# KO‘P KOMPONENTLI KOLLOID SUYUQLIK TOMCHISINING BUG‘LANISHIDA KONVEKSIYA-DIFFUZIYA VA KAPILLYAR OQIMLAR FIZIKASI

**Madaminov Ikromjon Baxtiyor o‘g‘li**

Farg‘ona davlat universiteti “Fizika” kafedrasi
1-bosqich tayanch doktoranti

***Annotatsiya***

*Ushbu maqolada qattiq taglikka joylashtirilgan ko‘p komponentli kolloid suyuqlik tomchisining qurish jarayonida shakllanadigan asosiy fizik hodisalar tahlil qilinadi. Biologik suyuqliklar suvli erituvchi, oqsil makromolekulalari, mineral tuzlar va organik birikmalardan iborat murakkab polidispers muhit sifatida qaraladi. Tomchi hajmining kamayishi davomida bug‘lanish oqimining notekis taqsimlanishi, kontakt chizig‘ining mahkamlanishi, namlanish burchagining o‘zgarishi hamda sirt tarangligi gradientlari suyuqlik ichidagi modda ko‘chish jarayonlarini belgilaydi. Kapillyar oqimlar zarrachalarni asosan periferik sohaga yo‘naltirsa, diffuziya konsentratsiya farqlarini kamaytirishga intiladi, Marangoni konveksiyasi esa ushbu transport mexanizmlariga qo‘shimcha ravishda ichki oqimlar yo‘nalishini o‘zgartirishi mumkin. Natijada qurish yakunida tomchi tarkibiy qismlari qayta taqsimlanib, halqasimon, radial yoki zonal tuzilishga ega qattiq qoldiq hosil qiladi. Tadqiqot biologik kolloid tomchilarni suyuqliklar fizikasi, kapillyar hodisalar va fazaviy o‘tishlar nuqtayi nazaridan izohlashga qaratilgan.*

***Kalit so‘zlar:*** *kolloid tomchi, bug‘lanish dinamikasi, kapillyar transport, konveksiya-diffuziya, kontakt chizig‘i, namlanish burchagi, pinning effekti, Marangoni konveksiyasi, sirt tarangligi gradienti, qattiq qoldiq.*

## KIRISH

Qattiq sirt bilan kontaktda bo‘lgan suyuqlik tomchisining bug‘lanishi suyuqliklar fizikasi va kolloid sistemalar nazariyasida muhim o‘rin tutadigan murakkab jarayonlardan biridir. Bu jarayonda tomchi hajmining kamayishi oddiy mexanik qurish hodisasi sifatida emas, balki sirt tarangligi, namlanish, kapillyar bosim, ichki oqimlar, diffuziya va fazaviy o‘tishlarning o‘zaro bog‘langan natijasi sifatida namoyon bo‘ladi. Ayniqsa, tarkibida turli o‘lchamdagi molekulyar va kolloid komponentlar mavjud bo‘lgan suyuqliklarda bug‘lanish jarayoni yanada murakkab kechadi.

Ko‘p komponentli kolloid suyuqlik tomchisida suv asosiy dispers muhit vazifasini bajaradi, oqsil makromolekulalari, mineral tuzlar va organik birikmalar esa erigan yoki muallaq faza sifatida ishtirok etadi. Tomchi qattiq taglik ustida quriganda ushbu komponentlar bir xil taqsimlangan holatda qolmaydi. Bug‘lanish tezligining tomchi markazi va chekka qismida turlicha bo‘lishi, kontakt chizig‘ining mahkamlanishi hamda sirt bo‘ylab hosil bo‘ladigan kuchlanish farqlari moddaning qayta taqsimlanishiga sabab bo‘ladi. Natijada qurish yakunida hosil bo‘lgan qattiq qoldiq tomchi ichida kechgan fizik transport jarayonlarining o‘ziga xos “izini” aks ettiradi.

Biologik suyuqliklar bu nuqtayi nazardan ko‘p komponentli polidispers kolloid sistema sifatida qaralishi mumkin. Bunday suyuqliklarda oqsil, tuz va boshqa organik-mineral komponentlarning mavjudligi tomchi ichida kechadigan kapillyar oqimlar,

diffuzion tekislanish, kristallanish va gelga o‘tish jarayonlarini murakkablashtiradi. Shu sababli biologik kolloid tomchi quriganda markaziy, periferik yoki halqasimon tuzilishga ega qattiq faza shakllanishi mumkin. Mazkur strukturalar faqat moddaning kimyoviy tarkibiga emas, balki suyuqlikning fizik xossalariga, tomchi geometriyasiga, bug‘lanish sharoitiga va qattiq sirt bilan o‘zaro ta’siriga ham bog‘liq [1, B. 15].

