



ХИМИКОТЕХНОЛОГИЧЕН И МЕТАЛУРГИЧЕН УНИВЕРСИТЕТ

**ДЕПАРТАМЕНТ ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧНИ И ТЕХНИЧЕСКИ
НАУКИ КАТЕДРА „ПРИЛОЖНА МЕХАНИКА”**

инж. Михаил Димитров Колев

**ПРОГНОЗИРАНЕ НА МЕХАНИЧНОТО ПОВЕДЕНИЕ НА
ЕЛАСТОМЕРИ В УСЛОВИЯ НА ТЕЧНИ СРЕДИ И
ЦИКЛИЧНО НАТОВАРВАНЕ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователната и научна степен „доктор”

по научна специалност 5.1. Машинно инженерство

(Приложна Механика)

Научен ръководител: доц. д-р инж. Александър Стоянов Александров

Научно жури:

1. Проф. д.т.н. Климент Благоев Хаджов – председател, рецензент
2. Чл. кор. проф. дтн инж. Ангел Иванов Балтов рецензент
3. Проф.д-р инж. Николай Донков Баровски
4. Проф. д.т.н. Митко Минков Миховски
5. доц. д-р инж. Александър Стоянов Александров

София, 2014

Дисертационният труд е написан на 124 страници, съдържа 41 фигури, 2 таблици и приложение от 8 математични програми. Цитирани са 165 източника.

Представеният дисертационен труд е обсъден и приет за защита на заседание на разширен катедрен съвет в катедра „Приложна Механика” при ХТМУ-София, състояло се на 18.02.2014г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се проведе на 22.05.2014г. от 14:00 часа в зала 424, сграда „А” на ХТМУ.

Материалите са на разположение на интересующите се на интернет страницата на ХТМУ и в отдел „Научни дейности”, стая 406, етаж 4, сграда „А” на ХТМУ.

Не бихме могли да изброим техническите изделия от еластомери само в областта на транспорта. Те не се явяват просто заместители на традиционните материали, а обратно – без тях трудно можем да си представим съвременните конструкции, в които вибрациите се поемат от еластомери под формата на разнообразни виброгасители, тампони, мембрани, гуменно-метални изделия и др. Тези елементи не само поддържат устойчивостта и геометрията на механизмите, но работят в повечето случаи, в условията на различни течни и газови среди, вибрации и температура.

Каучукът и гумите принадлежат към класа полимерни материали, наречени еластомери. Широкото разпространение на тези материали се дължи преди всичко на уникалните им свойства – вискоеластични деформации, съществена дисипация на енергията, зависимост от предисторията на натоварване, устойчивост на въздействието на външни агресивни среди, надеждност, дълготрайност и др.

В тази връзка възниква необходимостта за ефективно пресмятане и прогнозиране на механичното им поведение. Особен интерес представлява пресмятането при екстремни условия на въздействие на продължителни и циклични натоварвания, външни агресивни среди и температура.

Традиционните методи за идентификация на необходимите параметри и технически константи са свързани с дълготрайни експерименти изискващи понякога месеци и години. Времето от синтеза на един нов конструкционен полимер до внедряването му в практиката без риск естествено зависи от продължителността и сигурността на тези методи.

В настоящата работа, изхождайки от тези мотиви е направен опит за добиване на тези знания от краткотрайни експерименти в условия на течна обкръжаваща среда и циклично натоварване.

ОБЕМ НА РАБОТАТА

Първата глава на работата е литературен обзор, в който са разгледани основните характеристики на еластомерите:

- Структура, свойства и приложение;
- Дифузия на течни среди;
- Подходи за описание на механичното поведение;
- Пълзене в условия на течни среди и циклично натоварване;

- Теплообразуване при циклично натоварване;
- Прогнозиране деформативността;

Въз основа на направения литературен обзор дисертацията си поставя за цел:

Изучаването на механичното поведение и по-специално неговото проявление чрез деформативността на еластомерите в условия на течни индустриални среди и циклично натоварване.

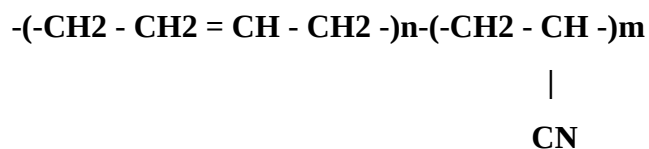
Основни задачи произтичащи от поставената цел са:

1. Изследване кинетиката на проникване на течни индустриални среди в конструкционни еластомери в условия на ненапрегнато състояние и в условие на напрегнато състояние породено от постоянен статичен товар и допълнително наслагващо се циклично натоварване.
2. Изучаване процесите на теплообразуване и дисипация на енергия при циклично натоварване.
3. Получаване на експериментални резултати за краткотрайно пълзене при различни нива на сорбирана течна среда от еластомера и различни честоти на циклично натоварване.
4. Изследване на възможността за прогнозиране на деформационното поведение от експерименти на краткотрайно пълзене в условия на циклични натоварвания. Вибро-временна аналогия (ВбВА) и в условие на течна среда, течностно-временна аналогия (ТнВА).
5. Изследване на възможността за многопараметрово прогнозиране на деформативността чрез функция на множествена вибро-течно-временна редукция (Вб-ТнВР), осъществена посредством вибро-базирано хлъзгане в течностно-временна суперпозиция.

ГЛАВА 2. ОБЕКТИ И МЕТОДИКА НА ИЗСЛЕДВАНЕ. АПАРАТУРА ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ЕКСПЕРИМЕНТИТЕ

В настоящия дисертационен труд са изпитвани три еластомерни състава:

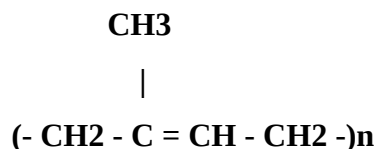
1. Бутадиеннитрилов каучук (БН) - еластомер изграден от бутадиен и акрилонитрил със схематичната формула



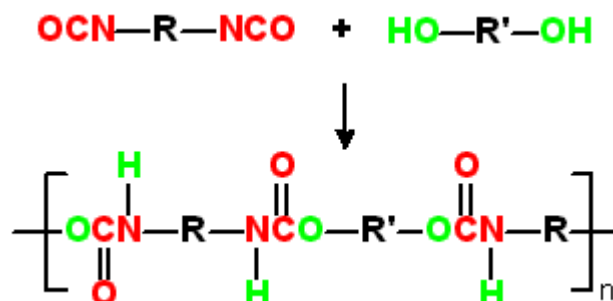
където **n** и **m** показват степента на полимеризация, т. е. броя на повтарящите се елементарни звена във формулата. В конкретните еластомерни състави е използван каучук с название СКН - 40М със съдържание на акрилонитрил 40% в макромолекулата.

2. Полиизопренов каучук (ПИ)- синтетичен аналог на естествения каучук. По микроструктура той представлява 1,4-цисполизопрен, с много високо съдържание на тези звена.

Като конкретен еластомер сме използвали СКИ - 3 със следната формула



3. Полиуретан (ПУ) - полимер произвеждащ се от изоамини и алкохоли. Полиуретановите покрития и лепила в много случаи се получават от изоцианити, които се смесват с друг компонент - различни съединения с активен атом на водорода, епоксидни смоли или техните производни с амини. Многовалентните алкохоли се използват за направата на твърдите полиуретани с молекулни тегла в стотици.



