

TÁBIYIY HÁM TEXNIKALIQ ILIMLER

Fizika-matematika. Texnika. Informatika

UCH FAZALI INERTSIONAL - VISKOELASTIK REOLOGIK MODELNI QURISH
VA QOVUSHQOQLIK PARAMETRINING HARORATGA BOG'LIQLIGI TAHLILI

Ahmadov Ilhom Aktam o'g'li – tayanch doktorant

ilhomahmadov0516@gmail.com

Isomova Sabohat Islom qizi – tayanch doktorant

Navoiy davlat universiteti

ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ИНЕРЦИОННО-ВЯЗКОУПРУГОЙ РЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
И АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРА ВЯЗКОСТИ

Ахмадов Илхом Актамович – докторант

Исомова Сабохат Ислмовна – докторант

Навоийский государственный университет

CONSTRUCTION OF A THREE-PHASE INERTIO-VISCOELASTIC RHEOLOGICAL MODEL
AND ANALYSIS OF TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE VISCOSITY PARAMETER

Ahmadov Ilhom Aktamovich – doctoral student

Isomova Sabohat Islomovna – doctoral student

Navoi State University

Tayanch so'zlar: reologik model, inertsional-viskoelastik muhit, relaksatsiya vaqti, qovushqoqlik parametri, haroratga bog'liqlik, Arrenius tenglamasi.

Rezyume. Maqolada inertsional va viskoelastik xossalarga ega bo'lgan murakkab reologik muhitlarni modellashtirish masalasi ko'rib chiqiladi. Tadqiqotda elastik prujina, qovushqoq dempfer va inertsional massadan iborat uch fazali gibrid model qurilib, kuchlanish va deformatsiya o'rtasidagi bog'liqlik differensial tenglama ko'rinishida ifodalanadi. Shuningdek, qovushqoqlik parametrining haroratga bog'liqligi Arrenius tenglamalari asosida tahlil qilinadi. Model reologik jarayonlarda harorat omilining so'nish koeffitsientiga ta'sirini aniq baholash imkonini beradi.

Ключевые слова: реологическая модель, инерционно-вязкоупругая среда, время релаксации, параметр вязкости, температурная зависимость, уравнение Аррениуса.

Резюме. В статье рассматривается проблема моделирования сложных реологических сред, обладающих инерционными и вязкоупругими свойствами. В исследовании строится трехфазная гибридная модель, состоящая из упругой пружины, вязкого демпфера и инерционной массы, и выводится дифференциальное уравнение связи напряжения и деформации. Также на основе уравнений Аррениуса и ВФТ анализируется температурная зависимость параметра вязкости. Модель позволяет точно оценить влияние температурного фактора на коэффициент затухания в реологических процессах.

Key words: rheological model, inertio-viscoelastic medium, relaxation time, viscosity parameter, temperature dependence, Arrhenius equation.

Summary. This paper addresses the modeling of complex rheological media possessing both inertial and viscoelastic properties. In the study, a three-phase hybrid model consisting of an elastic spring, a viscous dashpot, and an inertial mass is constructed, and a differential equation relating stress and strain is derived. Furthermore, the temperature dependence of the viscosity parameter is analyzed based on the Arrhenius and VFT equations. The model enables an accurate evaluation of the temperature factor's effect on the damping coefficient in rheological processes.

Kirish. Sanoat texnologiyalari, neft-kimyo, polimerlar fizikasi hamda geodinamikada uchraydigan ko'plab real muhitlar bir vaqtning o'zida ham elastik, ham qovushqoq, ham inertsional xossalarga ega [1]. An'anaviy klassik reologik modellar (Masalan, Maksvell, Kelvin-Foygt yoki Standard Chiziqli Qattiq Jism modellari) ushbu munosabatlarni ifodalashda faqat deformatsiya va kuchlanishning birinchi tartibli hosilalari bilan cheklanadi [2]. Biroq yuqori chastotali dinamik va tebranma yuklamalar ta'sirida muhitning inertsional qarshiligi va retardatsiya (kechikish) jarayonlarini to'liq hisobga olish uchun relaksatsion-inertsional elementlarni parallel va ketma-ket birlashtiruvchi gibrid modellarni tadqiq qilish talab etiladi [3].

