

FTAMP 27.35.31

Ж.А. Кеулимжаева | ©



PhD

ORCID

<https://orcid.org/0000-0002-8822-0336>



С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,



Астана қ., Қазақстан Республикасы



zh.keulimzhayeva@mail.ru

<https://doi.org/10.55956/PYTN1610>

ЭКСПЛУАТАЦИЯЛЫҚ ӘСЕР КЕЗІНДЕГІ ПОЛИМЕРЛІ МОЛЕКУЛАНЫҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛІН ҚҰРУ

Андатпа. Қазіргі кезде адамзат ғарыштық әлем мен өте терең бұрғылау ұңғымаларын бағындыра отырып, күрделі электронды есептегіш машиналардың микроскопиялық тетіктерінен бастап, үлкен каналдар мен су қоймаларының гидроқшаулағыштарын жасауға дейінгі барлық жағдайда, тіпті күнделікті өмірде полимерлік бұйымдарды пайдаланады. Полимерлердің көп түрлі болуы олардың химиялық құрамына, макромолекулаларында жеке бөліктерінің бір-бірімен қалай байланысқанына және олардың кеңістіктегі геометриялық орналасуына байланысты. Бұл мақалада сұйық ортаның, температураның, сыртқы және ішкі қозғалыстың эксплуатациялық әсері кезіндегі полимерлі молекуланың математикалық моделін құру зерттелінген.

Тірек сөздер: эксплуатация, полимер, математикалық модель, молекула, полиэтилен, макромолекула, буын.



Кеулимжаева, Ж.А. Эксплуатациялық әсер кезіндегі полимерлі молекуланың математикалық моделін құру [Мәтін] / Ж.А. Кеулимжаева // Механика және технологиялар / Ғылыми журнал. – 2024. – №1(83). – Б.166-175. <https://doi.org/10.55956/PYTN1610>

Кіріспе. Қазіргі заманғы адам қызметі мен халық шаруашылығын полимерлік материалдарсыз елестету мүмкін емес. Полимерлі материалдар біздің киімімізден бастап ғарыш кемелері мен жер асты мұнай құбырлары, сүңгуір қайықтардың қабығына дейін барлық жерде кездеседі. Оларға деген қызығушылық кездейсоқ емес.

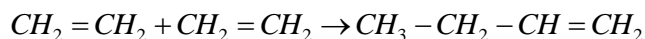
Полимерлер туралы ғылым өз бетінше білім саласы болып Екінші дүниежүзілік соғыстың басында дами бастады және ХХ ғасырдың 50-ші жылдарында бір бүтін ғылым ретінде қалыптасты, бұл кезде техникалық прогрестің дамуында және биологиялық нысандардың тіршілігінде полимерлердің рөлі ескеріле бастаған еді [1].

Жаңа ғылымға үлес қосқан ғалымдардың барлығын атау мүмкін емес. Десекте, полимер туралы ғылымның дамуына негізгі үлес қосқан кейбір ғалымдарды атай аламыз: Г. Штаудингер, Г. Марк [2], П. Флори [3], Г.А. Александров, Ю.П. Лазуркин [4], В.А. Каргин, М.Ф. Волькенштейн [5].

Олардың жұмыстары макромолекулалардың механизмін құруға, сипаттама беруге, полимерлер мен олардың ерітіндісінің негізгі қасиеттерін сандық өрнектеуге және түсіндіруге мүмкіндік берді.

Үлкен молекулалық массасы және өзіне тән бірқатар қасиеттері бар қосылыстарды жоғары молекулалық қосылыстар немесе полимерлер деп атайды.

Ең қарапайым органикалық полимер – полиэтилен, ол этиленнің полимерленуінен түзіледі. Этиленнің екі молекуласы қосылып бутилен молекуласын құрайды:

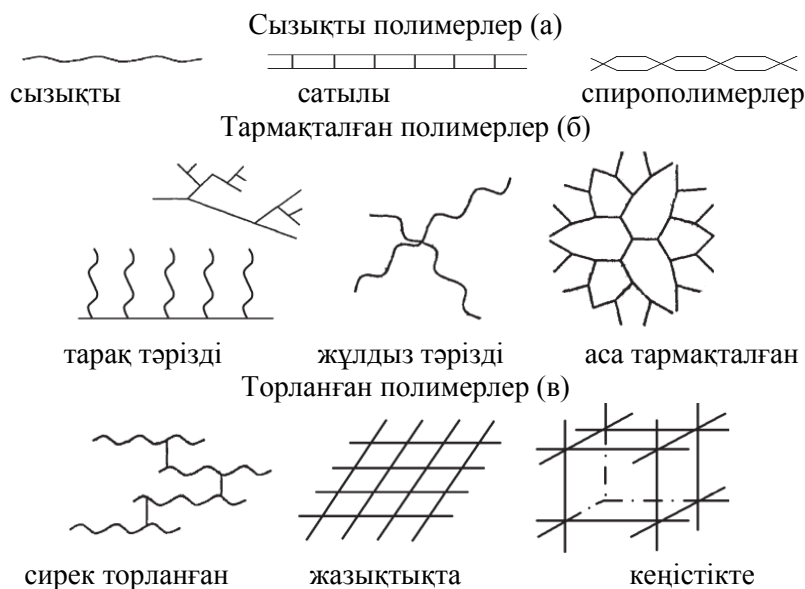


Алғашқы зат, яғни этилен ол *мономер* деп аталады, ал түзілген бутилен *димер* деп аталады. Этиленнің үш молекуласы қосылса «*тример*», ал төртеуі қосылса – «*тетрамер*» және т.б. болады. Егер мономердің *n* молекуласы қосылса, онда «*полимер*» түзіледі (грек тілінен алынған сөз, онда «мер» сөзінің мағынасы «бөлік», ал «поли» - «көп» деген мағынаны білдіреді).

Көп рет қайталанатын мономерлерден тұратын топтар «*буындар*» деп аталады, ал буындардан құралған үлкен молекула «*макромолекула*» деп аталады.

Мономерлерден макромолекулалардың пайда болу процесі полимеризация деп аталады. Осы реакцияның механизміне байланысты мономерлер химиялық құрамы өзгеріссіз немесе өте аз өзгеріспен макромолекулаларға бірігеді. Мономерлер немесе мономерлік қалдықтар макромолекулаға тізбектей байланысқанда мономерлік топтаулар деп аталады. Макромолекуладағы мономерлік топтаулардың саны полимеризация дәрежесі деп аталады.

Макромолекула тізбектерінің құрылымына байланысты полимерлер үш топқа бөлінеді: сызықты, тармақталған және торланған (1-сурет).



Сурет 1. Полимерлі макромолекулалардың әртүрлі құрылымдарының сызбанұсқасы

Полимерлердің өнеркәсіптік өндірісі толығымен тізбекті полимерлерге негізделген, олардың ішінде ең көп тарағандары – сызықты, ал

соңғыларының арасында карбо тізбекті сызықты полимерлер. Оларға ең ірі тоннажды полимерлер – полиолефиндер $[-CH_2-CH_2(R)-]_n$, поливинилхлорид және полистирол $[-CH_2-CHC_6H_5-]_n$ жатады.

Полимердің маңызды механикалық сипаттамалары материалдың жүктеме әсерінен пішінін өзгертуі және оны алғаннан кейін қалпына келтіру қабілетін негіздейтін оның серпінді және деформациялық қасиеттері болып табылады. Механикалық сипаттамаларды анықтау үшін полимердің механикалық сипаттамаларының физикалық мәні мен тұжырымдамалық заңдылықтарын көрсететін математикалық модель құру қажет. Мұндай модель полимердің механикалық сипаттамаларын жеткілікті дәрежеде дәлдікпен орнатуға мүмкіндік беріп қана қоймай, сондай-ақ мүмкін болатын нұсқалардың ең қарапайымы болар еді, сонымен қатар физикалық негізделген параметрлердің ең аз санын қамтиды [6].

Зерттеу шарттары мен әдістері. Жоғарыда айтып өткеніміздей, қазіргі уақытта Қазақстанда су және мұнай-газ құрылысы саласында да полимерлік материалдардан жасалған құбырларды пайдалану қарқынды дамып келеді. Жергілікті жердің экологиялық жағдайы құбыр жүйелерінің сапасы мен сенімділігіне тікелей байланысты. Газ құбырының немесе мұнай құбырының бұзылуы толықтыру мүмкін емес апатқа әкеледі. Инженерлік жүйелердегі осындай жағдайлардың алдын алу үшін бірнеше ондаған жылдар бойы мұнай-газ құбырлары жүйелерінің апатсыз жұмыс істеуіне кепілдік бере алатын заманауи, сенімді және сапалы құбырларды ғана пайдалану қажет. Ол үшін мұнай мен температураның әсерін ескере отырып, сұйық орта мен температураның әсерінен жерасты ортотропты құбырлардың орнықтылығын үлгілеп, ауытқу күшін әр түрлі технологиялық факторлардан есептеу маңызды болып табылады.

