[4]. И.И.Сафаров. Колебания и волны в диссипативно-неоднородных средах и конструкциях. Ташкент, “Фан”, 1992, с.130.

[5].И.И,Сафаров, М.Х.Тешаев, Ш.Аблокулов. Колебания вязкоупругих ортотропных цилиндрических оболочек с протекающей жидкостью. CMMASS, материалы конференции, 2019.

[6]. И.И,Сафаров, М.Х.Тешаев, Н.И.Кулдашов, Н.Р.Кулмуратов. Дифракция гармонических волн на вязкоупругой пространственной цилиндрической оболочке с жидкостью. CMMASS, материалы конференции, 2019.

[7].В.А.Худояров. «Математическое моделирование динамики вязкоупругих трубопроводов с протекающей жидкостью», “Молодой учёный”, № 8, 2015.

[8]. А.В.Березнев. Собственные колебания криволинейных участков тонкостенных трубопроводов с протекающей жидкостью. Диссерт. на соискание учёной степени, Тюмень, 2005.

[9]. А.Р.Рьянищин. Некоторые вопросы механики систем, деформирующихся во времени. Москва: Гостехиздат, 1949

[10]. М.А.Колтунов. Ползучесть и релаксация. Москва, «Высшая школа», 1976

[11]. Я.Н.Работнов. Элементы наследственной механики твёрдых тел. Москва, «Наука»,1977.

Rajabov Suxrob Xudoyberdiyevich (Kattaqo‘rg‘on davlat Pedagogika instituti “Aniq va tabiiy fanlar” kafedrasi dotsenti; rajabovsuxrob72@gmail.com; UDK 532.516),
Turdimurodov Otabek Farxod o‘g‘li (Kattaqo‘rg‘on davlat Pedagogika instituti “Aniq va tabiiy fanlar” kafedrasi assistent o‘qituvchisi; otabekturdimurodov01091992@gmail.com),
Aqmanova Laylo Qurbonboy qizi (Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch davlat universiteti tayanch doktoranti; aqmonova@gmail.com),
Axmadjonov Murod Umidbek o‘g‘li (Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch davlat universiteti “Algebra va matematik injinering” kafedrasi magistranti; murodbekaxmadjonov7@gmail.com)

YASSI KANALDA REOLOGIK MURAKKAB SUYUQLIKNING NOSTATSIONAR OQIMI TADQIQOTLARI

Annotatsiya. *Bu maqolada rologik murakkab suyuqlikning yassi kanaldagi o‘zgarmas bosim gradiyenti ta’siridagi nostatsionar oqimi masalasi Maksvell modelidan foydalangan xolda analitik usul yordamida yechilgan. Masalani yechishda Laplas almashtirishi qo‘llanilgan. Masalani yechish asosida yassi kanalda elastik qovushoq suyuqlikning nostatsionar oqimida tezlik taqsimlanishi uchun formulalar keltirib chiqarilgan. Keltirib chiqarilgan formulalar yordamaida yassi kanalda elastik qovushoq suyuqlik reologik xususiyatlari ta’sirida nostatsionar oqimdan statsionar oqimga o‘tish jarayonlari olingan formulalar yordamida tahlil qilingan. Tahlil natijalari asosida, elastik qovushoq suyuqlikning elastiklik xususiyatini aniqlovchi Debor sonining katta qiymatlari ta’siri ostidagi o‘tish jarayonlari Nyuton suyuqligi o‘tish jarayonlaridan tubdan farq qilishligi ko‘rsatilgan.*

Kalit so‘zlar: *nostatsionar oqim, Laplas almashtirishlari, bosim gradiyenti, Debor soni, tezlik taqsimlanishi, elastik qovushoq suyuqlik.*

Раджабов Сукроб Худойбердиевич (доцент кафедры «Точные и естественные науки» Каттакурганского государственного педагогического института; rajabovsuxrob72@gmail.com),
Турдимуродов Отобек Фарход угли (ассистент кафедры «Точные и естественные науки» Каттакурганского государственного педагогического института; otabekturdimurodov01091992@gmail.com),
Акманова Лайло Курбонбой кизи (докторант (PhD) Ургенчского государственного университета имени Абу Райхана Беруни; aqmonova@gmail.com),
Ахмаджанов Мурод Умидбек угли (магистрант кафедры «Алгебра и математический инжиниринг» Ургенчского государственного университета имени Абу Райхана; Беруни; murodbekaxmadjonov7@gmail.com)

