usulda nanozarrachalarning agregatsiyasi va cho'kishi kabi muammolar yuzaga kelishi mumkin, bu esa nano-suyuqliklarning uzoq muddatli barqarorligini pasaytiradi.

Nano-suyuqliklarning strukturasi va asosiy komponentlari 1-rasmda sxematik tarzda ko'rsatilgan bo'lib, unda nanozarrachalarning asosiy suyuqlik muhitida dispers holatda taqsimlanishi hamda ularning issiqlik uzatish jarayonlariga ta'siri konseptual jihatdan tasvirlangan. Ushbu strukturaviy model nano-suyuqliklarda issiqlik uzatish mexanizmlarini, xususan issiqlik o'tkazuvchanlikning

oshishi, mikro-konvektiv effektlar va Braun harakati bilan bog‘liq issiqlik transportini tushuntirish imkonini beradi.



1-rasm. Metall oksidli nano-suyuqliklar (Al_2O_3/suv , CuO/suv , $SiO_2/etilen glikol$) uchun umumlashtirilgan strukturaviy tuzilish va issiqlik uzatish jarayonining konseptual sxemasi

1-rasmda metall oksidli nano-suyuqliklar (Al_2O_3/suv , CuO/suv va $SiO_2/etilen glikol$) uchun umumlashtirilgan strukturaviy model keltirilgan bo‘lib, unda asosiy komponentlar – asosiy suyuqlik (base fluid) va unda dispers holatda taqsimlangan nanozarrachalar tasvirlangan. Nanozarrachalar suyuqlik muhitida mikroskopik darajada bir tekis taqsimlanib, issiqlik energiyasining uzatilish mexanizmlarini sezilarli darajada intensivlashtiradi.

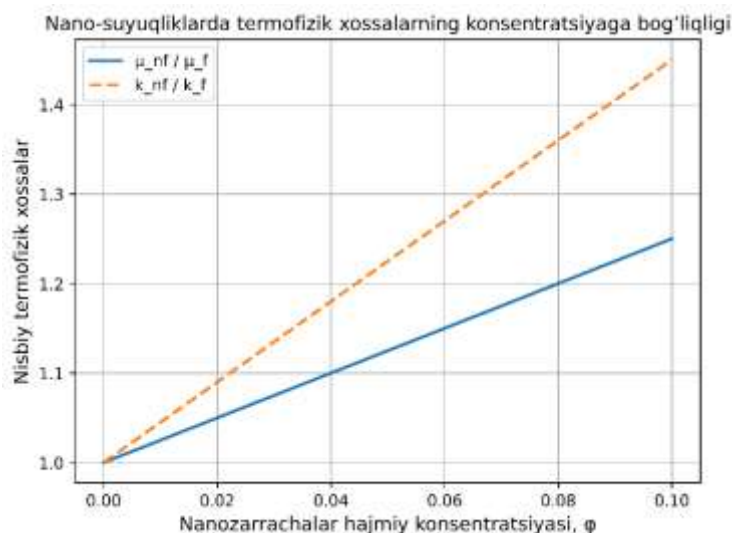
Issiqlik uzatishning kuchayishi bir necha asosiy fizik omillar bilan izohlanadi: (i) nanozarrachalarning yuqori issiqlik o‘tkazuvchanligi tufayli issiqlik oqimining samarali o‘tishi, (ii) zarrachalarning Braun harakati (Brownian motion) natijasida yuzaga keluvchi mikro-konvektiv effektlar, hamda (iii) zarracha–suyuqlik chegarasida hosil bo‘ladigan interfasial issiqlik almashuv jarayonlari. Ushbu omillar nano-suyuqliklarning effektiv issiqlik o‘tkazuvchanligini va konvektiv issiqlik uzatish koeffitsiyentini oshirishga xizmat qiladi.

Nano-suyuqliklarning tarkibi va tayyorlash texnologiyasi ularning dispersiya barqarorligi hamda issiqlik uzatish samaradorligini belgilovchi muhim omillardan biri hisoblanadi. Xususan, zarrachalarning agregatsiyasi, cho‘kishi va flokulyatsiyasi nano-suyuqliklarning termofizik xossalari ta’minlash nano-suyuqliklarni amaliy qo‘llashda hal qiluvchi ahamiyatga ega.