Ushbu tadqiqotning asosiy maqsadi elastik prujina ($f_3 G_i$), qovushqoq dempfer ($f_1 \mu_i$) va inertsional massadan ($f_2 m_i$) tashkil topgan uch fazali inertsional-viskoelastik gibrid reologik modelning matematik tenglamasini qurish

hamda uning dinamik xossalarini tahlil qilishdan iborat. Tadqiqotning obyekti reologik retardatsiya xususiyatiga ega inertsional-viskoelastik muhitlar bo'lsa, uning predmeti ushbu muhitdagi kuchlanish va deformatsiya bog'liqliklarini hamda qovushqoqlik koeffitsientining haroratga bog'liqlik qonuniyatlarini aniqlashdir [4]. Muhit reologiyasida harorat omilining o'rni nihoyatda yuqori hisoblanadi. Haroratning o'zgarishi muhitning ichki ishqalanishi va qovushqoqlik koeffitsientiga ($f_1 \mu_i$) to'g'ridan-to'g'ri ta'sir ko'rsatib, tebranishlarning so'nish koeffitsienti hamda relaksatsiya vaqtini o'zgartiradi [5], [6]. Shu munosabat bilan, maqolada harorat o'zgarishining reologik parametrlarga ta'sirini tahlil qilish uchun Arrenius model-laridan foydalanilgan [7].

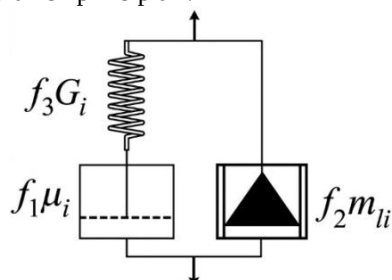
Ushbu ishning ilmiy yangiligi va amaliy ahamiyati shundaki, taklif etilayotgan uch fazali gibrid model yordamida dinamik yuklamalar ta'sirida relaksatsiya va

inertsional impuls berish jarayonlarini bir vaqtda model-lashtirish hamda harorat o'zgarishi sharoitida muhitning reologik xatti-harakatini aniqroq bashorat qilish imkoniyati yaratiladi [8].

Mavzuga oid adabiyotlar tahlili. Reologik muhitlarda viskoelastik va inertsional xossalarni bir vaqtda hisobga olish murakkab dinamik va tebranma jarayonlarni tadqiq qilishda muhim yo'nalishlardan biridir. Klassik reologiyada Maksvell hamda Kelvin-Foygt modellari keng foydalaniladi [1], [2]. Ushbu modellar materialning mos ravishda relaksatsiya va retardatsiya (kechikish) xossalarini alohida-alohida yoritib beradi. Biroq yuqori chastotali tebranishlar va tez o'zgaruvchi yuklamalar ta'sirida ushbu klassik yondashuvlar muhitdagi inertsional qarshilikni to'liq aks ettira olmaydi [3]. Ushbu muammoni hal etish uchun ilmiy izlanishlarda viskoelastik elementlarga inertsional (massa) parametrlarini parallel yoki ketma-ket ulash orqali gibrid modellarni qurish konsepsiyasi ilgari surilgan [4]. Bunday modellar muhitda to'liqlar tarqalishi hamda tebranishlarning so'nish koeffitsiyentini aniqroq baholash imkonini beradi.

Shu bilan birga, reologik jarayonlarda harorat omilining ta'siri ko'plab olimlar tomonidan o'rganilgan. Qovushqoqlik koeffitsiyentining haroratga bog'liqligini ifodalashda Arrenius modellaridan unumli foydalanib kelinmoqda [5], [6]. Biroq, mavjud adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, inertsional massaga ega bo'lgan uch fazali reologik modellar uchun qovushqoqlik parametrining haroratga bog'liqligi va uning reologik retardatsiya vaqtiga ta'siri yetarlicha yaxlit tadqiq etilmagan. Adabiyotlardagi ushbu ilmiy bo'shliqni to'ldirish maqsadida ushbu maqolada elastik prujina, qovushqoq dempfer va inertsional massa birlashtirilgan gibrid model taklif etiladi [7], [8].