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИ СЛОЖНОЙ ЖИДКОСТИ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ

Аннотация. *В статье представлено аналитическое решение задачи о нестационарном течении реологически сложной жидкости в плоском канале под действием постоянного градиента давления на основе модели Максвелла. Для решения задачи применяется преобразование Лапласа. На основе полученного решения выведены формулы, описывающие распределение скорости при нестационарном течении вязкоупругой жидкости в плоском канале. С использованием полученных выражений проведён анализ процессов перехода от нестационарного к стационарному течению вязкоупругой жидкости в плоском канале с учётом её реологических свойств. По результатам анализа показано, что при больших значениях числа Деборы, характеризующего упругие свойства вяз-*

коупругой жидкости, характер переходных процессов принципиально отличается от переходных процессов, наблюдаемых при течении ньютоновской жидкости.

Ключевые слова: *нестационарное течение, преобразование Лапласа, градиент давления, число Деборы, распределение скорости, вязкоупругая жидкость.*

Rajabov Sukhrob Khudoyberdievich (Assistant teacher of the department of "Exact and Natural Sciences" of the Kattakurgan State Pedagogical Institute; rajabovsuxrob72@gmail.com),
Turdimurodov Otabek Farhod o'g'li (Assistant teacher of the department of "Exact and Natural Sciences" of the Kattakurgan State Pedagogical Institute),
Aqmanova Laylo Qurbonboy qizi (PhD Researcher at Urgench State University named after Abu Rayhan Beruni; aqmonova@gmail.com),
Akhmadjanov Murod Umidjon o'g'li (magistr of the Department of Algebra and Mathematical Engineering, Urgench State University named after Abu Rayhan Beruni; murodbekaxmadjonov7@gmail.com)

INVESTIGATION OF THE UNSTEADY FLOW OF A RHEOLOGICALLY COMPLEX FLUID IN A PLANAR CHANNEL

Annotation. *This paper presents an analytical solution to the problem of the unsteady flow of a rheologically complex fluid in a planar channel under a constant pressure gradient, based on the Maxwell model. The Laplace transform is employed to obtain the analytical solution. Based on the solution of the problem, formulas describing the velocity distribution in the unsteady flow of a viscoelastic fluid through a planar channel are derived. Using the obtained expressions, the transition processes from unsteady to steady flow in a planar channel are analyzed, taking into account the rheological properties of the viscoelastic fluid. The analysis demonstrates that, at high values of the Deborah number, which characterizes the elastic properties of a viscoelastic fluid, the transient flow behavior differs fundamentally from that observed for a Newtonian fluid.*

Keywords: *unsteady flow, Laplace transforms, pressure gradient, Deborah number, velocity distribution, viscoelastic fluid.*

Kirish. Hozirgi vaqtga kelib, texnik va texnologik sohalarda turli xildagi suyuqliklar ishlatila boshlandi. Ma'lumki, bunday suyuqliklar reologik xususiyatlariga qarab asosan nyuton va nonyuton suyuqliklariga bo'linadi. Bundan tashqari, kundalik hayotimizda foydalaniladigan ko'pchilik suyuqliklar nonyuton suyuqliklari toifasiga kiradi. Bu toifadagi reologik xususiyatga ega suyuqliklar ichida ko'p tarqalgani elastik qovushoq suyuqliklardir [1;8-b.]. Bunday suyuqliklarni truboprovodlar orqali transportirovka qilishda, har xil gidravlik qurilmalarni proyektlash va yaratishda suyuqlik harakatini nazariy jihatdan tadqiq qilish muhim ahamiyatga ega. Elastik qovushoq suyuqliklarning reologik modelini shakllantirish, asosan deformatsiya va haroratning o'zgarishini hisobga olishga asoslangan. Eng umumiy holda muhit holatning reologik tenglamalari Koshi va Finger chekli deformatsiyalari tenzor orqali ifodalangan kuchlanishlar tenzori ko'rinishida berilgan [2;5-b.]. Keyinchalik, xotiraviy suyuqliklarning chiziqli bo'lmagan reologik tenglamalar [1;2-b.] ishlarda Maksvell modeli tipidagi modellarni umumlashtirishga bag'ishlangan. Relaksasion va integral tipida keltirilgan chiziqli bo'lmagan reologik tenglamalarning bir-biriga ekvivalentligi [2;3-b.] ishlarda isbotlangan.