Biroq nano-suyuqliklarning issiqlik-fizik xossalari faqatgina ularning tarkibiy komponentlari bilan cheklanmaydi. Amaliy va nazariy tadqiqotlar shuni ko‘rsatadiki, nano-suyuqliklarning issiqlik o‘tkazuvchanligi (k_{eff}), viskoziteti (μ_{eff}) va konvektiv issiqlik uzatish koeffitsiyenti (h) nanozarrachalarning hajmiy konsentratsiyasi (ϕ), zarracha o‘lchami (d_p), zarracha shakli (sferik, silindrik, plastinkasimon), asosiy suyuqlikning termofizik xossalari (ρ , c_p , k , μ) hamda ish harorati (T) kabi ko‘p sonli parametrlarning o‘zaro ta’siri bilan aniqlanadi.

Shu bois nano-suyuqliklarning issiqlik uzatish xususiyatlarini to‘liq baholash uchun ushbu parametrlarning kompleks va o‘zaro bog‘liq ta’sirini hisobga oluvchi integrallashgan yondashuv zarur hisoblanadi[9].

Nano-suyuqliklarning issiqlik uzatish samaradorligi nanozarrachalar konsentratsiyasi (ϕ) va termofizik parametrlarning o‘zaro ta’siriga bog‘liq. 2-rasmda ko‘rsatilganidek, ϕ ortishi bilan (k_{nf}/k_f oshadi, biroq μ_{nf}/μ_f ham ortib, gidravlik qarshilikni kuchaytiradi. Ushbu qarama-qarshilik nano-suyuqliklarga xos issiqlik-gidravlik kompromissni ifodalaydi va optimal konsentratsiyani tanlash zarurligini ko‘rsatadi.



2-rasm. Al_2O_3/suv nano-suyuqligi uchun nisbiy issiqlik o'tkazuvchanlik (k_{nf}/k_f) va viskozitet (μ_{nf}/μ_f) ning nanozarrachalar hajmiy konsentratsiyasiga (ϕ) bog'liqligi

2-rasmda nanozarrachalar hajmiy konsentratsiyasining (ϕ) ortishi bilan nano-suyuqliklarning nisbiy viskoziteti (μ_{nf}/μ_f) va nisbiy issiqlik o'tkazuvchanligi (k_{nf}/k_f) o'zgarishi tasvirlangan. Ko'rinib turibdiki, konsentratsiya ortishi issiqlik o'tkazuvchanlikni oshiradi, biroq viskozitetning ham sezilarli darajada ortishiga olib keladi. Ushbu qarama-qarshi ta'sir nano-suyuqliklardan foydalanishda optimal konsentratsiyani tanlash zarurligini ko'rsatadi.

Nano-suyuqliklarning issiqlik-fizik xossalarni aniqlashda qo'llanilgan nazariy modellar asosida viskozitet, issiqlik o'tkazuvchanlik va konvektiv issiqlik almashuv jarayonlari tizimli ravishda tahlil qilindi[10].

Einstein modeli. Nano-suyuqliklarning viskozitetini aniqlash uchun taklif etilgan dastlabki nazariy modellardan biri Einstein modeli hisoblanadi. Ushbu model klassik dispers tizimlar nazariyasiga asoslangan bo'lib, dastlab qattiq zarrachalar suyuqlik muhitida juda kichik konsentratsiyada taqsimlangan holatlar uchun ishlab chiqilgan. Einstein modeli nanozarrachalarning hajmiy ulushi juda kichik bo'lgan dispers tizimlarda suyuqlik viskozitetining o'zgarishini baholash imkonini beradi.

Mazkur modelga ko'ra nano-suyuqlikning samarali viskoziteti asosiy suyuqlik viskozitetiga va zarrachalarning hajmiy ulushiga bog'liq bo'ladi. Einstein modeli quyidagi matematik ifoda bilan tavsiflanadi:

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 2.5\phi),$$

bu yerda: μ_{nf} - nano-suyuqlikning samarali viskoziteti, μ_f - asosiy suyuqlik viskoziteti, ϕ - nanozarrachalarning hajmiy ulushi.