Избора на течните среди е съобразен с изискването за различие във физичните им свойства.

- Вода - силно полярна течност;
- Нафта (дизелово гориво) - неполярна течност;
- Машинно масло (МД-10) гориво- смазочен материал;
- 20%-ен воден разтвор на сярна киселина – електролит;
- Бензин – представител на леките фракции на горивата.

Изходни пробни образци.

1. Тънки ленти
2. Цилиндрични гуменно-метални виброгасители

Апаратура

За провеждане на експериментите е използвана, както стандартна (заводски произведена), така и специално конструирана в катедра «Приложна механика» апаратура.

1. Стандартна апаратура:
 - Машина за якостни изпитания INSTRON mod. 1185;
 - MPC-2- машина за циклично натоварване за опън и натиск;
 - MMS-1- машина на Гудрич за определяне на топлообразуването.
2. Апаратура конструирана в катедра “ Пр. Механика”
 - Експерименталната уредба за механични изпитания на материали в условия на променливи температура, натоварване и концентрация на агресивни течни и газови среди;
 - Експериментална уредба за изпитване на опън-натиск на полимерни материали в условия на течнаобкръжаваща среда;
 - Устройство за създаване на допълнително циклично натоварване.

Глава 3. ДИФУЗИЯ НА ТЕЧНИ СРЕДИ В ЕЛАСТОМЕРИ

3.1. Решения на уравнението на Фик.

Приемаме факта, че процесът на дифузия не е съпроводен с протичане на химически реакции и набъбване на материала и използваме уравнението на Фик, тъй като добре описва този процес. В литературата са известни различни решения на уравнението на Фик. За изотропна среда при $D = const$, в Декартови координати за тримерна дифузия решението се дава с уравнението

$$\frac{\partial C}{\partial t} \equiv D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right). \quad (3.2a)$$

При начално условие

$$C(x, y, z, 0) = 0 \quad (3.3)$$

и гранично условие

$$C(\pm a/2, y, z, t) = C_\infty; \quad C(x, \pm b/2, z, t) = C_\infty; \quad C(x, y, \pm l/2, t) = C_\infty. \quad (3.4)$$

за относителната средна концентрация се получава

$$\begin{aligned} c &\equiv \frac{C(x, y, z, t)}{C_\infty} = \\ &= 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_n A_m A_k \left(\cos \mu_n \frac{2x}{a} \right) \left(\cos \mu_m \frac{2y}{b} \right) \times \\ &\times \left(\cos \mu_k \frac{2z}{l} \right) \exp \left[-(\mu_n^2 K_1^2 + \mu_m^2 K_2^2 + \mu_k^2 K_3^2) F_0 \right] \end{aligned} \quad (3.5)$$

където

$$\begin{aligned} A_n &= (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n}, & \mu_n &= (2n-1) \frac{\pi}{2}, \\ A_m &= (-1)^{m+1} \frac{2}{\mu_m}, & \mu_m &= (2m-1) \frac{\pi}{2}, \\ A_k &= (-1)^{k+1} \frac{2}{\mu_k}, & \mu_k &= (2k-1) \frac{\pi}{2}, \end{aligned}$$

Дефинираме средната концентрация C_m

$$C_m = \frac{8}{abl} \int_0^{\frac{a}{2}} \int_0^{\frac{b}{2}} \int_0^{\frac{l}{2}} C(x,y,z,t) dx dy dz. \quad (3.6)$$

След заместване на (3.5) в (3.6) за относителната средна концентрация се получава

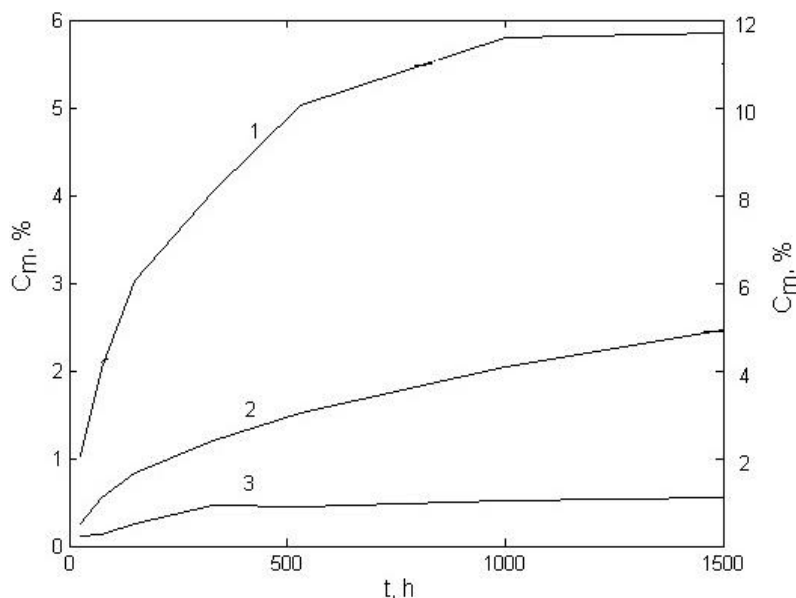
$$c = \frac{C_m}{C_\infty} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} B_n B_m B_k \exp \left[-(\mu_n^2 K_1^2 + \mu_m^2 K_2^2 + \mu_k^2 K_3^2) F_0 \right] \quad (3.7)$$

където

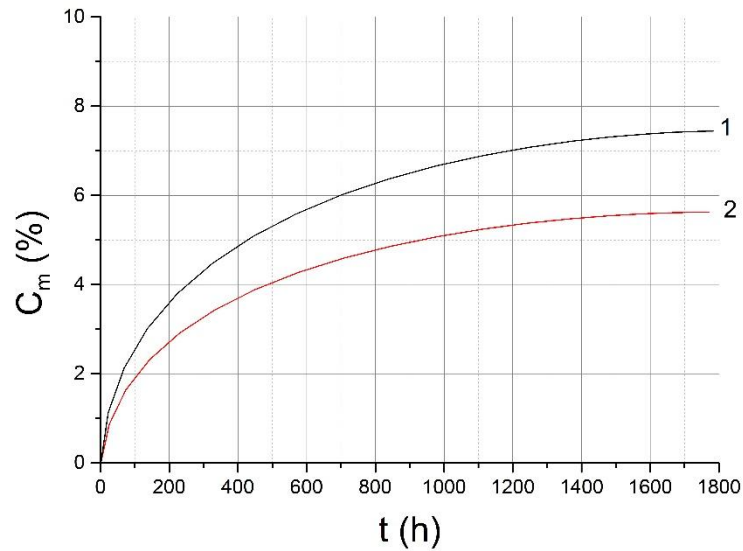
$$B_n = \frac{2}{\mu_n^2}; \quad B_m = \frac{2}{\mu_m^2}; \quad B_k = \frac{2}{\mu_k^2}.$$

3.2.1. Намиране коефициента на дифузия на бутадиеннитрил, полиизопрен и полиуретан.

За изследване на дифузионните процеси с цел намиране на коефициента на дифузия е използван сорбционно-тегловия метод. На Фиг. 3.2. и Фиг. 3.4. са показани сорбционни криви за част от изследваните двойки, еластомер-течност.



Фиг.3.2. Дифузионни криви на течни индустриални среди в полиизопренов вулканизат: 1. Вода; 2. Машинно масло; 3. 20% разтвор на сярна киселина.