Ta'sir kuchini to'xtatish natijasida elastik qovushoq suyuqliklarda, deformatsiyada yuksizlanish jarayoni vujudga keladi. Masalan, quvurda oqayotgan polimer suyuqligida, bosim gradiyentini olib tashlash yoki nolga tenglash natijasida suyuqlikning asosiy oqim yo'nalishiga qarama-qarshi yo'nalishida, oqimga teskari oqim xosil bo'lishini kuzatish mumkin [8]. Shu munosabatdan kelib chiqqan holda, elastik qovushoq (polimer) suyuqliklarining quvurlardagi harakatini tadqiq qilish muhim ahamiyatga egadir.

[9;1-b.1] ishda bosim gradiyentining pog'onali o'zgarishi bilan hosil qilingan nostasionar oqimda nyuton s;yuqligi uchun maksimal tezlikning vaqt bo'yicha rivoji monoton, elastik qovushoq suyuqlik uchun tebranuvchi xarakterga egaligi ko'rsatilgan. Gromekaning ilmiy faoliyati va qilgan ilmiy tadqiqot ishlari va undan keyingi bu sohada qilingan ishlarning sharhi [12] ishda keltirilgan. Qovushoq suyuqlikning nostatsionar oqimi [13] ishda ko'ndalang kesimi teng tomonli uchburchakdan iborat bo'lgan quvur uchun revojlantirilgan va yechim natijalari asosida tegishli xulosalar keltirilgan.

Yuqorida keltirilgan ishlarda asosan, qovushoq va elastik qovushoq suyuqliklarning yassi kanal va silindrik quvurlardagi bosim gradiyenti ta'siridagi tebranma oqimlari qaralgan. Ammo elastik qovushoq suyuqlikning yassi kanal va silindrik quvurlardagi nostasionar oqimi masalalarining analitik va sonli usuldagi yechimlariga bag'ishlangan ishlar yetarli darajada emas. Shu boisdan ushbu tadqiqot ishida elastik qovushoq suyuqlikning yassi kanaldagi nostatsionar oqimi masalasi analitik va sonli usullarda yechiladi. Aniqlangan yechimlar yordamida elastik qovushoq suyuqlik maksimal tezligining vaqt bo'yicha o'zgarishlari Debor sonining har xil qiymatlarida tahlil qilinadi.

1. Masalaning qo‘yilishi. Reologik murakkab suyuqlik modellari asosida suyuqlik harakati laminar bo‘lgandagi yassi kanallardagi nostasionar oqim masalasi qaraladi. Yassi kanal devorlari orasidagi masofa $2h$ deb belgilanadi, kanal yetarlicha uzun deb faraz qilinib, reologik murakkab suyuqlik oqimi uchun xarakterli nisbiy uzunlik tanlanadi. Bunda kanal eni uzunligining bo‘ylama o‘q bo‘yicha uzunligiga nisbati cheksiz kichik miqdor deb hisoblanadi, shuning uchun oqimlarda ko‘ndalang tezliklar paydo bo‘lmaydi, x o‘qi quvur bo‘ylama o‘qi bo‘yicha gorizontal yo‘nalishda, y o‘qi esa x o‘qiga perpendikular holda vertikal yo‘nalishda olinadi. Yuqorida keltirilgan shartlar asosida suyuqlikning yassi kanaldagi nostasionar harakat tenglamasi kuchlanishlar ko‘rinishida quyidagicha ifodalanadi [14;21-b.]:

$$\rho\frac{\partial(y,t)}{\partial t}=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial\tau(y,t)}{\partial y}, \tag{1}$$

Elastik qovushoq suyuqlikning ryeologik tenlamasi Maksvell modeliga asoslangan tenglama yordamida aniqlanadi [1;5-b.]:

$$\lambda\frac{\partial\tau(y,t)}{\partial t}+\tau=\mu\frac{\partial u(y,t)}{\partial y} \tag{2}$$

Qo‘yilgan masala yechimini qulayroq ko‘rinishda aniqlash uchun, odatda, tenglamalarda qatnashgan kattaliklar ma’lum bir almashtirishlar yordamida o‘lchamsiz shaklga keltiriladi. Bunday almashtirishlarni quyidagicha kiritamiz:

$$u=U\overline{u},\ p=\overline{p}\frac{\mu UL}{h^2},\ \tau=\overline{\tau}\frac{\mu U}{h},\ t=\overline{t}T,\ \ y=h\overline{y},\ \ x=L\overline{x}$$