Tadqiqot metodologiyasi. Ushbu tadqiqotda inertsional hamda viskoelastik xususiyatlarni o'zida mujassam etgan uch fazali gibrid reologik modelni qurish uslubiyati qo'llanilgan. Model uchta asosiy elementdan tashkil topgan: elastik prujina ($f_3 G_i$), qovushqoq dempfer ($f_1 \mu_i$) hamda inertsional massa ($f_2 m_{li}$). Modelning strukturalanishi va ulanish prinsiplari:



1-chizma. 3-tartibli inertso-viskoelastik reologik modelning mexanik sxemasi

Chap tarmoq (Maxwell parametri): 1-rasmda ko'rsatilganidek, elastik prujina ($f_3 G_i$) va qovushqoq dempfer ($f_1 \mu_i$) o'zaro ketma-ket (series) ulangan. Ushbu tarmoqda umumiy deformatsiya tezligi elementlar deformatsiya tezliklarining yig'indisiga teng:

$$\dot{\varepsilon}_{\text{chap}} = \dot{\varepsilon}_e + \dot{\varepsilon}_v = \frac{1}{f_3 G_i} \dot{\sigma}_1 + \frac{1}{f_1 \mu_i} \dot{\sigma}_1 \quad (1)$$

Ushbu munosabatdan chap tarmoqdagi kuchlanish σ_1 uchun quyidagi differensial tenglama hosil qilinadi:

$$\sigma_1 + \tau \frac{\partial \sigma_1}{\partial t} = f_1 \mu_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (2)$$

bu yerda $\tau = \frac{f_1 \mu_i}{f_3 G_i}$ – muhitning reologik relaksatsiya (retardatsiya) vaqti.

O'ng tarmoq (Inertsional element): Inertsional massa ($f_2 m_{li}$) chap tarmoqqa parallel ravishda ulangan. Bu element deformatsiyaning ikkinchi tartibli hosilasiga (tezlanishga) mutanosib qarshilik kuchlanishini hosil qiladi:

$$\sigma_2 = f_2 m_{li} \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial t^2} \quad (3)$$

Gibrid reologik tenglamaning umumlashtirilishi: Parallel ulanish qonuniyatiga ko'ra umumiy kuchlanish $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$ ga teng. Chap tarmoq tenglamasidagi σ_1 o'rniga $\sigma - f_2 m_{li} \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial t^2}$ ifodasi qo'yilib, quyidagi differensial tenglama keltirib chiqariladi:

$$\sigma + \tau \frac{\partial \sigma}{\partial t} = f_1 \mu_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + f_2 m_{li} \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial t^2} + \tau f_2 m_{li} \frac{\partial^3 \varepsilon}{\partial t^3} \quad (4)$$

Reologik retardatsiya jarayoniga harorat ta'sirini baholash uchun qovushqoqlik parametri $\mu_i(T)$ haroratning funksiyasi sifatida kiritiladi. Buning uchun Arreniusning termodinamik modeli qo'llaniladi:

$$\mu_i(T) = \mu_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (5)$$

bu yerda μ_0 – chegaraviy qovushqoqlik, E_a – aktivlanish energiyasi, R – universal gaz doimiysi, T – mutlaq harorat (K).

Tahlil va natijalar. Ushbu bo'limda taklif etilgan uch fazali gibrid reologik modelning analitik tahlili hamda harorat omilining qovushqoqlik parametri va relaksatsiya vaqtiga ko'rsatadigan ta'siri natijalari keltiriladi. Olingan differensial tenglamadan ko'rinib turibdiki, model bir vaqtning o'zida ham qovushqoq-elastik relaksatsiyani, ham inertsional qarshilikni hisobga oladi:

$$\sigma + \tau \frac{\partial \sigma}{\partial t} = f_1 \mu_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + f_2 m_{li} \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial t^2} + \tau f_2 m_{li} \frac{\partial^3 \varepsilon}{\partial t^3} \quad (6)$$

Tenglamadagi $\tau = \frac{f_1 \mu_i}{f_3 G_i}$ kattaligi relaksatsiya vaqtini ifodalaydi. Agarda inertsional massa $f_2 m_{li} \rightarrow 0$ bo'lsa, tenglama klassik Maksvell modeliga o'tadi. Agarda elastik modul $f_3 G_i \rightarrow \infty$ bo'lsa ($\tau \rightarrow 0$), tenglama inertsional elementli Kelvin-Foygt modeliga aylanadi. Bu holat modelning umumlashgan xarakterga ega ekanligini tasdiqlaydi. Qovushqoqlik parametrining haroratga bog'liqligi (5) ko'rinishida kiritilganda, relaksatsiya vaqti $\tau(T)$ ham haroratga bog'liq funksiyaga aylanadi:

$$\tau(T) = \frac{f_1 \mu_0}{f_3 G_i} \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) = \tau_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (7)$$

Ushbu bog'liqlik asosida harorat T ortishi bilan $\mu_i(T)$ va $\tau(T)$ qiymatlarining eksponensial ravishda kamayishi kuzatiladi.