Фиг.3.4. Дифузионни криви на течни индустриални среди в полиуретан:

1. Машинно масло; 2. Вода.

В нашия случай при лентови образци дифузията е едномерна, двустранна и уравнението приема вида

$$c_m = \frac{C_m}{C_\infty} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8}{\pi^2} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp \left[-\frac{(2n-1)^2}{4} \pi^2 F_0 \right], \quad (3.11)$$

където

$$F_0 = \frac{Dt}{(b/2)^2} \quad (3.12)$$

е критерий на Fourier.

Тук отбелязваме, че експоненциалната функция $\exp \left[-\frac{(2n-1)^2}{4} \pi^2 F_0 \right]$ е строго монотонно намаляваща, защото $-\frac{(2n-1)^2}{4} \pi^2 F_0 < 0$, от което следва, че с нарастване стойностите на

величината F_0 , стойностите на тази функция стават много малки и очевидно, с достатъчна точност решението (3.11) може да се редуцира само до един член от безкрайния ред

$$c_m = \frac{C_m}{C_\infty} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-\frac{1}{4}\pi^2 F_0\right] \quad (3.13)$$

Използвайки горното уравнение, за коефициента на дифузия D се получава израз

$$D = -\frac{b^2}{\pi^2 t} \left[\ln \frac{\pi^2}{8} + \ln \left(1 - \frac{C_m}{C_\infty} \right) \right]. \quad (3.14)$$

Пресмятането показва, че за различни средни концентрации, коефициентът на дифузия се мени в тесни граници и с достатъчна за инженерната практика точност може да се счита за постоянна величина, именно:

$D=0,0582 \text{ [mm}^2 \text{ / 24h]}$ за полиизопренов вулканизат и вода;

$D=0,1159 \text{ [mm}^2 \text{ / 24h]}$ за полиизопренов вулканизат и машинно масло;

$D=0,0929 \text{ [mm}^2 \text{ / 24h]}$ за полиизопренов вулканизат и 20% сярна киселина;

$D=0,0545 \text{ [mm}^2 \text{ / 24h]}$ за бутадиеннитрилен вулканизат и вода;

$D=0,0361 \text{ [mm}^2 \text{ / 24h]}$ за бутадиеннитрилен вулканизат и машинно масло;

$D=0,0941 \text{ [mm}^2 \text{ / 24h]}$ за бутадиеннитрилен вулканизат и 20% сярна киселина.

$D=0,0529 \text{ [mm}^2 \text{ / 24h]}$ за полиуретан и вода.

$D=0,1106 \text{ [mm}^2 \text{ / 24h]}$ за полиуретан и машинно масло.

3.3. Дифузия в гумено-метални технически изделия.

Във връзка с по-нататъшните задачи в настоящите изследвания си поставяме две основни цели:

1. Построяване на сорбционните криви за гуменно-метални технически изделия (цилиндрични демпфери), чрез преминаване в цилиндрични координати при познат от лентовите образци коефициент на дифузия.

2. Изследване влиянието на едноосно статично натисково напрежение в комбинация с наслагваща се по същата ос циклична компонента, върху кинетиката на дифузия на течна обкръжаваща среда в еластомера (в случая ПУ).

3.3.1. Дифузия в цилиндрични координати.

В цилиндрични координати уравнение (3.2) добива вида

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{dC}{dr} \right) \right] \quad (3.18)$$

Ако в горното уравнение, описващо радиалния поток в цилиндъра направим субституцията

$$C = u(r)e^{-D\alpha^2 t}, \quad (3.19)$$

то се трансформира в обикновеното диференциално уравнение

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} + \alpha^2 u = 0, \quad (3.20)$$

В нашия случай дифузионната среда е цилиндър с радиус $r = a$, на повърхността на който се поддържа постоянна концентрация $C_1 = C_\infty$. В началото средата е свободна от дифундираща течност

$$C(r,0)=0, \quad 0 < r < a, \quad t=0 \quad (\text{нач. усл.})$$

$$\begin{aligned} C(0,t) &= C_\infty, & C(a,t) &= C \\ 0 < t < +\infty & & & (\text{гран. усл.}) \end{aligned} \quad (3.21)$$

В този случай решението може да бъде дадено чрез функцията на Бесел от I ред , нулев порядък- $J_0(x)$ и нейният диференциал $J_0'(x)$ т.е

$$C = C_1 \left(1 + \frac{2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_n} \frac{J_0(\alpha_n r)}{\alpha_n J_0'(\alpha_n a)} \exp(-D \alpha_n^2 t) \right) \quad (3.22)$$

където α_n е n -ти корен на уравнението

$$J_0(x) = 0, \quad (n=1, 2, \dots) \quad (3.23)$$

Корените на беселовите функции са табулирани. Можем да докажем, че редът в (3.22), за $r = 0$, има сума, която е крайно число.

Първите четири събираеми са определящи и достатъчни да представим решението с достатъчна точност, т.е. използваме корените

$$\alpha_1 = \frac{2,405}{a}, \quad \alpha_2 = \frac{5,52}{a}, \quad \alpha_3 = \frac{8,654}{a}, \quad \alpha_4 = \frac{11,7915}{a}. \quad (3.24)$$

и получаваме

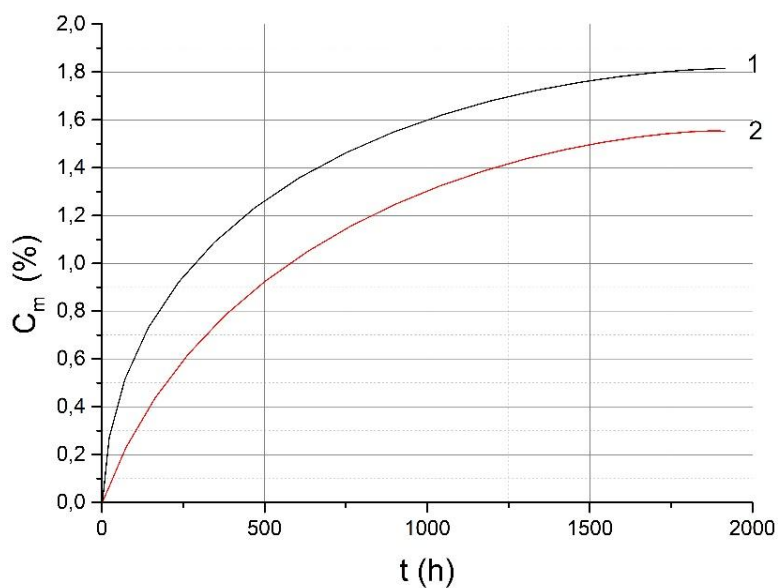
$$C_m(t) = C_1 \left(1 - \frac{4}{a^2} \sum_{k=1}^4 \frac{1}{\alpha_k^2} e^{-D \alpha_k^2 t} \right), \quad (3.28)$$

Познавайки коефициента на дифузия D намираме $C_m(t)$, като приближено решение на едно нелинейно (трансцендентно) уравнение, каквото е (3.28), т.е. заместваем първите четири събираеми на (3.24) и получаваме

$$\begin{aligned} \frac{Q}{\pi \alpha^2} = \bar{C} = C_1 & \left[1 - \frac{4}{(2,405)^2} \exp \left\{ -\frac{D(2,405)^2 t}{a^2} \right\} - \frac{4}{(5,520)^2} \times \right. \\ & \times \exp \left\{ -\frac{D(5,520)^2 t}{a^2} \right\} - \frac{4}{(8,654)^2} \exp \left\{ -\frac{D(8,654)^2 t}{a^2} \right\} - \\ & \left. - \frac{4}{(11,791)^2} \exp \left\{ -\frac{D(11,791)^2 t}{a^2} \right\} \right]. \end{aligned} \quad (3.30)$$

За решението (3.30) е съставена програма (№2 от приложението) в софтуерната среда “MathCad Prime 3”.