[7] жұмыста құбыр қимасының тұрақтылығының дифференциалдық теңдеуін шешу әдістері қарастырылған және сұйық орта мен температураның әсерінен жерасты ортотропты құбырлардың орнықтылығы үлгіленіп, ауытқу күшін әр түрлі технологиялық факторлардан есептеу зерттелінген. Жерасты ортотропты құбырдың орнықтылығын анықтау теңдеуін қорыту үшін Г.А. Ванинның үлгісі пайдаланылған.

Құбыр қимасының тұрақтылығының дифференциалдық теңдеуін зерттеуде, критикалық жүктеме келесі теңдеу бойынша анықталған:

$$L_1 L_2 w = -\frac{hE_2}{R^2} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + L_1 L(\Phi_0, w); \quad (1)$$

мұндағы

$$L_1 \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right) = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + \left(\frac{E_2}{G} - 2\nu_{21} \right) \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{E_2}{E_1} \frac{\partial^4}{\partial y^4}; \quad (2)$$

$$L_2 \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right) = D_1 \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2D \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + D_2 \frac{\partial^4}{\partial y^4}; \quad (3)$$

$$L(\Phi_0, w) = \frac{\partial^2 \Phi_0}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi_0}{\partial y^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 \Phi_0}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}; \quad (4)$$

мұндағы: h – құбырдың қалыңдығы, м; R – құбырдың радиусы, м; w – қабықтың радиалды бағытта иілуі, м; Φ_0 – субкритикалық күш функциясы; E – серпімділік модулі, Па; G – жылжыту модулі, Па.

$$\frac{\partial^2 \Phi_0}{\partial y^2} = N_x, \quad \frac{\partial^2 \Phi_0}{\partial x^2} = N_y, \quad \frac{\partial^2 \Phi_0}{\partial x \partial y} = -N_{xy}; \quad (5)$$

мұндағы N_y, N_{xy}, N_x – критикалық күш.

Ортотроптық жерасты құбырының орнықтылығын есептеу мынадай параметрлерде жүргізілген: құбырдың қаттылығы $SN = 5 \text{ кПа}$, $SN = 10 \text{ кПа}$, $l = 6, 12, 18 \text{ м}$, толтырылған топырақтың тығыздығы 500 кг/м^3 бастап 2500 кг/м^3 дейін, тығыздықтың өзгеру қадамы 20 кг/м^3 , $D = 1400 \text{ мм}$, $P = 2 \text{ МПа}$, әртүрлі бағыттағы материалдың серпімділік модульдері $E_1 = 22,8 \cdot 10^3 \text{ МПа}$, $E_2 = 13,8 \cdot 10^3 \text{ МПа}$, $\nu_{12} = 0,39$, мұнай тығыздығы $\rho_n = 825 \text{ кг/м}^3$, құбыр қабырғасының қалыңдығы $0,017 \text{ м}$.

Ал [8] жұмыста полиэтилен макромолекуласында динамикалық солитондық режимдердің болуы және тұрақтылығы туралы мәселенің сандық шешімі алынған. Валенттік бұрыштар мен валенттік байланыстардың деформациясын ескеретін модель шеңберінде созылудың жергілікті аймақтарының транс-зигзагы бойынша қозғалысын сипаттайтын солитондық шешімдер табылған.

Полимерлі материалдардың механикалық қасиеттерінің математикалық моделі, әдетте, қосымша шарттармен байланысты сипаттамаларға қатысты теңдеулер жүйесі болып табылады. Жүйенің жалғыз шешімін анықтау үшін зертханалық жолмен алынған эксперимент деректері қызмет ете алатын параметрлер қажет. Математикалық моделді жасағаннан кейін қажетті эксперименттік деректер болған жағдайда сандық әдістердің көмегімен механикалық сипаттамаларды анықтау процедурасына көшеді. Бұл кезеңде есептеулерді компьютерлендіру ерекше өзектілікке ие болады, себебі бұл еңбек сыйымдылығын азайтуға және операциялардың дәлдігін арттыруға мүмкіндік береді. Механикалық сипаттамалардың есептік мәндеріне эксперименттік деректермен салыстыру арқылы тексеру жүргізуге болады.