Ushbu tenglamaga ko'ra nano-suyuqlik viskozitetining ortishi zarrachalar konsentratsiyasiga chiziqli ravishda bog'liq bo'ladi. Zarrachalar hajmiy ulushi ortishi bilan suyuqlik tarkibidagi dispers faza miqdori ham ortadi, bu esa suyuqlik oqimining ichki qarshiligini oshiradi.

Einstein modeli zarrachalar konsentratsiyasi juda kichik bo'lgan dispers tizimlar uchun yaxshi natijalar beradi. Odatda ushbu model $\phi < 0.02$ bo'lgan holatlar uchun qo'llaniladi. Biroq zarrachalar konsentratsiyasi ortgan sari zarrachalar o'rtasidagi o'zaro ta'sirlar kuchayadi va modelning aniqligi kamayadi. Shu sababli yuqori konsentratsiyali nano-suyuqliklar uchun boshqa modellar, jumladan Brinkman modeli qo'llaniladi.

Shunga qaramay, Einstein modeli nano-suyuqlik viskozitetini nazariy jihatdan baholashda muhim boshlang'ich model hisoblanadi va ko'plab keyingi modellarni ishlab chiqishda asosiy nazariy asos bo'lib xizmat qilgan.

Brinkman modeli. Einstein modeli nano-suyuqliklarning viskozitetini aniqlashda muhim nazariy asos bo'lib xizmat qilsa-da, uning qo'llanish sohasi zarrachalar konsentratsiyasi juda kichik bo'lgan dispers tizimlar bilan cheklanadi. Amaliy sharoitlarda esa nano-suyuqlik tarkibidagi

nanozarrachalar konsentratsiyasi nisbatan yuqori bo'lishi mumkin. Bunday hollarda zarrachalar o'rtasidagi o'zaro ta'sirlar kuchayadi va suyuqlik oqimining gidrodinamik xususiyatlari murakkablashadi. Shu sababli yuqori konsentratsiyali dispers tizimlar uchun Einstein modelining kengaytirilgan shakli sifatida Brinkman modeli taklif etilgan.

Brinkman modeli nano-suyuqlik viskozitetining zarrachalar hajmiy ulushiga nolinear bog'liqligini hisobga oladi va dispers faza konsentratsiyasi ortgan sharoitlarda viskozitetning ortishini aniqroq tavsiflaydi. Ushbu model quyidagi matematik ifoda bilan ifodalanadi

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}},$$

bu yerda: μ_{nf} - nano-suyuqlikning samarali viskoziteti, μ_f - asosiy suyuqlik viskoziteti, ϕ - nanozarrachalarning hajmiy ulushi.

Ushbu tenglamaga ko'ra zarrachalar konsentratsiyasi ortishi bilan nano-suyuqlik viskoziteti sezilarli darajada ortadi. Brinkman modeli dispers tizimdagi zarrachalar soni ortishi natijasida suyuqlikning ichki ishqalanish kuchlari kuchayishini hisobga oladi. Natijada ushbu model zarrachalar konsentratsiyasi nisbatan yuqori bo'lgan nano-suyuqliklar uchun viskozitetni baholashda ancha aniq natijalar beradi.

Maxwell modeli. Nano-suyuqliklarning samarali issiqlik o'tkazuvchanligini aniqlash uchun taklif etilgan eng dastlabki nazariy modellar qatoriga Maxwell modeli kiradi. Ushbu model dastlab ikki fazali dispers tizimlar uchun ishlab chiqilgan bo'lib, unda qattiq zarrachalar suyuqlik muhitida bir tekis taqsimlangan va sferik shaklda deb qabul qilinadi. Maxwell modeli nano-suyuqliklarning issiqlik o'tkazuvchanligini asosiy suyuqlik va zarrachalarning issiqlik o'tkazuvchanlik xossalari hamda zarrachalar hajmiy ulushiga bog'liq holda baholash imkonini beradi.