На Фиг.3.5. е показана графичната зависимост концентрация – време ($C_m - t$) за една двойка материал- течна среда. За останалите двойки програмите се конструират аналогично.



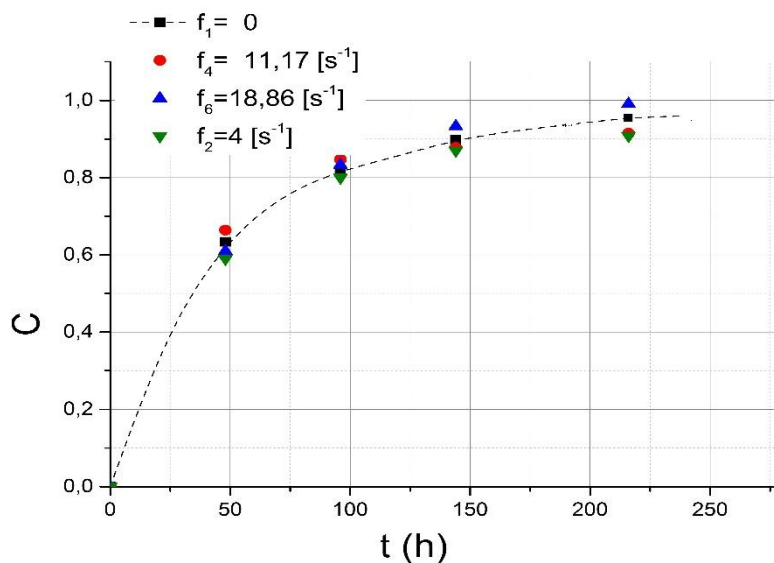
Фиг. 3.5. Графична зависимост концентрация-време за две двойки:

1. ПУ с машинно масло; 2. ПУ с вода.

3.3.2. Експериментално изследване на кинетиката на дифузия в условия на циклично натоварване.

Необходимостта от провеждането на тези експерименти се налага във връзка с отговора на въпроса, влияе ли приложеното циклично натисково натоварване върху кинетиката на дифузия в еластомера.

На Фиг. 3.6. е показана теоретичната крива и експерименталните резултати за една двойка еластомер-течна среда.



Фиг. 3.6. Сорбционни криви полиуретан - машинно масло

Експерименталните резултати показват независимост на сорбционния процес от приложеното нискочестотно циклично натоварване.

ГЛАВА 4. ТОПЛООБРАЗУВАНЕ ПРИ ЦИКЛИЧНО НАТОВАРВАНЕ НА ЕЛАСТОМЕРИ

4.1. Термични ефекти в гумено-метални изделия

Тук се изучава топлообразуването в гумено-метални технически изделия изготвени от коментираните в Гл. 2 еластомери. Експериментално се определят хистерезиса, температурното поле, температурни и честотни характеристики на коефициента на дисипация на енергия ψ при стационарно циклично натоварване и мощността на дисипация W^* .

Както е известно, елементарно количество топлина ΔQ получено от даден източник се определя чрез вектора на топлинния поток $\mathbf{q}$:

$$\Delta Q = (-\text{div} \mathbf{q}) \Delta t, \quad (4.1)$$

който от своя страна е свързан с градиента на температурата T , чрез закона на Фурие,

$$\mathbf{q} = k \text{ grad } T, \quad (4.2)$$

където k е коефициент на топлопроводност.

Като се има в предвид, че за топлемостта C_p може да се запише:

$$T \frac{dS}{dt} = \rho C_p \frac{dT}{dt}. \quad (4.5)$$

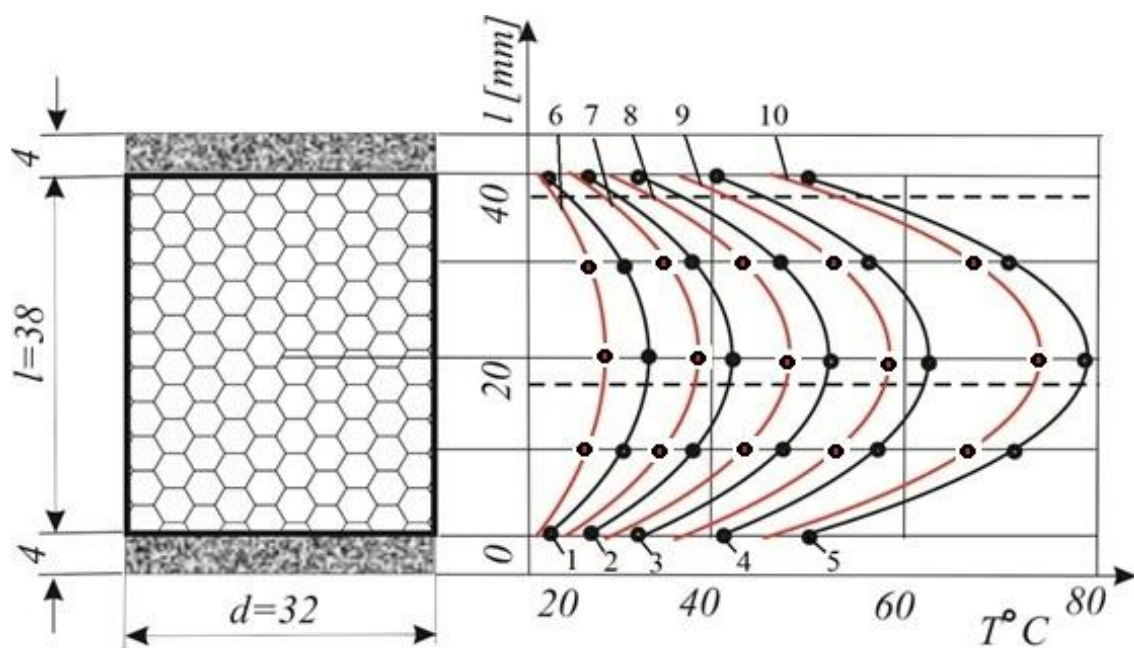
за уравнението на топлопроводността се получава:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div}(k \text{ grad } T) + W^*, \quad (4.6)$$

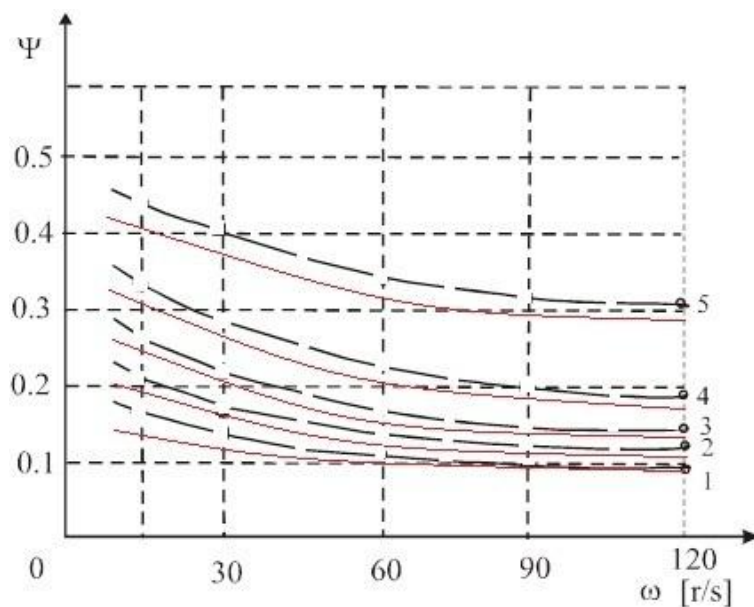
където W^* е функцията на дисипация характеризираща вътрешния източник на топлина.