Қазіргі ғылым кез келген моделді оның компьютерлік апробациясыз қарастыра алмайды, ал компьютерлік эксперимент әдістерінің артықшылығы – моделдердің өте кең ауқымын жоғары деңгейде сипаттауға мүмкіндік береді.

Зерттеу нәтижелері және ғылыми нәтижелерді талқылау. Енді жоғарыда келтірілген жұмыстардың негізінде трансзигзаг конформациясындағы $(-CH_2-)_x$ полиэтилен молекуласын қарастырамыз. Транс-зигзагтың схемалық құрылымы 3-суретте көрсетілген.

Полиэтилен молекуласының сызықтық жазық динамикасы мәселесін Кирквуд жарты ғасырдан астам уақыт бұрын зерттегенімен, оның сызықты емес жалпылауы соңғы жылдары ғана теориялық талдаудың нысанасына айналды [9].

Теңсалмақты жағдайдағы молекуланың қаңқасы $p_0 = 1.53A$ (теңсалмақты валентті байланыс) қадамды және $\theta_0 = 113^\circ$ зигзаг бұрышымен (тең салмақты валентті бұрыш) зигзаг тәріздес құрылымда болады. Егер

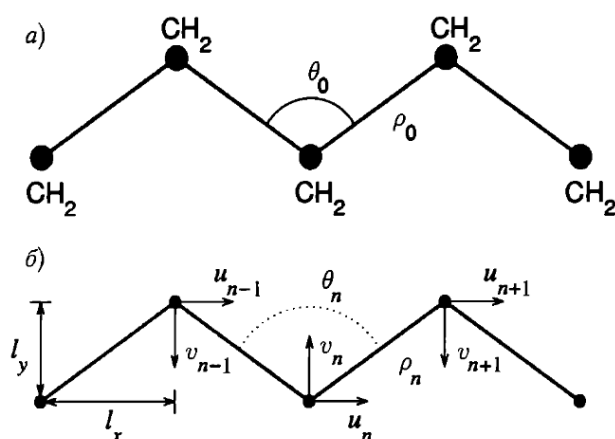
трансзигзагты x осі бойынша бағыттасақ және x жазықтығына орналастырсақ, онда тізбенің теңсалмақтық жағдайындағы n -ші түйінінің координаталары мынадай болады:

$$x_n^0 = nl_x, \quad y_n^0 = (-1)^n \frac{l_y}{2},$$

мұндағы

$$l_x = p_0 \sin\left(\frac{\theta_0}{2}\right), \quad l_y = p_0 \cos\left(\frac{\theta_0}{2}\right)$$

сәйкесінше тізбенің зигзагты бойлық және көлденең қадамдары.



а – құрылым; б – координаталардың локальдік жүйесін таңдау; в – макромолекуланың жазық механикалық моделі.

Сурет 3. Макромолекула

Ыңғайлы болу үшін алдағы уақытта n -ші топтың абсолют координатасынан x_n, y_n салыстырмалы координаталарына өтеміз:

$$u_n = x_n - x_n^0, \quad v_n = (-1)^{n+1} (y_n - y_n^0).$$

мұндағы u_n, v_n – сәйкесінше n -ші буынның бойлық және көлденең ығысуын олардың тепе-теңдік жағдайынан анықтайды, ал тізбектің зигзаг центріне бағыт көлденең ығысу үшін оң болып есептеледі.

n -ші валентті байланыстың ұзындығы және n -валентті бұрыштың косинусы сәйкесінше келесідей

$$p_n = \sqrt{(l_x - w_n)^2 + (l_y - z_n)^2}, \quad \cos(\theta_n) = -\frac{a_{n-1}a_n - b_{n-1}b_n}{p_{n-1}p_n},$$

мұндағы: $w_n = u_n - u_{n+1}$ және $z_n = v_n + v_{n+1}$ – тізбектің n буынының бойлық және көлденең сығулары, ал $a_n = l_x - w_n$, $b_n = l_y - z_n$.