Maxwell modeli bo'yicha nano-suyuqlikning samarali issiqlik o'tkazuvchanligi quyidagi matematik ifoda bilan aniqlanadi:

$$k_{nf} = k_f \frac{k_p + 2k_f - 2\phi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \phi(k_f - k_p)},$$

bu yerda: k_{nf} - nano-suyuqlikning samarali issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti, k_f - asosiy suyuqlikning issiqlik o'tkazuvchanligi, k_p - nanozarrachalarning issiqlik o'tkazuvchanligi, ϕ - nanozarrachalarning hajmiy ulushi.

Mazkur modelga ko'ra nanozarrachalar konsentratsiyasi ortishi bilan nano-suyuqlikning samarali issiqlik o'tkazuvchanligi ham ortadi. Buning sababi shundaki, nanozarrachalar odatda asosiy suyuqlikka nisbatan yuqori issiqlik o'tkazuvchanlikka ega bo'ladi va ular issiqlik energiyasining suyuqlik muhitida tezroq tarqalishiga yordam beradi.

Maxwell modeli zarrachalar konsentratsiyasi nisbatan kichik bo'lgan dispers tizimlar uchun yaxshi natijalar beradi. Biroq modelda zarrachalar sferik shaklda va o'zaro ta'sir qilmaydi deb qabul qilinganligi sababli yuqori konsentratsiyali yoki murakkab geometriyaga ega zarrachalar mavjud bo'lgan nano-suyuqliklar uchun uning aniqligi kamayishi mumkin. Shu sababli bunday holatlar uchun Maxwell modelining kengaytirilgan shakllari, jumladan Hamilton-Crosser modeli qo'llaniladi..

Hamilton-Crosser modeli. Maxwell modeli nano-suyuqliklarning issiqlik o'tkazuvchanligini baholashda muhim nazariy asos bo'lib xizmat qilsa-da, ushbu model zarrachalarning sferik shaklda bo'lishini va ularning suyuqlik muhitida bir tekis taqsimlanganligini qabul qiladi. Amaliy sharoitlarda esa nanozarrachalar turli geometrik shakllarga ega bo'lishi mumkin, masalan silindrsimon, plastinkasimon yoki tolali shakllarda uchraydi. Zarrachalarning geometrik shakli issiqlik uzatish jarayonlariga sezilarli ta'sir ko'rsatishi mumkin. Shu sababli zarracha shaklining issiqlik o'tkazuvchanlikka ta'sirini hisobga olish uchun Hamilton-Crosser modeli taklif etilgan.

Hamilton-Crosser modeli Maxwell modelining kengaytirilgan shakli bo'lib, unda zarrachalarning geometrik shakli maxsus shakl koeffitsiyenti orqali ifodalanadi. Ushbu model nano-suyuqliklarning samarali issiqlik o'tkazuvchanligini quyidagi matematik ifoda orqali aniqlaydi:

$$k_{nf} = k_f \frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)\phi(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \phi(k_f - k_p)},$$

bu yerda: k_{nf} - nano-suyuqlikning samarali issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti, k_f - asosiy suyuqlikning issiqlik o'tkazuvchanligi, k_p - nanozarrachalarning issiqlik o'tkazuvchanligi,

ϕ - nanozarrachalarning hajmiy ulushi, n - zarracha shakl koeffitsiyenti bo‘lib, u zarrachalarning geometrik shakliga bog‘liq parametr hisoblanadi.

Hamilton-Crosser modeli zarrachalar shaklining issiqlik uzatish jarayonlariga ta‘sirini hisobga olgani sababli sferik bo‘lmagan zarrachalar mavjud bo‘lgan nano-suyuqliklar uchun issiqlik o‘tkazuvchanlikni aniqroq baholash imkonini beradi. Shuning uchun ushbu model turli shakldagi nanozarrachalar qo‘llaniladigan dispers tizimlarda keng qo‘llaniladi.