Изследваните образци представляват гумено-метални шарнири с цилиндрична форма, Фиг. 4.1.

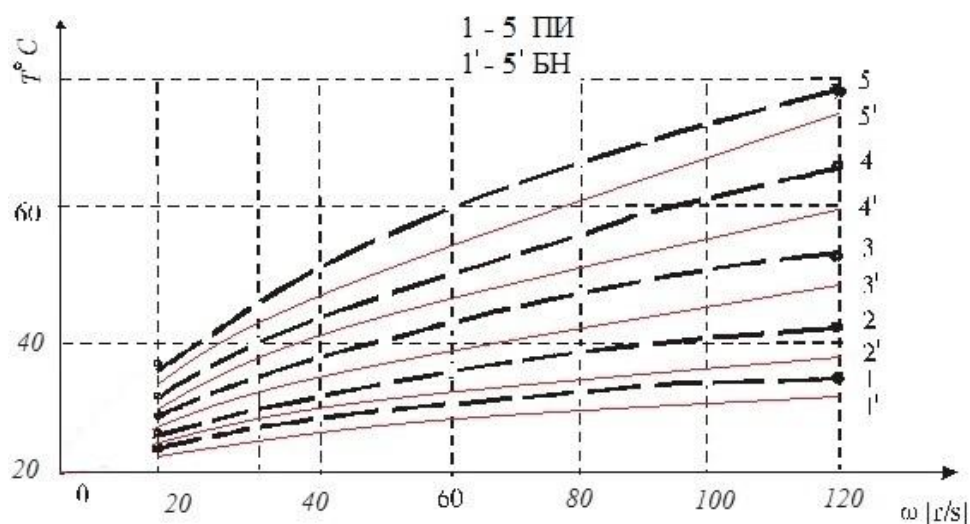
Такива шарнири се използват като еластични звена във вибромашини и работят обикновено в диапазон на динамична деформация 10-15%. Практиката доказва, че в тези условия традиционните състави за гумени елементи са неподходящи, поради високото дисипативно нагряване, повишено стареене и крайно неудовлетворителна дълготрайност.



Фиг. 4.1. Температурно поле в елементи от ПИ (криви 1-5) и БН (криви 6-10) подложени на натиск при $\omega = 119,3 \text{ rad/s}$, $\varepsilon_{CT} = 10\%$, $\varepsilon_D = 8\%$ и напълване в тегловни части за (1, 6-0 т.ч., 2, 7-20 т.ч., 3, 8-40 т.ч., 4, 9-60 т.ч., 5, 10-80 т.ч.).



Фиг. 4.3. Зависимост на коефициента на дисипация ψ от честотата на натоварване ω при $\varepsilon_{CT} = 10\%$, $\varepsilon_D = 8\%$ и напълване в тегловни части за 1-0 т.ч., 2-20 т.ч., 3-40 т.ч., 4-60 т.ч., 5-80 т.ч.



Фиг. 4.5. Зависимост на температурата на нагряване T от честотата на натоварване при $\varepsilon_{CT} = 10\%$, $\varepsilon_D = 8\%$ за 1-0 т.ч., 2-20 т.ч., 3-40 т.ч., 4-60 т.ч., 5-80 т.ч.

4.2. Теплообразуване при деформиране на гумено-метални технически изделия

Коефициента на дисипация на енергията може да се представя като функция от вида

$$\psi = \psi (T, N, f) \quad (4.12)$$

където: - T е установената температура (T^0C), при определен режим на натоварване на изделието,

- N е броят на циклите,

- f е честотата (фреквенцията), свързана с кръговата честота от съотношението $\omega = 2\pi f$.

В общия случай при различие на коефициентите на дисипация при опън-натиск и чисто плъзгане се въвеждат два коефициента, съответно ψ_1 и ψ_2 , при които разсеяната енергия за k -я цикъл се апроксимира с изрази:

$$\Delta W_k = \frac{1}{2E} \left[\psi_1 (1 + \nu) \sigma^2 + \frac{\psi_2}{3} (1 - 2\nu) \sigma_{ii}^2 \right], \quad (4.13)$$

където са отчетени връзките:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (4.14)$$

$$K = \lambda + \frac{2}{3}\mu = \frac{E}{3(1-2\nu)}, \quad (4.15)$$

$$\sigma = 2 G \varepsilon, \quad \sigma_{ii} = 3 K \varepsilon_{ii}. \quad (4.16)$$

От друга страна мощността на дисипация може да се представи с уравнение от вида

$$W^* = A\eta \sum_{k=1}^n \Delta W_k, \quad (4.17)$$

където A е температурният еквивалент на механичната работа, η е коефициентът характеризиращ частта от разсеяната енергия, преминаваща в топлина (при $\eta=1$, цялата разсеяна енергия преминава в топлина).

По-нататък си поставяме за цел на базата на предишните изследвания, да се определи функцията на коефициента на дисипация (4.12). Определянето дава възможност да се опише мощността на дисипация W^* (количеството топлина отделено за единица време в единица обем), участваща в уравненията на топлопроводността.

При независимост на ΔW_k от броя на циклите, в условие на цикличен опън-натиск, при симетричен по напрежение цикъл:

$$\Delta W = \psi \frac{\sigma_0^2}{2E}, \quad (4.20)$$

от (4.13) следва записа:

$$\psi = \frac{1}{3} [2\psi_1(1+\nu) + \frac{\psi_2}{2}(1-2\nu)]. \quad (4.22)$$

Тази връзка може да се опрости, имайки предвид спецификата на напълнените полиизопренови каучуци, по едно от условията:

а. Условие за несвиваемост. От (4.22) следва, че при:

$$\nu = \frac{1}{2}, \quad \psi = \psi_1 \quad (4.23)$$

коэффициентът ψ_2 отпада от (4.21).

б. Условие за приблизително равенство на двата коэффициента на дисипация. От (4.22) следва, че

$$\psi_1 = \psi_2 = \psi \quad (4.24)$$

за всяко ν .