Bu almashtirishlar yordamida (1) va (2) tenglamalar ushbu ko‘rinishga keladi (tenglamadagi kattaliklar ustidagi chiziqchalar soddalik uchun tushirib qoldirildi):

$$\frac{\partial u(y,t)}{\partial t}=2+\frac{\partial\tau(y,t)}{\partial y},\qquad De\frac{\partial\tau(y,t)}{\partial t}+\tau(y,t)=\frac{\partial u(y,t)}{\partial y} \tag{3}$$

Bu yerda: $-\dfrac{\partial p(x)}{\partial x}=2,\ De=\dfrac{\lambda\nu}{h^2}$

Boshlang‘ich va chegaraviy shartlarni o‘lchamsiz shaklda quyidagicha shakllantiramiz. Vaqtning boshlang‘ich holatida suyuqlik yassi kanalda harakatsiz holatda joylashgan deb qabul qilamiz. Ya’ni:

$$\begin{aligned} &t=0 \quad u(y,0)=0,\quad \tau(y,0)=0\\ &t>0,\quad y=1 \quad u(1,t)=0\\ &t>0,\quad y=-1 \quad u(-1,t)=0 \end{aligned} \tag{4}$$

Shakllantirilgan (1) va (2) tenglamlarni berilgan boshlang‘ich va chegaraviy shartlar asosida yechish uchun analitik va sonli usullarni qo‘llab, yechimlarni solishtirib, umumiy xulosaga kelamiz. Masalani analitik usulda yechish uchun Laplas almashtirishini qo‘llaymiz, sonli usulda yechish uchun chekli ayirmalar metodidan foydalanamiz.

2. Masalani yechish usullari. 2.1. Masalani analitik usulda yechish. Masalani analitik usulda yechish uchun (3) tenglamaga va (4) boshlang‘ich va chegaraviy shartlarga Laplas almashtirishini qo‘llaymiz. Buning uchun ushbu ko‘rinishdagi

$$\tilde{u}(y,s)=s\int_0^\infty u(y,t)e^{-st}dt \tag{5}$$

almashtirishdan foydalanib, (3) tenglamaga (4) boshlang‘ich shartni qo‘llash orqali quyidagi tasvirdagi tenglamani keltirib chiqaramiz:

$$\frac{\partial^2 \tilde{u}(y,s)}{\partial y^2} + i^2 \widetilde{su(y,s)}(1+Des) = -2(1+Des) \tag{6}$$

Tasvirdagi (6) tenglama bir jinslimas oddiy differensial tenglama bo‘lib, bu tenglamaning bir jinsli qismining yechimi quyidagi ko‘rinishda izlanadi:

$$\tilde{u}(y,s) = C_1 \cos i\sqrt{s(1+Des)}y + C_2 \sin i\sqrt{s(1+Des)}y \tag{7}$$

(6) tenglamaning bir jinslimas qismi o‘zgarmas kattalikdan iborat bo‘lganligi sababli, uning yechimini $u^* = A$ ko‘rinishida axtaramiz. Bu yechim $u^* = A = \frac{2}{s}$ ga teng. Keltirib chiqarilgan yechimlarni e’tiborga olib, (6) tenglamaning umumiy yechimini quyidagi ko‘rinishda aniqlaymiz:

$$\tilde{u}(y,s) = C_1 \cos i\sqrt{s(1+Des)}y + C_2 \sin i\sqrt{s(1+Des)}y + \frac{2}{s} \tag{8}$$

Endi chegaraviy shartlar (4) dan foydalanib, noma’lum koeffitsiyentlar C_1 va C_2 aniqlaymiz:

$$C_1 = -\frac{2}{s}\frac{1}{\cos i\sqrt{s(1+Des)}} \qquad C_2 = 0$$

Bu topilgan doimiylarni (8) tenglamaga olib borib qo‘ysak, bizga berilgan (3) tenglamaning tasvirdagi yechimi quyidagicha aniqlanadi:

$$\tilde{u}(y,s) = \frac{2}{s}\left(1 - \frac{\cos i\sqrt{s(1+Des)}y}{\cos i\sqrt{s(1+Des)}}\right) \tag{9}$$