Konvektiv issiqlik almashuv tahlili. Nano-suyuqliklarda konvektiv issiqlik uzatish quyidagi o‘lchamsiz mezonlar orqali baholanadi:

$$Nu = f(Re, Pr),$$

bu yerda: $Re = \frac{\rho u D}{\mu}$ - Reynolds soni, $Pr = \frac{\mu c_p}{k}$ - Prandtl soni, $Nu = \frac{hD}{k}$ - Nusselt soni.

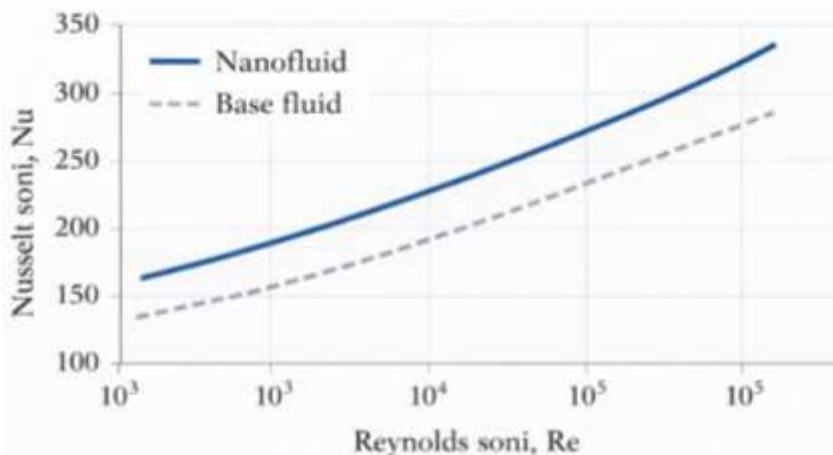
Tahlillar shuni ko‘rsatadiki, nano-suyuqliklarda issiqlik o‘tkazuvchanlikning ortishi (Nu) Nusselt sonining oshishiga olib keladi, viskozitetning ortishi (Re) Reynolds sonining kamayishiga olib keladi. Bu esa issiqlik uzatish jarayonida qarama-qarshi ta‘sirlarning mavjudligini ko‘rsatadi.

Olingan natijalar shuni ko‘rsatadiki, nano-suyuqliklardan foydalanish issiqlik uzatish samaradorligini oshiradi, biroq bu jarayon viskozitetning ortishi bilan birga kechadi.

Natijada quyidagi muhim xulosalar olinadi issiqlik o‘tkazuvchanlik oshadi, viskozitet oshadi, gidravlik qarshilik ortadi, optimal konsentratsiya mavjud

Shu sababli nano-suyuqliklarning samaradorligini baholashda issiqlik-gidravlik samaradorlik mezonini qo‘llash zarur.

Konvektiv issiqlik uzatish jarayonlarining intensivligini baholashda Nusselt mezonining Reynolds mezoniga bog‘liqligini grafik tarzda tasvirlash keng qo‘llaniladi. Ushbu bog‘liqlik suyuqlik oqimining gidrodinamik rejimi va issiqlik uzatish samaradorligi o‘rtasidagi o‘zaro aloqani ifodalaydi. Reynolds mezonini ortishi bilan oqimning turbulentslik darajasi kuchayadi, natijada konvektiv issiqlik uzatish jarayonlari intensivlashadi. Mazkur bog‘liqlik 3-rasmda grafik ko‘rinishda tasvirlangan.



3-rasm. Nusselt mezonining Reynolds mezoniga bog‘liqligi.

3-rasmda Nusselt mezonining Reynolds mezoniga bog‘liqligi ko‘rsatilgan. Reynolds soni ortishi bilan oqimning turbulentsligi kuchayib, issiqlik uzatish intensivlashadi va natijada Nusselt soni ortadi, bu esa konvektiv issiqlik uzatish koeffitsiyentining oshishini bildiradi.

Ushbu ta‘sir ayniqsa Al_2O_3/suv , CuO/suv va $MWCNT/suv$ kabi yuqori issiqlik o‘tkazuvchanlikka ega nano-suyuqliklarda nanozarrachalarning mavjudligi va mikro-konvektiv effektlar sabab yanada kuchliroq namoyon bo‘ladi.