За описване на коэффициента на дисипация ψ , на базата на проведените изследвания е приета двупараметровата експоненциална функция

$$\psi = \psi_0 \frac{E}{E_0} \frac{1}{f^\delta} \exp[\beta(T - T_0)], \quad (4.25)$$

където отношението $\frac{\psi_0}{E_0}$ е отношението $\frac{\psi}{E}$ при базова честота $f = f_0 = 20 \text{ Hz}$ и температура

$$T = T_0 = 20^\circ \text{C}.$$

Експерименталните данни са обработени по метода на най-малките квадрати. В резултат на изчислителните процедури са идентифицирани параметрите на експоненциалната функция δ и β :

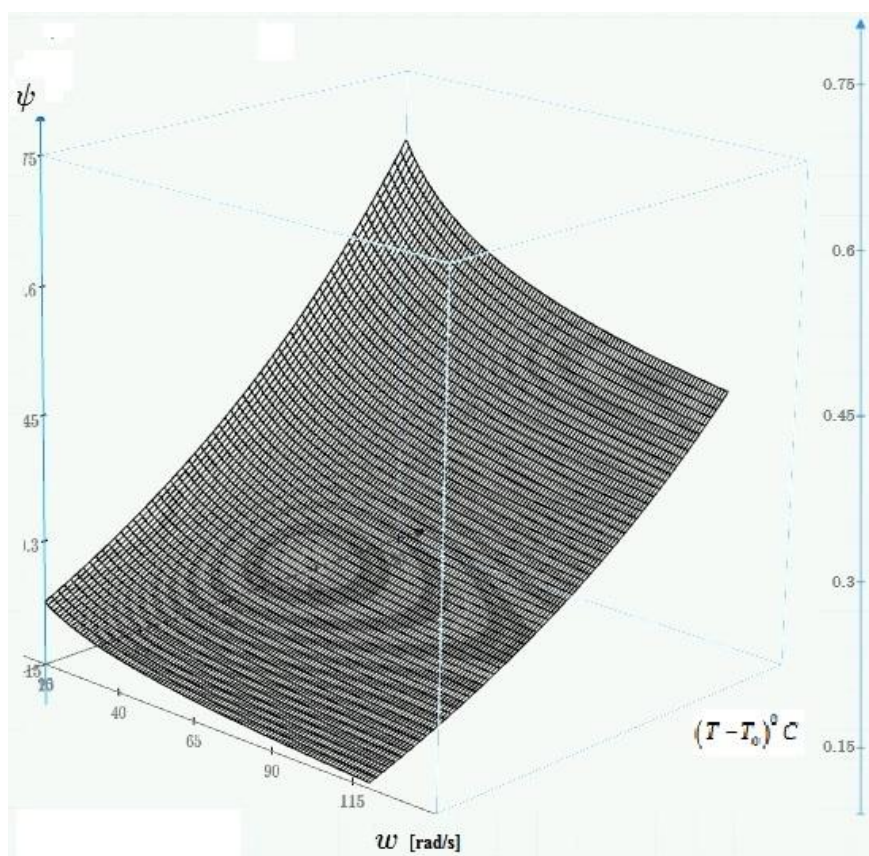
$$\psi = 0,289957 \frac{1}{f^{0,178109}} \exp[0,0179568(T - T_0)], \quad (4.26)$$

Табл. 4.1.

ПИ	БН
$\beta = 0,0179568$	$\beta = 0,0157536$
$\delta = 0,178109$	$\delta = 0,164202$
$\psi_0 = 0,289957$	$\psi_0 = 0,260971$
$E = 0,91 \text{ MPa}$	$E = 0,90 \text{ MPa}$
$E_0 = 1,43 \text{ MPa}$	$E_0 = 1,23 \text{ MPa}$

Таблица 4.1.

На (Фиг.4.6) е илюстрирана повърхнината на температурно-честотната зависимост на коефициента на дисипация, построена по функцията (4.26).



Фиг.4.6. Температурно-честотна функция на коефициента на дисипация на енергия

На базата на функцията (4.25) и зависимостите (4.19) и (4.20), изразът за мощността на дисипация при условието (4.23), добива вида:

$$W^* = A \eta \frac{\psi_0}{2E_0} f^{1-\delta} \exp[\beta(T-T_0)]\sigma_0^2, \quad (4.27)$$

Всички графики и съотношения са направени за ПИ и БН, като се оказва, че ПУ не генерира температурно поле. Инфракчервения термометър отчита максимална температура от $2,5^\circ\text{C}$ (студено вибропъзене).

ГЛАВА 5. ПРОГНОЗИРАНЕ ДЕФОРМАТИВНОСТТА НА ЕЛАСТОМЕРНИ МАТЕРИАЛИ

5.1. Експериментално изследване на краткотрайно вибропъзене на твърд полиуретан в условия на течна среда

5.1.1. Експерименти на краткотрайно вибропъзене в течна среда

В този параграф експериментално се изследва краткотрайното вибропъзене на полиуретан във вода, като пробните образци са групирани в серии с относителна средна концентрация на вода, съответно,

$$\begin{aligned} c_{m1} &= 0; & c_{m3} &= 0,71; \\ c_{m2} &= 0,36; & c_{m4} &= 1, \end{aligned} \quad (5.1)$$

където

$$c_{mi} = \frac{C_{mi}}{C_\infty}. \quad (5.2)$$

Тук C_{mi} е средна концентрация в даден момент от времето, измерена посредством сорбционно-тегловия метод; C_{∞} е равновесна концентрация (концентрацията на пълно насищане).

Експериментите са проведени в условие на едноосен натиск с резултантно натоварване формирано от постоянен натисков товар P_0 и допълнително насложена циклична компонента P_{α} ,

$$P = P_0 + P_{\alpha} \quad (5.3)$$

$$P_{\alpha} = P_{\alpha_0} \sin(\omega t). \quad (5.4)$$

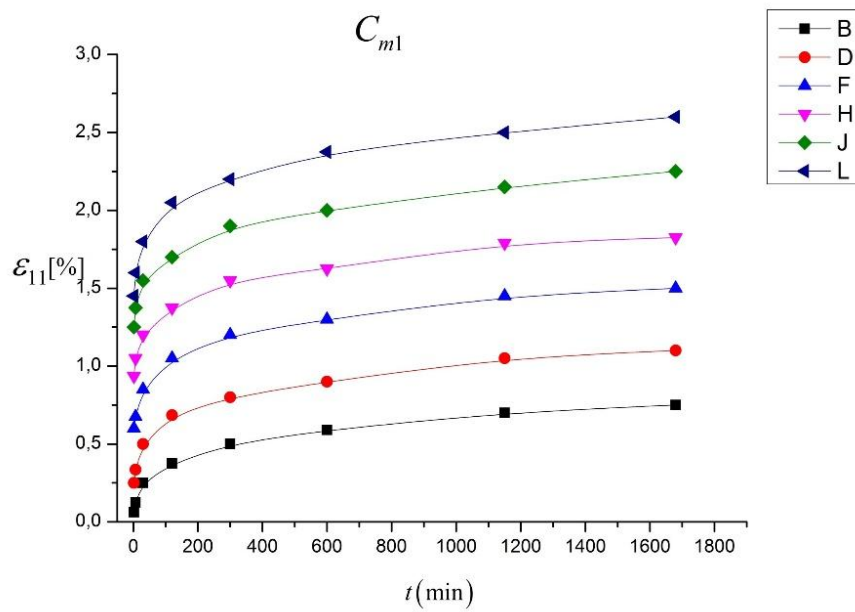
При изпитания на вибропъзене, като основна характеристика на вибрационната компонента се използва амплитудата на скоростта на вибронатоварване,