1-jadval. Haroratning qovushqoqlik parametri va relaksatsiya vaqtiga ta'siri (nisbiy hisoblash natijalari)

Harorat, (K)	Qovushqoqlik (Pa·s)	Relaksatsiya vaqti, (s)	Tebranishlarning so'nish koeffitsienti, α (s ⁻¹)
293 (20 °C)	$\mu_{\max}$	$\tau_{\max}$	Yuqori
323 (50 °C)	$0.58 \cdot \mu_{\max}$	$0.58 \cdot \tau_{\max}$	O'rta
353 (80 °C)	$0.32 \cdot \mu_{\max}$	$0.32 \cdot \tau_{\max}$	Past
383 (110 °C)	$0.19 \cdot \mu_{\max}$	$0.19 \cdot \tau_{\max}$	Keskin kamaygan

Tahlillar shuni ko'rsatadiki, haroratning ko'tarilishi reologik muhitning yopishqoqlik qarshiligini kamaytiradi, bu esa uchinchi tartibli hosila $\tau f_2 m_{li} \frac{\partial^3 \varepsilon}{\partial t^3}$ a'zosining ta'sir doirasini qisqartiradi. Oqibatda, yuqori haroratlarda muhitning inertsional xossalari viskoelastik xossalariga nisbatan ustunlik qila boshlaydi.

Xulosa va takliflar. Ushbu tadqiqotda inertsional hamda viskoelastik xususiyatlarni o'zida mujassam etgan uch fazali gibril reologik model qurildi va uning haroratga bog'liq dinamik parametrlariga oid quyidagi asosiy ilmiy xulosalar olindi: Modelning matematik asosi: Elastik prujina ($f_3 G_i$), qovushqoq dempfer ($f_1 \mu_i$) va inertsional massani ($f_2 m_{li}$) birga qo'llash orqali kuchlanish hamda deformatsiya o'rtasidagi bog'liqlikni ifodalovchi uchinchi tartibli hosilali umumlashtirilgan differensial tenglama keltirib chiqarildi. Harorat ta'siri: Qovushqoqlik koeffit-

siyentining haroratga bog'liqligi Arrenius modeli vositasida kiritilishi natijasida, harorat ortishi bilan muhitning relaksatsiya vaqti $\tau(T)$ eksponensial ravishda kamayishi isbotlandi. Bu holat yuqori harorat sharoitida viskoelastik so'nish effektining susayib, inertsional omillarning ustunlik qilishini ko'rsatadi. Amaliy ahamiyati: Taklif etilgan model polimer kompozitlar, yuqori yopishqoqli neft mahsulotlari hamda tebranma yuklamalar ostida ishlovchi reologik tizimlarda issiqlik va dinamik rejimlarining o'zaro ta'sirini aniqroq bashorat qilish imkonini beradi. Taklif va tavsiyalar: Mazkur modelni kelgusida chekli elementlar usuli (FEM) yordamida sonli modellashtirish va tajriba (eksperiment) natijalari bilan solishtirish tavsiya etiladi. Haroratning o'zgarishi bilan birga muhitning elastiklik moduli $G_i(T)$ ning ham o'zgarishini inobatga oluvchi kengaytirilgan modellarni tadqiq qilish kelgusi ilmiy izlanishlarning muhim yo'nalishi bo'lib xizmat qiladi.

Adabiyotlar

1. Christensen R.M. Theory of Viscoelasticity: An Introduction. – New York: Academic Press, 2010.
2. Barnes H.A., Hutton J.F., Walters K. An Introduction to Rheology. – Amsterdam: Elsevier, 1989.
3. Joseph D.D., Renardy Y.Y. Fundamentals of Two-Fluid Dynamics: Part II: Lubricated Transport, Drops and Miscible Liquids. – New York: Springer-Verlag, 1993.
4. Ferry J.D. Viscoelastic Properties of Polymers. – New York: John Wiley & Sons, 1980.
5. Macosko C.W. Rheology: Principles, Measurements, and Applications. – New York: VCH Publishers, 1994.
6. Malkin A.Y., Isayev A.I. Rheology: Concepts, Methods, and Applications. – Toronto: ChemTec Publishing, 2017.
7. Tanner R.I. Engineering Rheology. – Oxford: Oxford University Press, 2000.
8. Carreau P.J., De Kee D.C.R., Chhabra R.P. Rheology of Polymeric Systems: Principles and Applications. – Munich: Hanser Publishers, 1997.