Nano-suyuqliklarning issiqlik-gidravlik samaradorligini baholash. Nano-suyuqliklardan issiqlik almashinuv tizimlarida foydalanish issiqlik uzatish jarayonlarining intensivligini oshirish imkonini beradi. Biroq nanozarrachalarning suyuqlik tarkibiga qo‘shilishi nafaqat issiqlik o‘tkazuvchanlik va konvektiv issiqlik uzatish koeffitsiyentining ortishiga, balki suyuqlik viskozitetining oshishiga ham olib kelishi mumkin. Viskozitetning ortishi esa oqimning gidravlik qarshiligini oshiradi va nasos quvvatining ko‘payishiga sabab bo‘ladi.

Shu sababli nano-suyuqliklardan foydalanishning umumiy samaradorligini baholashda issiqlik uzatish samaradorligi bilan bir qatorda gidravlik yo‘qotishlarni ham hisobga olish zarur. Bunday kompleks baholash **issiqlik-gidravlik samaradorlik mezon** orqali amalga oshiriladi. Ushbu mezon nano-suyuqliklarning issiqlik uzatish afzalliklarini va oqim qarshiligidagi o‘zgarishlarni birgalikda baholash imkonini beradi.

Nano-suyuqliklarning issiqlik-gidravlik samaradorligini baholash uchun ko‘pincha quyidagi ifoda qo‘llaniladi:

$$\eta_{th} - h_{yd} = \frac{(Nu_{nf}/Nu_f)}{(f_{nf}/f_f)^{1/3}},$$

bu yerda: Nu_{nf} - nano-suyuqlik uchun Nusselt mezon, Nu_f - asosiy suyuqlik uchun Nusselt mezon, f_{nf} - nano-suyuqlik uchun ishqalanish koeffitsiyenti, f_f - asosiy suyuqlik uchun ishqalanish koeffitsiyenti.

Agar $(\eta_{th} - h_{yd} > 1)$ bo‘lsa, nano-suyuqliklardan foydalanish natijasida issiqlik uzatish samaradorligi gidravlik yo‘qotishlarning ortishiga nisbatan ustun ekanligini ko‘rsatadi. Aksincha, agar $(\eta_{th} - h_{yd} < 1)$ bo‘lsa, nano-suyuqliklardan foydalanish energetik jihatdan maqsadga muvofiq bo‘lmasligi mumkin.

Nano-suyuqliklarning issiqlik-gidravlik samaradorligini baholash natijalari 1-jadvalda keltirilgan.

Issiqlik-gidravlik samaradorlik mezon. Issiqlik-gidravlik samaradorlik mezon issiqlik uzatish samaradorligi va gidravlik yo‘qotishlar o‘rtasidagi muvozanatni baholash uchun qo‘llaniladi. Ushbu mezon issiqlik almashinuv apparatlari, quvurli issiqlik almashuv tizimlari hamda quyosh issiqlik kollektorlarida nano-suyuqliklardan foydalanish samaradorligini aniqlashda muhim ahamiyatga ega.

Nano-suyuqliklarning termo-gidravlik samaradorligi nanozarrachalar konsentratsiyasi, zarracha o‘lchami, suyuqlikning termofizik xossalari hamda oqim rejimiga bog‘liq holda o‘zgaradi. Odatda nanozarrachalar konsentratsiyasi ortishi bilan issiqlik uzatish samaradorligi oshadi, biroq shu bilan birga gidravlik qarshilik ham ortadi. Shu sababli nano-suyuqliklarning optimal konsentratsiyasini aniqlash issiqlik almashinuv tizimlarini samarali loyihalashda muhim hisoblanadi.

1 -jadval

Al_2O_3/suv nano-suyuqligi uchun issiqlik-gidravlik samaradorlik ko‘rsatkichlari

Nanozarrachalar konsentratsiyasi φ (%)	Nusselt sonining ortishi ΔNu (%)	Ishqalanish koeffitsiyenti ortishi Δf (%)	Issiqlik-gidravlik samaradorlik $(\eta_{th} - h_{yd})$
0.5	8	3	1.05
1.0	15	6	1.12
2.0	24	11	1.18
3.0	30	18	1.15

Jadvaldan ko‘rinib turibdiki, nanozarrachalar konsentratsiyasi ortishi bilan issiqlik uzatish samaradorligi ortadi, biroq gidravlik yo‘qotishlar ham oshadi. Maksimal issiqlik-gidravlik samaradorlik $\varphi \approx 2\%$ da kuzatilib, undan yuqori konsentratsiyalarda samaradorlik pasayishi kuzatiladi.