$$\dot{P}_{\alpha} = P_{\alpha_0} \omega \cos(\omega t) \quad (5.5)$$

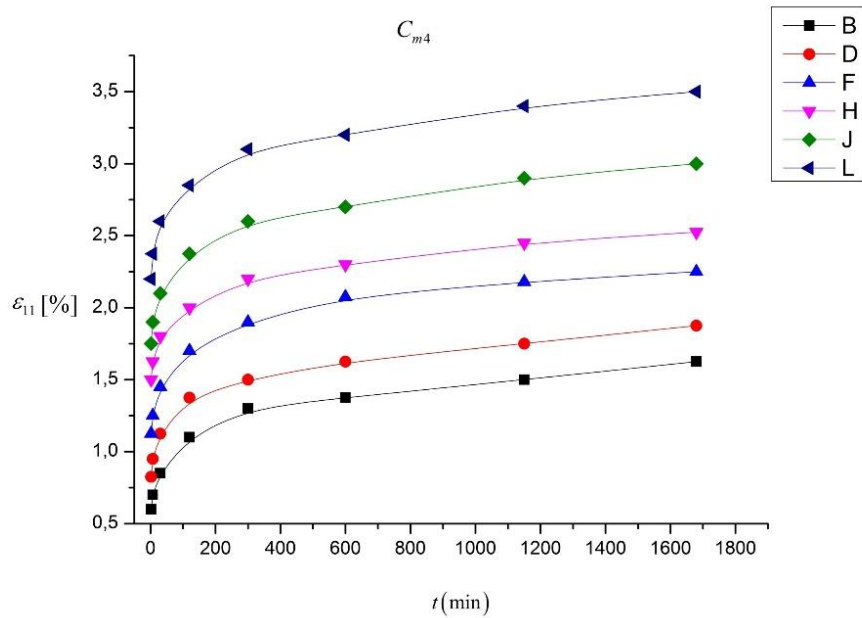
Експериментите са проведени при постоянна температура на околната среда $20 \pm 1^{\circ}$ върху две различни машини за изпитание на вибропъзене. Натоварванията са в областта на нискочестотния диапазон с работни честоти

$$\begin{aligned} f_1 &= 0 [s^{-1}]; & f_2 &= 4 [s^{-1}]; & f_3 &= 7,36 [s^{-1}]; \\ f_4 &= 11,17 [s^{-1}]; & f_5 &= 15,2 [s^{-1}]; & f_6 &= 18,86 [s^{-1}]; \end{aligned} \quad (5.6)$$

На Фиг. 5.1 и Фиг. 5.4 са показани резултатите от краткотрайното пъзене за двете гранични концентрации на течна среда в еластомера.



Фиг. 5.1. Криви на вибропъзене на сух ПУ, $c_{m1} = 0$.



Фиг. 5.4. Криви на вибропъзене в течна среда на ПУ, $c_{m4} = 1$.

5.2. Вибро-временна аналогия при сух и сорбирал течна среда полиуретан.

5.2.1. Отчитане влиянието на цикличното натоварване върху реологичното поведение на сухи и в течна среда еластомери.

Тук изхождайки от краткотрайните експерименти на пълзене на твърд полиуретан (ПУ-3), се изучава възможността за отчитане на фактора циклично натоварване в задачите на пълзене чрез трансформиране на скалата на истинското време в скала на условно

$$t' = a_v[\dot{\sigma}_{11\alpha}]t, \quad (5.7)$$

където $a_v[\dot{\sigma}_{11\alpha}]$ е функция на вибровременна редукция, която изразява мащаба на условното време при различните нива на циклично натоварване.

Възможността за прогнозиране чрез функцията

$$\ln a_v = \ln a_v \left[\dot{\sigma}_{11\alpha} - \dot{\sigma}_{011\alpha} \right], \quad (5.8)$$

се изследва първоначално върху не експонирани в течна среда еластомерни образци ($c_{m1} = 0$).

В теоретичен аспект, проблемът се разглежда в светлината на вероятностно-статистическа интерпретация на вискозо-еластичната деформация, където реологичните съотношения се дават с помощта на изразите:

- за непрекъснат реологичен спектър

$$J = J_0 + \int_{-\infty}^{\infty} L(\ln \tau) \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) d \ln \tau, \quad (5.9)$$

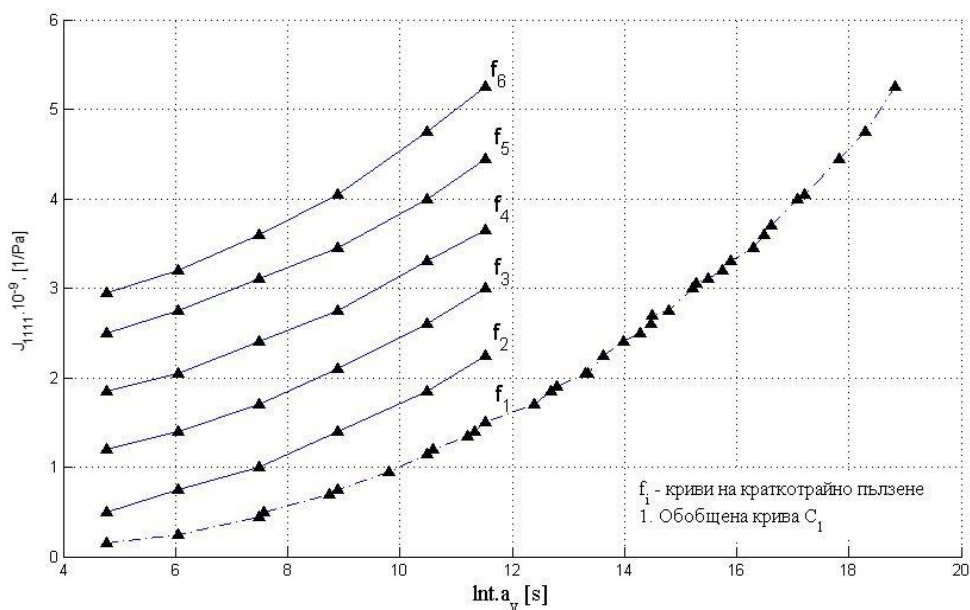
- за дискретен реологичен спектър

$$J = J_0 + \sum_{i=1}^N J_{\infty i} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right), \quad (5.10)$$

В КОИТО

- J е податливост в даден момент от времето,
- J_0 и J_∞ са съответно мигновена и равновесна податливост,
- L е плътност на релаксационния спектър,
- τ_i е спектър от времена на релаксация.

На (Фиг. 5.5) са показани кривите на краткотрайно вибропълъзене на сух ПУ, престоени в криви на податливост, като са приети шест градации на амплитудата на скоростта на цикличната компонента



Фиг. 5.5 Криви на податливост и обобщена крива на ПУ-3, ($c_{m1} = 0$).