Тізбектің Гамильтонианын төмендегі түрде жазуға болады:

$$H = \sum_n \left(\frac{1}{2} M (\dot{u}_n^2 + \dot{v}_n^2) + V(p_n) + U(\theta_n) \right).$$

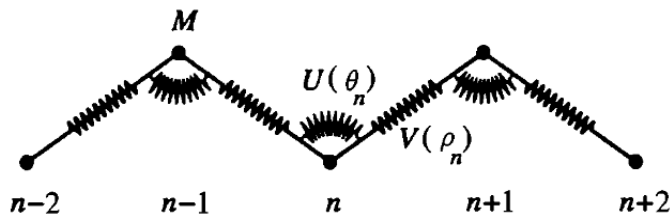
мұндағы $M = 14m_p$ (m_p – протон массасы) тізбегі буынының массасы, n -ші валентті байланыстың потенциалы келесідей

$$V(p_n) = D_0 (1 - \exp(-a(p_n - p_0)))^2,$$

ал n -ші валентті бұрыштың потенциалы

$$U(\theta_n) = \frac{1}{2} \gamma (\cos \theta_n - \cos \theta_0)^2.$$

[10] жұмысқа сәйкес валенттік байланыс энергиясы $D_0 = 334.72$ кДж/моль, параметр $\alpha = 19.1$ нм⁻¹, ал параметр $\gamma = 130.122$ кДж/моль. Қарастырылып отырған транс-зигзагтың жазық механикалық моделі 4-суретте берілген.



Сурет 4. Полиэтилен макромолекуласының жазық механикалық моделі

Барлық берілгендерді массивке енгізе отырып, полимер макромолекуласын құруға алгоритм құрамыз:

```

procedure TForm1.Draw;
begin
d:=1.54;
r:=1;
fi:=180*arccos(2*sqrt(2)/3)/pi;
glClear(GL_DEPTH_BUFFER_BIT xor GL_COLOR_BUFFER_BIT);
glPushMatrix();
for I := 1 to n do
begin
glColor3f(0,0.5,1);
gluSphere (quadObj,r, 20, 20);
glColor3f(2,0.5,0);
glPushMatrix();

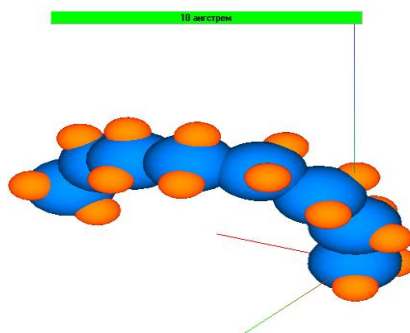
```

```

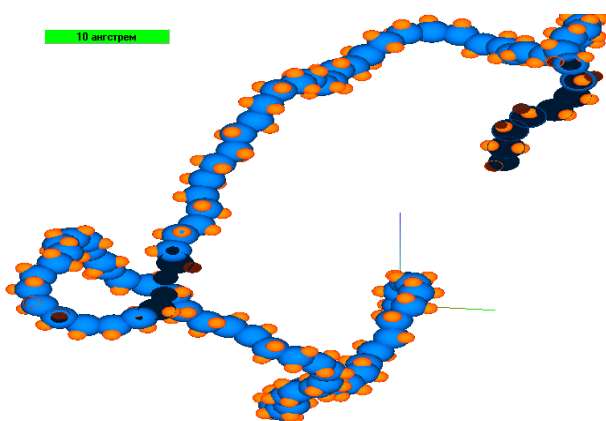
glRotatef(120, 0,0,1);
glRotatef(fi, 0,1,0);
glTranslatef(r,0,0);
gluSphere (quadObj,0.5,      20, 20);
glPopMatrix();
glPushMatrix();
glRotatef(-120, 0,0,1);
glRotatef(fi, 0,1,0);
glTranslatef(r,0,0);
gluSphere (quadObj,0.5,      20, 20);
glPopMatrix();
glTranslatef(0,0,1.52*r);
glRotatef(-90, 0,1,0);
glRotatef(a[i], 1,0,0);
glRotatef(120, 0,1,0);
end;
glPopMatrix();
glBegin(GL_LINE_STRIP);
glcolor3f(10, 0,0);
glVertex3f(5, 0,0);
glVertex3f(0, 0,0);
glcolor3f(0, 10,0);
glVertex3f(0, 5,0);
glVertex3f(0, 0,0);
glcolor3f(0, 0,10);
glVertex(0, 0, 10);
glEnd;
glRotatef(-0.2, 0,0,1);
SwapBuffers(ghDC);
end.