Bug‘lanayotgan kolloid tomchilarda zarrachalarning periferik sohaga ko‘chishi ko‘pincha “coffee-ring” effekti bilan tushuntiriladi. Ushbu mexanizmda tomchi chetida bug‘lanish nisbatan kuchliroq bo‘ladi, kontakt chizig‘i esa qattiq sirtga mahkamlangan holatda saqlanadi. Chekka qismda yo‘qotilgan suyuqlik hajmini qoplash uchun tomchi markazidan periferiyaga yo‘nalgan kapillyar oqim yuzaga keladi. Bu oqim erigan va muallaq komponentlarni tomchi chegarasiga tashib, qurish yakunida halqasimon qoldiq hosil bo‘lishiga olib keladi [2, B. 827].

Biroq ko‘p komponentli suyuqliklarda qattiq qoldiqning shakllanishi faqat kapillyar oqim bilan chegaralanmaydi. Diffuziya konsentratsiya gradientlarini kamaytirishga intiladi, Marangoni konveksiyasi esa harorat yoki konsentratsiyaga bog‘liq sirt tarangligi farqlari hisobiga ichki oqimlarni o‘zgartiradi. Shuning uchun tomchi qurishida modda transporti kapillyar oqim, diffuzion ko‘chish va sirt tarangligi gradientlari o‘rtasidagi raqobat natijasi sifatida qaralishi lozim.

Mazkur maqolaning maqsadi qattiq sirt ustida bug‘lanayotgan ko‘p komponentli kolloid suyuqlik tomchisida konveksiya-diffuziya transporti, kapillyar oqimlar, kontakt chizig‘i dinamikasi va Marangoni konveksiyasining fizik mohiyatini tahlil qilishdan iborat. Maqolada biologik suyuqliklar tibbiy-diagnostik obyekt sifatida emas, balki suyuqliklar fizikasi, kolloid sistemalar va fazaviy o‘tishlar nazariyasi uchun model muhit sifatida o‘rganiladi.

## METODOLOGIYA

Tadqiqot nazariy-fizik tahlil va ilmiy adabiyotlar sharhi asosida olib borildi. Asosiy yondashuv sifatida ko‘p komponentli kolloid suyuqlik tomchisi qattiq sirt ustida joylashgan, bug‘lanayotgan ochiq sistema sifatida qaraldi. Bunda tomchining geometriyasi, sirt tarangligi, namlanish burchagi, kontakt chizig‘i, bug‘lanish tezligi, konvektiv oqimlar va diffuzion modda ko‘chishi asosiy fizik parametrlar sifatida tahlil qilindi.

Tomchi shaklining barqarorligi kapillyar kuchlar va gravitatsion ta’sirlarning nisbati bilan belgilanadi. Kichik o‘lchamli tomchilarda sirt tarangligi ustun bo‘lib, tomchi shakli sferik segmentga yaqinlashadi. Bunday holatda kapillyar uzunlik quyidagicha ifodalanadi:

$$l_c = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}}, \qquad (1)$$

bu yerda $\sigma$ - sirt tarangligi, $\rho$ - suyuqlik zichligi, $g$ - erkin tushish tezlanishi. Tomchi shaklining kapillyar kuchlar bilan boshqarilishi (1)-formula orqali baholanadi. Agar tomchi radiusi kapillyar uzunlikdan kichik bo‘lsa, gravitatsion deformatsiya nisbatan kichik bo‘ladi va tomchi shaklini asosan sirt tarangligi belgilaydi.

Tomchi ichida erigan komponentlarning vaqt bo‘yicha o‘zgarishi konveksiya-diffuziya tenglamasi orqali ifodalanadi:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla c = D\nabla^2 c, \quad (2)$$

bu yerda $c$ - erigan modda konsentratsiyasi, $\mathbf{u}$ - suyuqlik oqimi tezligi, $D$ - diffuziya koeffitsiyenti. Modda transporti (2)-tenglama asosida tavsiflanadi. Ushbu tenglamada $\mathbf{u} \cdot \nabla c$ hadi konvektiv transportni, $D\nabla^2 c$ hadi esa diffuzion tekislanishni bildiradi.

Konveksiya va diffuziyaning nisbiy ahamiyati Pekle soni orqali baholandi:

$$Pe = \frac{UL}{D}, \quad (3)$$

bu yerda $U$ - xarakterli oqim tezligi, $L$ - tomchining xarakterli o‘lchami. Konveksiya va diffuziyaning nisbiy ustunligi (3)-formula bilan aniqlanadi. $Pe \gg 1$ bo‘lganda konvektiv transport ustunlik qiladi, $Pe \ll 1$ bo‘lganda esa modda taqsimotida diffuziya asosiy rol o‘ynaydi.