Xulosa

Mazkur tadqiqotda Al_2O_3/suv nano-suyuqligi misolida nano-suyuqliklarning asosiy termofizik xossalarini baholash uchun qo‘llaniladigan klassik nazariy modellar (Einstein, Brinkman, Maxwell, Hamilton–Crosser) tizimli ravishda tahlil qilindi. Natijalar nanozarrachalar konsentratsiyasining ortishi issiqlik o‘tkazuvchanlikni oshirish bilan birga viskozitetning ham ortishiga olib kelishini ko‘rsatdi, bu esa gidravlik qarshilikning kuchayishi bilan ifodalanadi.

Aniqlandiki, nano-suyuqliklarda issiqlik uzatish samaradorligi va gidravlik yo‘qotishlar o‘rtasida o‘zaro bog‘liq issiqlik-gidravlik kompromiss mavjud bo‘lib, tizim samaradorligi optimal konsentratsiya diapazonida maksimal qiymatga ega bo‘ladi ($\varphi \approx 1-2\%$).

Olingan natijalar nano-suyuqliklarni quyosh issiqlik kollektorlarida, past haroratli gidronik isitish tizimlarida hamda issiqlik almashinuv apparatlarida qo‘llashda parametrlarni optimallashtirish

uchun nazariy asos yaratadi. Kelgusida nanozarrachalarning shakli, o'lchami va agregatsiya jarayonlarini hisobga oluvchi kompleks eksperimental va raqamli modellarni ishlab chiqish muhim ilmiy yo'nalish hisoblanadi.

Adabiyotlar

- [1] Khamraev S., Kamolov B., Tadjiboyev S., Axmedova B., Burieva N., Ochilov M., Samatova S., Sharopov U. Experimental and theoretical analysis of thermo-hydraulic performance of a solar-collector-based hydronic floor heating system under climatic conditions of Uzbekistan. *Energy*, 348 (2026) 140399. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2026.140399>
- [2] S I Khamraev. Study of the combined solar heating system of residential houses. *BIO Web of Conferences* 71, 02017 (2023) <https://doi.org/10.1051/bioconf/20237102017> CIBTA-II-2023
- [3] Uzakov G. N., Charvinski V. L., Ibragimov U. Kh., Khamraev S. I., Kamolov B. I. (2022) Mathematical Modeling of the Combined Heat Supply System of a Solar House. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (5), 412–421. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-5-412-421>
- [4] Sh Mirzaev, J Kodirov, S I Khamraev. Method for determining the sizes of structural elements and semi-empirical formula of thermal characteristics of solar dryers// *APEC-V-2022 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 1070(2022) 012021 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/1070/1/012021.
- [5] Saydullo Khuzhakulov, Zokir Pardaev, Sardor Khamraev. Thermal conditions of systems for solar thermal regeneration of adsorbents // *IPICSE 2020 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 1030 (2021) 012166 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/1030/1/012166
- [6] Uzakov G.N., Khamraev S.I., Khuzhakulov S.M. Rural house heat supply system based on solar energy // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 1030 (2021) 012167 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/1030/1/012167
- [7] Choi S.U.S. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles // *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition.* – San Francisco, USA, 1995. – P. 99-105.
- [8] Eastman J.A., Choi S.U.S., Li S., Yu W., Thompson L.J. Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles // *Applied Physics Letters.* – 2001. – Vol. 78, No. 6. – P. 718–720.
- [9] Keblinski P., Eastman J.A., Cahill D.G. Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids) // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2002. – Vol. 45, No. 4. – P. 855–863.
- [10] Das S.K., Choi S.U.S., Yu W., Pradeep T. *Nanofluids: Science and Technology.* – New York: John Wiley & Sons, 2007. – 397 p.