```

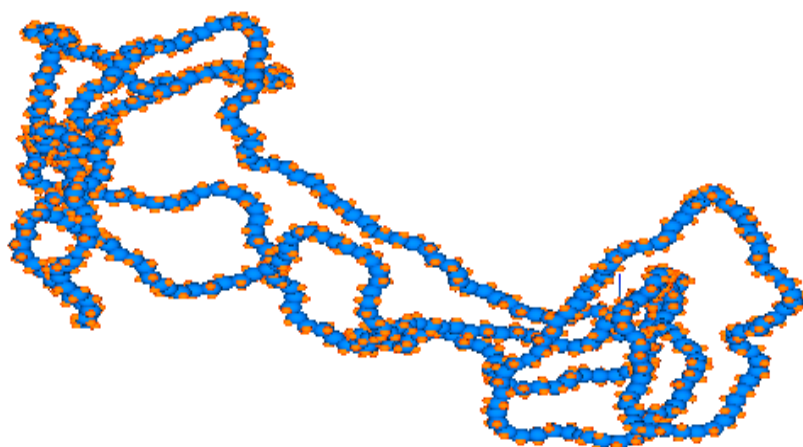
Нәтижесінде келесі суреттерде макромолекулалардың масштабты моделін аламыз:



Сурет 5. Полимер макромолекуласы (8 буын)



Сурет 6. Полимер макромолекуласының құрылысы (100 буын)



Сурет 7. Полимер макромолекуласының құрылысы (100 буын)

Қорытынды. Қорыта келгенде, жүргізілген зерттеулердің нәтижесінде әртүрлі полимерлердің құрылымдары, сипаттамалары және қасиеттеріне шолу жасалынды. Молекулалардың моделін құрудың белгілі әдістері мен алгоритмдері, ерекшеліктері көрсетілді. Полимерлер теориясындағы кейбір белгілі қарапайым моделдеу әдістері қарастырылып, деформациялардың әсерін математикалық модельдеу және макромолекула нанокұрылымының көпбуынды структурасының көрінісі электронды есептеуіш машиналарында жүзеге асырылды.

Әдебиеттер тізімі

1. Байғалиев, Б.Е. Расчет и получение изделий из полимерных материалов. Физико-математическая модель создания пористых материалов [Текст]: монография / Б.Е. Байғалиев. – Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2016. – 288 с.
2. Гейлорд, Н. Линейные и стереорегулярные полимеры [Текст]: учебник / Н. Гейлорд, Г. Марк. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1962. – 551 с.
3. Flory P.J. Molecular size distribution in linear condensation polymers // Journal of the American Chemical Society 1936. V. 58, N. 10. P. 1877-1885.
4. Александров, А.П. Изучение полимеров. Высокоэластические деформации полимеров [Текст] / А.П. Александров, Ю.С. Лазуркин // Журн. техн. физики. – 1939. – Т.9. вып. 14. – С. 1021-1029.

5. Волькенштейн, М.В. Конфигурационная статистика полимерных цепей [Текст] / М.В. Волькенштейн. – Москва-Ленинград: Изд-во АН СССР, 1959. – 466 с.
6. Ерғожин, Е.Е. Полимерлердің физикасы мен химиясы [Мәтін]: жоғары оқу орындары студенттеріне арналған оқулық / Е.Е. Ерғожин, М.Қ. Құрманәлиев. – Алматы, 2012. – 392 б.
7. Шевцов, А.Н. Моделирование и расчет устойчивости сечения подземных трубопроводов из ортотропного материала при эксплуатационных воздействиях [Текст] / дисс... канд. техн. наук / А.Н. Шевцов. – Алматы: 2010. – 203 с.
8. Шевцов, А.Н. О некоторых моделях полимерных макромолекул [Текст] / А.Н. Шевцов, Ж.А. Кеулимжаева, Е.А. Алпысбаев // Theoretical & Applied Science. – 2013. – №11(7), – С. 26-40.
9. Жунисбеков, С. О проблеме моделирования макромолекул полимеров [Текст] / С. Жунисбеков, А.Н. Шевцов, Ж.А. Кеулимжаева // Theoretical & Applied Science. – 2014. – №3 (11). – С.35-62.
10. Sumpter, B.G., Noid, D.W., Liang, G.L., Wunderlich, B. // Adv. Polm. Sci. 1994. B. 116. P. 29.

Материал редакцияға 07.02.24 түсті.