Sirt tarangligi gradientlari ta’sirida yuzaga keluvchi Marangoni konveksiyasi ham alohida tahlil qilindi. Termal Marangoni soni quyidagicha yoziladi:

$$Ma = \frac{\left|\frac{d\sigma}{dT}\right| \Delta T L}{\mu \alpha}, \quad (4)$$

bu yerda $\frac{d\sigma}{dT}$ - sirt tarangligining harorat bo‘yicha o‘zgarishi, $\Delta T$ - harorat farqi, $\mu$ - dinamik yopishqoqlik, $\alpha$ - issiqlik diffuziyasi koeffitsiyenti. Marangoni konveksiyasining intensivligi (4)-ifoda orqali baholanishi mumkin. Bu parametr sirt tarangligi gradientlari hosil qiladigan oqimlarning suyuqlik ichki dinamikasiga ta’sirini baholash imkonini beradi.

## NATIJALAR

Nazariy tahlil shuni ko‘rsatadiki, ko‘p komponentli kolloid suyuqlik tomchisining bug‘lanishi bir necha ketma-ket fizik bosqichlarda kechadi. Dastlab tomchi qattiq sirt ustida muvozanat namlanish burchagini egallaydi. Keyingi bosqichda kontakt chizig‘i sirt notekisliklari, zarrachalar cho‘kishi yoki adgezion ta’sirlar sababli mahkamlanadi. Bu holat pinning effekti deb ataladi.

Kontakt chizig‘i mahkamlangan sharoitda tomchi radiusi deyarli o‘zgarmaydi, lekin bug‘lanish natijasida tomchi hajmi kamayadi va namlanish burchagi pasayib boradi. Periferik sohada bug‘lanish oqimining kuchayishi markazdan chekka tomonga yo‘nalgan kapillyar oqimni yuzaga keltiradi. Ushbu oqim kolloid zarrachalarni tomchi chetiga tashiydi va periferik qoldiq hosil bo‘lishiga sabab bo‘ladi [3, B. 036313].

Ko‘p komponentli biologik kolloid suyuqliklarda bu jarayon oddiy kolloid eritmalarga qaraganda murakkabroq kechadi. Oqsil makromolekulalari sirt faol xususiyatga ega bo‘lib, suyuqlik-havo chegarasida adsorbsion qatlam hosil qilishi mumkin. Mineral tuzlar esa bug‘lanish davomida konsentratsiyasi ortib, kristallanish yoki fazaviy ajralish jarayonlariga olib keladi. Natijada qurigan qoldiq faqat halqasimon emas, balki markaziy, periferik va oraliq zonalardan iborat murakkab struktura hosil qilishi mumkin [1, B. 47].

Tahlil natijasida quyidagi asosiy fizik mexanizmlar ajratildi:

1. Periferik bug‘lanish oqimi kuchayishi natijasida radial kapillyar oqim hosil bo‘ladi.
2. Kontakt chizig‘ining mahkamlanishi tomchi radiusining vaqt bo‘yicha saqlanishiga olib keladi.
3. Oqsil va kolloid zarrachalar kapillyar oqim orqali chekka sohaga tashiladi.
4. Diffuziya konsentratsiya gradientlarini kamaytirishga intiladi, biroq yirik makromolekulalarda diffuziya koeffitsiyenti kichik bo‘lganligi sababli konvektiv transport ustun bo‘lishi mumkin.
5. Harorat va konsentratsiya gradientlari Marangoni oqimlarini hosil qilib, zarrachalar taqsimotini o‘zgartiradi.
6. Qurishning yakuniy bosqichida suyuq fazadan gel yoki qattiq fazaga o‘tish natijasida qoldiq struktura shakllanadi.

## MUHOKAMA

Ko‘p komponentli kolloid suyuqlik tomchisining qurishi yakunida kuzatiladigan qattiq qoldiq morfologiyasi suyuqlik ichidagi transport jarayonlarining bevosita natijasi hisoblanadi. Bunday sistemada zarrachalar yoki erigan komponentlarning fazoviy joylashuvi faqat boshlang‘ich tarkib bilan belgilanmaydi. Aksincha, bug‘lanish tezligining notekisligi, kontakt chizig‘i holati, qattiq taglikning namlanish xususiyati, sirt tarangligi gradientlari va tomchi ichidagi oqimlar o‘zaro ta’sirlashib, yakuniy strukturaning shakllanishiga olib keladi.