Endi (9) tasvirdagi yechim yordamida aslidagi yechimni aniqlash uchun quyidagi Koshi integraldan foydalanamiz:

$$u(y,t) = \frac{1}{2\pi i}\int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} \tilde{u}(y,s)e^{st}\frac{ds}{s}$$

$$u(y,t) = \frac{1}{2\pi i}\int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} \frac{2}{s^2}\left(\frac{\cos i\sqrt{s(1+Des)} - \cos i\sqrt{s(1+Des)}y}{\cos i\sqrt{s(1+Des)}}\right)e^{st}ds \tag{10}$$

(10) tipdagi integralni hisoblash uchun integral ostidagi funksiyaning maxsus nuqtalarini topib olamiz. Bular maxrajdagi funksiyalar nolga teng bo‘ladigan qiymatlardir, ya’ni, $s = 0$ va $\cos i\sqrt{s(1+Des)} = 0$ transendent tenglamaning ildizlaridan iborat. Bu qiymatlarda (10) integral quyidagicha hisoblanadi:

$s \to 0 ga$ $\qquad \lim_{s\to 0} u(y,t) = 1 - y^2$

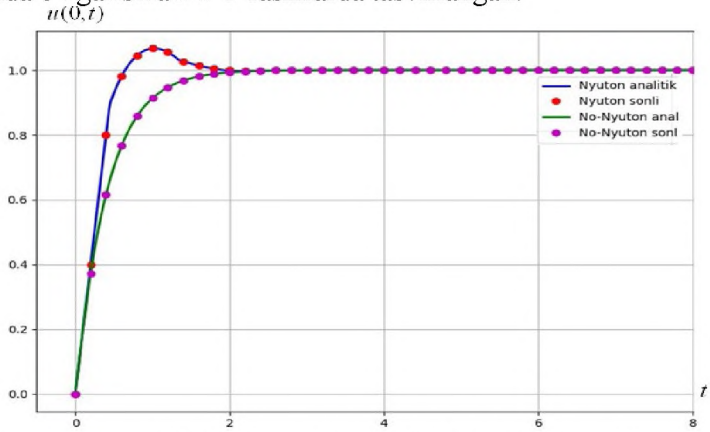
$$s \to s_{in} \qquad \lim_{s\to s_n} u(y,t) = 32\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^n \cos\frac{2n+1}{2}\pi y}{(2n+1)^3 \pi^3 \frac{1-2Des_{in}}{(1-Des_{in})^2}} e^{-s_{in}t}$$

Bu yerda $s = -s_{in}(i = 1;2)$ qiymatlar $Des^2 - s + \frac{(2n+1)^2}{4}\pi^2 = 0$ kvadrat tenglamaning ildizlari. Aniqlangan bu qiymatlar yordamida (3) tenglamaning aniq yechimini quyidagi ko‘rinishda keltirib chiqaramiz:

$$u(y,t)=\left(1-y^2\right)-32\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{i=1}^{2}\frac{(-1)^n\cos\frac{2n+1}{2}\pi y}{(2n+1)^3\pi^3\frac{1-2Des_{in}}{(1-Des_{in})^2}}e^{-s_{in}t} \qquad (11)$$

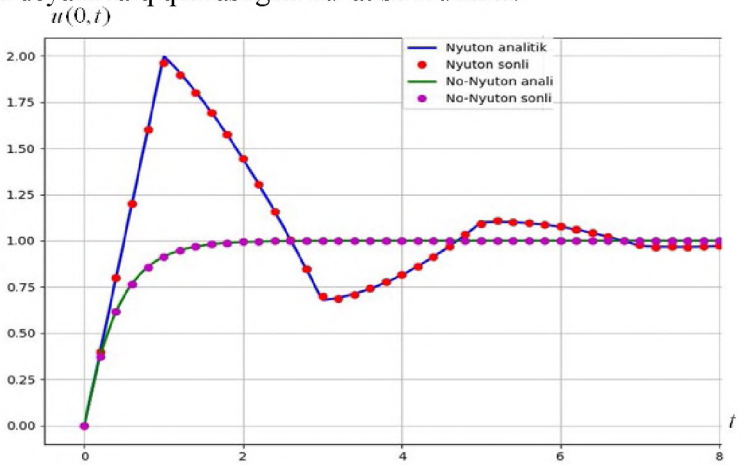
Keltirib chiqarilgan (11) yechim elastik qovushoq suyuqlikning Maksvell modelidagi yassi kanaldagi nostasionar oqimini xarakterlovi aniq yechim bo‘ladi.