Ж.А. Кеулимжаева

*Казахский агротехнический исследовательский университет имени С.Сейфуллина,
г. Астана, Казахстан*

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОЛИМЕРНЫХ МОЛЕКУЛ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Аннотация. В настоящее время человечество покоряя космический мир и очень глубокие буровые скважины, использует полимерные изделия во всех случаях, даже в повседневной жизни, начиная от микроскопических механизмов сложных электронных вычислительных машин и заканчивая созданием гидроизоляторов больших каналов и водоемов. Многообразие полимеров зависит от их химического состава, от того, как отдельные части их макромолекул взаимодействуют друг с другом и от их геометрического положения в пространстве. В данной статье рассматривается математическая модель полимерной молекулы при эксплуатационном воздействии жидкой среды, температуры, внешнего и внутреннего движения.

Ключевые слова: эксплуатация, полимер, математическая модель, молекула, полиэтилен, макромолекула, звено.

Zh.A. Keulimzhayeva

S.Seifullin Kazakh AgroTechnical Research University, Astana, Kazakhstan

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF POLYMER MOLECULES UNDER OPERATIONAL IMPACTS

Abstract. At present, humanity, conquering the space world and very deep boreholes, uses polymer products in all cases, even in everyday life, from the microscopic mechanisms of complex electronic computers to the creation of waterproofing of large canals and reservoirs. The variety of polymers depends on their chemical composition, on how the individual parts of their macromolecules interact with each other and on their geometric position in space. This article discusses a mathematical model of a polymer

molecule under the operational impact of a liquid medium, temperature, external and internal movement.

Keywords: exploitation, polymer, mathematical model, molecule, polyethylene, macromolecule, link.

References

1. Baigaliev, B.E. Raschet i polucheniye izdeliy iz polimernykh materialov. Fiziko-matematicheskaya model' sozdaniya poristykh materialov [Calculation and production of products from polymeric materials. Physical and mathematical model for the creation of porous materials: monograph] – Kazan: Publishing h. of KNRTU-KAI, 2016. – 288 p. [in Russian].
2. Gaylord, N., Mark, G. Lineynyye i stereoregulyarnyye polimery [Linear and stereoregular polymers]. Textbook. – Moscow: Izd-vo inostrannoy literatury [Publishing House of Foreign Literature], 1962. – 551 p. [in Russian].
3. Flory P.J. [Molecular size distribution in linear condensation polymers] // Journal of the American Chemical Society 1936. V. 58. N. 10. P. 1877-1885.
4. Alexandrov A.P., Lazurkin Yu.S. Izucheniye polimerov. Vysokoelasticheskiye deformatsii polimerov [Study of polymers. Highly elastic deformations of polymers] // Zh. tech. physics. 1939. V.9.14. P. 1021-1029. [in Russian].
5. Volkenstein M.V. Konfiguratsionnaya statistika polimernykh tsepey [Configuration statistics of polymer chains]. Moscow-Leningrad, Publishing house of the academy of sciences of the USSR, 1959. – 466 p. [in Russian].
6. Ergozhin E.E., Kurmanaliev M.K. Polimerlerdiñ fizikası men ximiyası [Physics and chemistry of polymers]. – Almaty, 2012. – 392 p. [In Kazakh]
7. Shevtsov A.N. Modelirovaniye i raschet ustoychivosti secheniya podzemnykh truboprovodov iz ortotropnogo materiala pri ekspluatatsionnykh vozdeystviyakh [Modeling and calculation of the stability of the section of underground pipelines made of orthotropic material under operational impacts]. Candidate dissertation. – Almaty, 2010. – 203 p. [in Russian].
8. Shevtsov, A.N., Keulimzhayeva, Z.A., Alpysbayev, E.A. O nekotorykh modelyakh polimernykh makromolekul [On some models of polymeric macromolecules]. Theoretical & Applied Science. No. 11(7), 2013. – P. 26-40. [in Russian].
9. Zhunisbekov, S., Shevtsov, A.N., Keulimzhaeva, Zh.A. O probleme modelirovaniya makromolekul polimerov [On the problem of modeling polymer macromolecules] // Theoretical & Applied Science. No. 3 (11), 2014. – P.35-62. [in Russian].
10. Sumpter B.G., Noid D.W., Liang G.L., Wunderlich B. // Adv. Polm. Sci. 1994. B. 116. – 29 p.