Tomchi chekka qismida bug‘lanish intensivligining nisbatan yuqori bo‘lishi suyuqlik hajmida markazdan periferiyaga yo‘nalgan kompensatsion oqimni hosil qiladi. Agar kontakt chizig‘i qattiq sirtga mahkamlangan holatda saqlansa, tomchi radiusi deyarli o‘zgarmaydi va bug‘lanish asosan namlanish burchagining kamayishi orqali kechadi. Bunday sharoitda kapillyar oqim kolloid zarrachalar hamda makromolekulyar komponentlarni tomchi chegarasi tomon tashiydi. Natijada periferik sohada modda miqdori ortib, qurish oxirida halqasimon qoldiq yuzaga kelishi mumkin. Ushbu holat “coffee-ring” effekti bilan bog‘liq bo‘lib, bug‘lanayotgan kolloid tomchilarda eng ko‘p uchraydigan strukturaviy natijalardan biridir [2, B. 827].

Shu bilan birga, ko‘p komponentli kolloid suyuqliklarda zarrachalar faqat kapillyar oqim ta’sirida harakatlanadi, deb qarash yetarli emas. Tomchi ichida konsentratsiya gradientlari hosil bo‘lganda diffuziya jarayoni ularni tekislashga intiladi. Biroq oqsil makromolekulalari va yirik kolloid zarrachalar uchun diffuziya koeffitsiyenti kichik bo‘lganligi sababli ularning harakati ko‘p hollarda ichki konvektiv oqimlarga kuchliroq bog‘liq bo‘ladi. Shuning uchun $Pe$ sonining qiymati modda transportining qaysi mexanizm bilan boshqarilishini baholashda muhim fizik mezon vazifasini bajaradi.

Marangoni konveksiyasi esa tomchi qurishidagi yana bir muhim omil hisoblanadi. Harorat yoki konsentratsiyaning sirt bo‘ylab notekis taqsimlanishi sirt tarangligi gradientini yuzaga keltiradi. Natijada suyuqlik sirtida tangensial kuchlar paydo bo‘lib, ichki oqimlarning yo‘nalishi va intensivligi o‘zgaradi. Ayrim hollarda Marangoni oqimi kapillyar oqimga qarama-qarshi ta’sir ko‘rsatib, zarrachalarning faqat

chekka sohada emas, balki markaziy yoki oraliq zonalarda ham yig‘ilishiga sabab bo‘ladi. Shu sababli qattiq qoldiqning radial, markaziy yoki zonal tuzilishi kapillyar transport va Marangoni konveksiyasi o‘rtasidagi nisbat bilan ham belgilanadi [4, B. 70-90].

Biologik suyuqliklar asosidagi kolloid tomchilarda bu jarayonlar yanada murakkab xarakter kasb etadi. Oqsil makromolekulalari suyuqlikning yopishqoqligi, sirt faol xossalari va gellanish qobiliyatiga ta’sir qiladi. Mineral tuzlar esa bug‘lanish davomida konsentratsiyasi ortib, kristallanish yoki fazaviy ajralish jarayonlarini kuchaytiradi. Organik komponentlar, ion kuchi va makromolekulalar o‘rtasidagi o‘zaro ta’sirlar tufayli qurish oxirida hosil bo‘ladigan fasiya bir jinsli qatlam emas, balki turli fizik zonalardan iborat murakkab qattiq faza sifatida shakllanadi.

Mazkur nuqtayi nazardan, biologik suyuqlik tomchisining qurishi ochiq, dissipativ va muvozanatdan uzoq sistema dinamikasini ifodalaydi. Tomchi suv bug‘lanishi orqali tashqi muhit bilan modda va energiya almashadi, uning ichida esa konsentratsiya, harorat va sirt tarangligi gradientlari yuzaga keladi. Ushbu gradientlar ichki oqimlarni hosil qilib, komponentlarning makroskopik struktura ko‘rinishida tartiblanishiga olib keladi. Demak, fasiya morfologiyasi faqat biologik tarkibning passiv aks etishi emas, balki bug‘lanish, kapillyar transport, diffuziya, konveksiya va fazaviy o‘tishlarning birgalikdagi fizik natijasidir.

Tomchi qurishida hosil bo‘ladigan qattiq qoldiqni boshqarish uchun tajriba sharoitlarini qat’iy nazorat qilish muhim. Jumladan, harorat, nisbiy namlik, tomchi hajmi, qattiq sirt materiali, boshlang‘ich konsentratsiya va qurish vaqti yakuniy struktura ko‘rinishiga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi. Bu parametrlarning o‘zgarishi kontakt chizig‘i dinamikasini, kapillyar oqim tezligini, diffuzion tekislanish darajasini va Marangoni oqimlarining kuchini o‘zgartiradi. Shuning uchun ko‘p komponentli kolloid tomchilarning qurishini o‘rganishda standartlashtirilgan fizik sharoitlarni tanlash ilmiy natijalarning ishonchliligini oshiradi.