3. Hisob natijalari va ularni solishtirish. Analitik yechimda yassi kanal bo‘ylama o‘qidagi maksimal tezlikning vaqt bo‘yicha o‘zgarishi ifodalangan. Bu kattalikning Debor sonining har xil qiymatlaridagi vaqtga bog‘liq ravishda o‘zgarishlari 1–3-rasmlarda tasvirlangan.



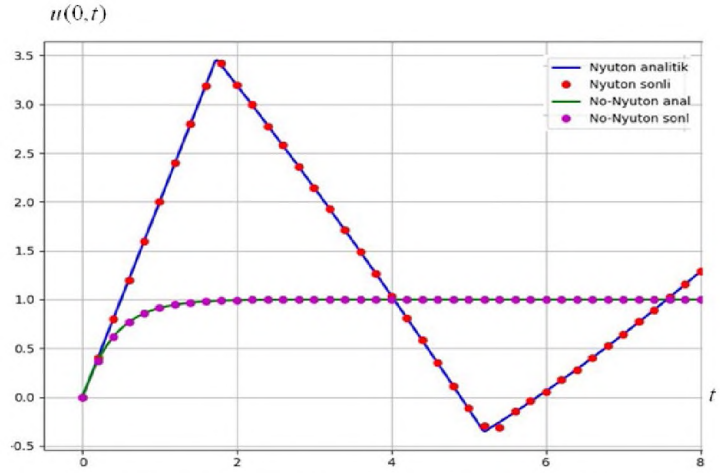
1-rasm. Yassi kanal bo‘ylama o‘qidagi o‘lchamsiz maksimal tezlikning vaqt bo‘yicha o‘zgarishi (Debor soni $De=0.2$ bo‘lganda).

1-rasmdagi grafiklardan, Debor sonining kichik qiymatlarida elastik qovushoq suyuqlikning nostasionar oqimidagi maksimal tezlikning vaqtga bog‘liq ravishdagi o‘zgarishlari nyuton suyuqligi nostasionar oqimidagi o‘zgarishlardan deyarli farq qilmasligini kuzatish mumkin.



2-rasm. Yassi kanal bo‘ylama o‘qidagi o‘lchamsiz maksimal tezlikning vaqt bo‘yicha o‘zgarishi (Debor soni $De=1$ bo‘lganda).

Ryeologik murakkab Maksvell suyuqligining Debor soni $De=1;\ 3$ bo‘lgandagi nostatsionar holatdan statsionar holatga o‘tish jarayonlari, ya’ni, yassi kanal o‘qi bo‘yicha yo‘naltirilgan bo‘ylama tezlik maksimal qiymatining shu o‘qdagi statsionar holatdagi maksimal tezlik qiymatiga nisbatining vaqtga bog‘likligi 2,3-rasmlarda aks ettirilgan. Rasmlardagi grafiklardan ko‘rinadiki, Maksvell modeli asosidagi reologik murakkab suyuqlikning nostasionar holatdan statsionar holatga o‘tish jarayoni Nyuton suyuqligidan, farqli ravishda, vaqtning boshlang‘ich qiymatlarida keskin oshishi, keyinchalik, to‘lqinsimon o‘zgarishlar orqali statsionar holatga o‘tishi aniqlandi. Bundan tashqari, Maksvell modeliga bo‘ysunuvchi suyuqliklarning statsionarlikka o‘tish vaqti Nyuton suyuqligi modeliga bo‘ysunuvchi suyuqlikning o‘tish vaqtidan bir necha barobar katta bo‘lishini 2,3-rasmlarda ko‘rish mumkin. Masalan, 2-rasmda 2 marta; 3-rasmda 3.5 marta oshganligini kuzatish mumkin.



3-rasm. Yassi kanal bo‘ylama o‘qidagi o‘lchamsiz maksimal tezlikning vaqt bo‘yicha o‘zgarishi (Debor soni $De = 3$ bo‘lganda).

Maksvell modeliga bo‘ysunuvchi bunday suyuqliklarning o‘tish jarayonidagi sakrab ortishi, Maksvell modelda hisobga olingan inersiya kuchining ta’siri orqali ro‘y beradi. Bu kuchining ta’siri qo‘yilgan masalada Dyebor sonining o‘zgarishlari orqali ifodalanadi. Debor soning ortishi natijasida, ya’ni, $De = 1;\ 3$ bo‘lganda, o‘tish jarayonidagi maksimal tezlikning 2.5–3.5 marta Nyuton suyuqligi maksimal tezligidan katta bo‘lishi 2 va 3-rasmlarda keltirilgan. Rasmlarda keltirilgan grafiklar analitik va sonli usullar yordamida aniqlangan hisob formulalari asosida chizilgan. Rasmlarda keltirigan grafiklarning uzliksiz chiziqlari analitik yechim natijalari, nuqtalar bilan tasvirlanganlari esa sonli usul natijalariga to‘g‘ri keladi. Grafiklarni solishtirish orqali analitik va sonli usul natijalarining bir-biridan deyarli farq qilmasligini va kompyuter hisob natijasidagi farqlar mingdan birga tengligini aniqlash mumkin.

Xulosa. Reologik murakkab suyuqlikning yassi kanaldagi o‘zgarmas bosim gradiyenti ta’siridagi nostasionar oqimi masalasi Maksvell modelidan foydalangan holda, analitik va sonli usullar yordamida yechildi. Masalani analitik usulda yechishda Laplas almashtirishi qo‘llanildi. Masalani yechish asosida yassi kanalda elastik qovushoq suyuqlikning nostasionar oqimida tezlik taqsimlanishi uchun formulalar keltirib chiqarildi. Keltirib chiqarilgan formulalar yordamaida yassi kanalda elastik qovushoq suyuqlik reologik xususiyatlari ta’sirida nostasionar oqimdan stasionar oqimga o‘tish jarayonlari tahlil qilindi. Tahlil natijalari shuni ko‘rsatdiki, elastik qovushoq suyuqlikning elastiklik xususiyatini aniqlovchi Debor sonining katta qiymatlari ta’siri ostidagi o‘tish jarayonlari Nyuton suyuqligi o‘tish jarayonlaridan tubdan farq qilishligi aniqlandi. $De = 1$ va $De = 3$ bo‘lganda, o‘tish jarayonidagi maksimal tezlikning 2.5 va 3.5 marta Nyuton suyuqligi maksimal tezligidan katta bo‘lishi aniqlandi. Grafiklarni solishtirish orqali analitik va sonli usul natijalarining bir-biridan deyarli farq qilmasligi va kompyuter hisob natijasida aniqlangan farqlar mingdan birdan katta bo‘lmasligi kuzatildi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati:

(1). Астарита Дж., Марруччи Дж. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей. М., “Мир”, 1978, 309 с.

(2). Шульман З.П., Хусид Б.М. Нестационарные процессы конвективного переноса в наследственных средах. Минск, 1983, 256 с.

(3). Шульман З.П., Хусид Б.М. Фенологические и микроструктурные теории наследственных жидкостей. Инст-т тепла и массообмена АН Белоруссии. Препр., 1983, № 4, 50 с.

(4). Трусделл К. Первоначальный курс рациональной механики сплошных сред. М., “Мир”, 1975,592 с.

(5). Улкинсон У.Л. Неньютоновоские жидкости гидромеханика, перемешивание и теплообмен. изд. «МиР» Москва, 1964, 216 с.

(6). Рейнер М. Реология. М., “Наука”, 1965, 163 с.

(7). Акилов Ж.А. Нестационарные движения вязкоупругих жидкостей. Ташкент, “Фан”, 1982, 104 с.

(8). Наврузов К., Хакбердиев Ж.Б. Динамика неньютоновских жидкостей. Ташкент, “Фан”, 2000, 246 с.

(9). Navruzov K., Rajabov S., Abdikarimov N., Turdimuradov O., Nasrulloeva R. Non-stationary flow of viscoelastic fluid in a cylindrical pipe. E3S Web of Conferences 587, 01013 (2024), p. 1–11.

(10). Navruzov K., Begjanov A.S., Abdikarimov N.I., Yusupov S. Examining laminar non-stationary viscoelastic fluid flow between two parallel planes. BIO Web of Conferences 105, 05005 (2024).