Umuman olganda, ko‘p komponentli biologik kolloid tomchi qurishi suyuqliklar fizikasi uchun murakkab, ammo qulay model hisoblanadi. Bu model orqali kapillyar oqimlar, konveksiya-diffuziya transporti, sirt hodisalari, kristallanish va gelga o‘tish jarayonlarini yagona fizik tizim sifatida tahlil qilish mumkin. Shu sababli bunday tadqiqotlar nafaqat biologik suyuqliklar fasiya tuzilmalarini izohlash, balki kolloid materiallar, quriydigan plyonkalar va mikrohajmli suyuqlik sistemalarida struktura hosil bo‘lish mexanizmlarini tushunish uchun ham muhim ahamiyatga ega.

## XULOSA

Ko‘p komponentli kolloid suyuqlik tomchisining qattiq sirt ustida bug‘lanishi murakkab fizik jarayon bo‘lib, unda konveksiya, diffuziya, kapillyar oqim, sirt tarangligi gradientlari va fazaviy o‘tishlar o‘zaro bog‘langan holda namoyon bo‘ladi. Tomchi chekka sohasida bug‘lanish oqimining kuchayishi markazdan periferiyaga yo‘nalgan kapillyar oqimlarni yuzaga keltiradi. Bu oqimlar kolloid zarrachalar va oqsil makromolekulalarining tomchi chetida to‘planishiga sabab bo‘ladi.

Kontakt chizig‘ining mahkamlanishi, ya’ni pinning effekti, halqasimon qoldiq hosil bo‘lishining asosiy shartlaridan biridir. Shu bilan birga, Marangoni konveksiyasi

va diffuzion transport ushbu jarayonni o‘zgartirishi yoki murakkablashtirishi mumkin. Shuning uchun qurigan tomchi qoldig‘ining yakuniy morfologiyasi kapillyar oqim, diffuziya va sirt tarangligi gradientlari o‘rtasidagi nisbiy ustunlikka bog‘liq.

Biologik suyuqliklar fizik jihatdan ko‘p komponentli polidispers kolloid sistemalar bo‘lib, ularning qurishida yuzaga keladigan fasiya tuzilmalari suyuqliklar fizikasi uchun muhim model obyekt hisoblanadi. Bunday yondashuv biologik kolloid tomchilarda modda transporti, fazaviy o‘tish va o‘z-o‘zini strukturaviy tashkil etish jarayonlarini chuqurroq tushuntirish imkonini beradi.

## FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Шабалин В.В. Биофизические механизмы формирования твердофазных структур биологических жидкостей человека. Диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук. Санкт-Петербург, 2018. 375 с.

2. Deegan R.D., Bakajin O., Dupont T.F., Huber G., Nagel S.R., Witten T.A. Capillary flow as the cause of ring stains from dried liquid drops // Nature. 1997. Vol. 389. P. 827-829.

3. Popov Y.O. Evaporative deposition patterns: Spatial dimensions of the deposit // Physical Review E. 2005. Vol. 71. 036313.

4. Hu H., Larson R.G. Marangoni effect reverses coffee-ring depositions // The Journal of Physical Chemistry B. 2006. Vol. 110. No. 14. P. 7090-7094.

5. Brutin D., Starov V. Recent advances in droplet wetting and evaporation // Chemical Society Reviews. 2018. Vol. 47. P. 558-585.

6. Tarasevich Y.Y., Pravoslavnova D.M. Segregation in desiccated sessile drops of biological fluids // The European Physical Journal E. 2007. Vol. 22. P. 311-314.

7. Sobac B., Brutin D. Structural and evaporative evolutions in desiccating sessile drops of blood // Physical Review E. 2011. Vol. 84. 011603.

8. Sefiane K. On the formation of regular patterns from drying droplets and their potential use for bio-medical applications // Journal of Bionic Engineering. 2010. Vol. 7. P. S82-S93.

9. Wilson S.K., D’Ambrosio H.M. Evaporation of sessile droplets // Annual Review of Fluid Mechanics. 2023. Vol. 55. P. 481-509.

10. Yunker P.J., Still T., Lohr M.A., Yodh A.G. Suppression of the coffee-ring effect by shape-dependent capillary interactions // Nature. 2011. Vol. 476. P. 308-311.