(11). Shukurov Z., Navruzov K., Turaev M., Abdikarimov N. Laminar unsteady flow of a viscoelastic liquid in a flat channel. E3S Web of Conferences 587, 01014 (2024), p. 1–10.
(12). Urbanowiz K., Tijsseling A.S. Ten years of Passion: I.S.Gromeka's contribution to Science. Fluids, 2024. 9.57, p. 1–18.
(13). Чернышов А.Д. Нестационарное течение вязкой жидкости в трубе треугольного сечения. МЖГ, 1998, № 5, с. 199–203.
(14). Navruzov K., Rajabov S., Abdikarimov N., Turdimurodov O., Nasrulloev. R, Study of non-stationary flow of viscoelastic incompressible fluid in a flat channel. E3S Web of Conferences 587, 01012 (2024), p. 1–13.
(15). Громека И.С. К теории движения жидкости в узких цилиндрических трубах. Казань, издание университетской типографии, 1882, с. 41–72.
(16). Слезкин Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. М., Гостехиздат, 1956, 520 с.
(17). Тарг С.М. Основные задачи теории ламинарных течений. М., Гостехиздат, 1954, 420 с.
(18). Чарный И.А. Неустановившееся течение в реальной жидкости в трубах. М., "Недра", 1975, с. 296.
(19). Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидромеханика. М.," Наука",1986, с. 736.
(20). Попов Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы. М., "Машиностроение", 1982, 424 с.
(21). Лойцянский Л.Г. МЖГ, Дорфа, М., 2003, 786 с.

Jabborova Mahfuza Sohib qizi (O'zbekiston Milliy universiteti magistranti;
e-mail: mahfuzasohibovana@gmail.com)

PAST ENERGIYALI MOLIBDEN IONLARI KIRITILGAN KREMNIY SIRTINING FOTOEMISSION XUSUSIYATLARI

Annotatsiya. *Kremniy asosidagi qurilmalarning emissiv xossalarini optimallashtirish optoelektronikadagi dolzarb vazifalardan biri bo'lib kelmoqda. Ushbu maqsadda, yuqori vakuum sharoitida n-tur Si (111) sirtiga past energiyali (3 keV) molibden ionlari kiritildi va modifikatsiyalangan sirt UFES usulida tahlil qilindi. Fauler–Keyn nazariyasi asosida o'tkazilgan o'lchovlar shuni ko'rsatdiki, sirtda hosil bo'lgan yangi gibridlangan sathlar hisobiga chiqish ishi 4,11 eVdan 4,03 eVgacha pasaydi. Sirt potensial to'sig'ini bunday maqsadli pasaytirish yuqori samarali quyosh elementlari va sezgir fotodetektorlar yaratishda yordamchi nazariy-texnologik asos bo'lib xizmat qiladi.*

Kalit so'zlar: *kremniy, molibden, implantatsiya, fotoelektron emissiya, kvant chiqishi, chiqish ishi, Fauler–Keyn nazariyasi.*

Жабборова Махфуза Сохиб кизи (Национальный университет Узбекистана, магистрант;
e-mail: mahfuzasohibovana@gmail.com)

ФОТОЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ, ИМПЛАНТИРОВАННОГО НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ МОЛИБДЕНА

Аннотация. *Оптимизация эмиссионных свойств кремниевых приборов остается одной из актуальных задач оптоэлектроники. С этой целью в условиях высокого вакуума была проведена имплантация низкоэнергетических (3 кэВ) ионов молибдена в поверхность Si(111) n-типа, а модифицированная поверхность исследована методом УФЭС. Измерения, проведенные на основе теории Фаулера-Кейна, показали, что за счет образования новых гибридизированных уровней на поверхности работа выхода снизилась с 4,11 эВ до 4,03 эВ. Такое целенаправленное снижение поверхностного потенциального барьера служит вспомогательной теоретико-технологической основой для создания высокоэффективных солнечных элементов и чувствительных фотодетекторов.*

Ключевые слова: *кремний, молибден, имплантация, фотоэлектронная эмиссия, квантовый выход, работа выхода, теория Фаулера-Кейна.*

Jabborova Makhfuza Sohib qizi (National University of Uzbekistan, Master's student;
e-mail: mahfuzasohibovana@gmail.com)

PHOTOEMISSION PROPERTIES OF SILICON SURFACE IMPLANTED WITH LOW-ENERGY MOLYBDENUM IONS

Annotation. *Optimizing the emissive properties of silicon-based devices remains a pressing task in modern optoelectronics. For this purpose, low-energy (3 keV) molybdenum ions were implanted into an n-type Si(111) surface under high vacuum conditions, and the modified surface was analyzed using the UPS method. Measurements based on the Fowler-Kane theory demonstrated that the work function decreased from 4.11 eV to 4.03 eV due to the formation of new hybridized levels at the surface. Such a targeted reduction of the surface potential barrier serves as a supporting theoretical and technological foundation for the development of high-efficiency solar cells and sensitive photodetectors.*