С помощта на равенството

$$J(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{l_i(t) - l_{0i}}{l_{0i}}}{\sigma_{11} n}, \quad (5.14)$$

където

$l_i(t)$ - дължината на образца в даден момент от времето,

l_{0i} - начална дължина,

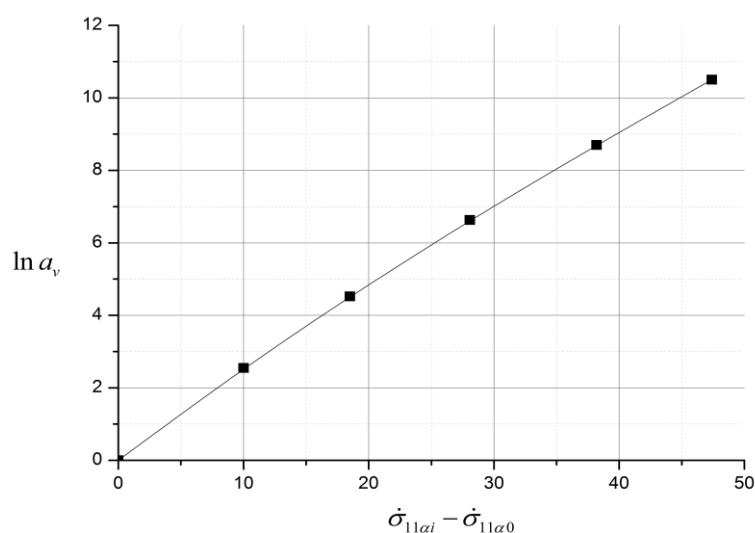
са пресметнати дискретните стойности на вискозоеластичната податливост и дистанциите между престоените експериментални криви на вибропълъзене.

Апроксимацията е представена с дробно-линейната функция на вибровременна редукция

$$\ln a_v = \frac{b_1(\dot{\sigma}_{11\alpha} - \dot{\sigma}_{011\alpha})}{b_2 + \dot{\sigma}_{11\alpha} - \dot{\sigma}_{011\alpha}}. \quad (5.15)$$

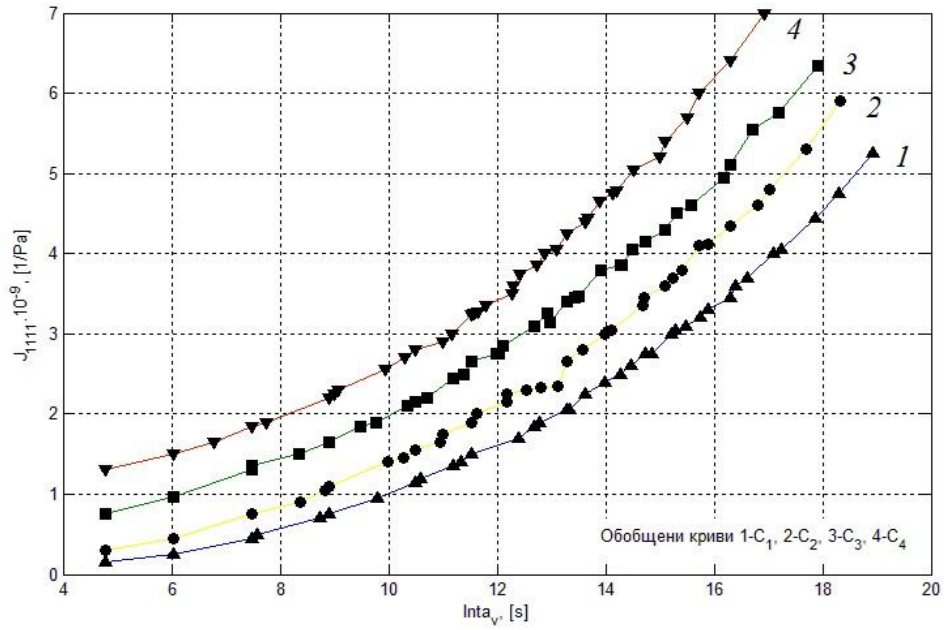
където b_1 и b_2 са емпирични коефициенти.

На (Фиг. 5.6) е показана графиката на дробно-линейната функция на вибровременна редукция. Определянето на емпиричните коефициенти $b_1 = 34,48$, $b_2 = 139,94$ е извършено чрез приближения метод на изравняването:



Фиг. 5.6. Функция на вибровременна редукция

Аналогично са построени обобщените криви и при останалите три стойности на концентрация на течна среда в еластомера, в резултат на което е получено показаното на (Фиг. 5.7) семейство обобщени криви на вибропълзене.



Фиг. 5.7 Обобщени криви на вибровременна редукция на ПУ-3

1 : c_{m1} , 2 : c_{m2} , 3 : c_{m3} , 4 : c_{m4}

Проведените изследвания и резултати позволяват обобщените реологични съотношения, съответно за непрекъснат и за дискретен реологичен спектър, да се представят във вида:

$$J(t, \dot{\sigma}_\alpha) = J_0(\dot{\sigma}_\alpha) + \int_{-\infty}^{\infty} L(\ln \tau, \dot{\sigma}_{0\alpha}) (1 - e^{-\frac{t}{\tau} a_v}) d \ln \tau, \quad (5.16)$$

$$J(t, \dot{\sigma}_\alpha) = J_0(\dot{\sigma}_\alpha) + \sum_{i=1}^N J_{\infty i} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{0i}} a_v}), \quad (5.17)$$

Тук за всички честоти, респективно, нива на амплитудата на скоростта на цикличната компонента, са приети едни и същи параметри на спектъра

В условията на вибропълъзене, дискретният спектър от времена на релаксация е представен във вида

$$\tau_i = \frac{\tau_{0i}}{a_v} = \frac{\tau_{0i}}{a_v [\dot{\sigma}_\alpha(t)]}, \quad (5.19)$$

За намиране на релаксационния спектър дискретният релаксационен ред

$$J(t) = J_0 = \frac{\sum_{i=1}^N J_{\infty i}}{N} \left(N - \sum_{i=1}^N \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right), \quad (5.20)$$

е развит при наложени условия:

$$t = \tau_1, \quad \tau_1 \ll \tau_2 \ll \tau_3 \ll \dots \ll \tau_n. \quad (5.21)$$

Дискретният спектър от времена на релаксация τ_{0i} , за сухия полиуретан и останалите параметри са изчислени по данните от обобщената крива 1 (Фиг. 5.7.) - за $c_{m1} = 0$,

$$\begin{aligned} \tau_{01} &= 0,0008 \cdot 10^3 h, & \tau_{07} &= 14,204 \cdot 10^3 h, \\ \tau_{02} &= 0,012 \cdot 10^3 h, & \tau_{08} &= 36,728 \cdot 10^3 h, \\ \tau_{03} &= 0,074 \cdot 10^3 h, & a_{1111} &= 0,125 \cdot 10^{-9} [1/Pa], \\ \tau_{04} &= 0,369 \cdot 10^3 h, & b_{1111} &= 5,125 \cdot 10^{-9} [1/Pa], \\ \tau_{05} &= 1,573 \cdot 10^3 h, \end{aligned} \quad (5.22)$$

5.3. Многопараметрово прогнозиране на деформативността чрез функция на множествена вибро-течно-временна редукция.

Изхождайки от получените експериментални и теоретични резултати, се изучава възможността за отчитане на факторите течна среда и циклично натоварване в задачите за пълзене по пътя на преобразуване на скалата на истинското време в скала на условно, като на тази база се изследва възможността за многопараметрово прогнозиране на деформативността чрез функция на множествена течностно-вибровременна редукция (Вб-ТнВР) от вида

$$a_{vc} = a_v [\dot{\sigma}_\alpha(t)] \cdot a_c [C(t)], \quad (5.23)$$

Двете функции изразяват мащаба на условното време при различните значения на параметрите ниво на циклично натоварване и концентрация на течна среда, и връзката (5.23) предполага, че са независими.

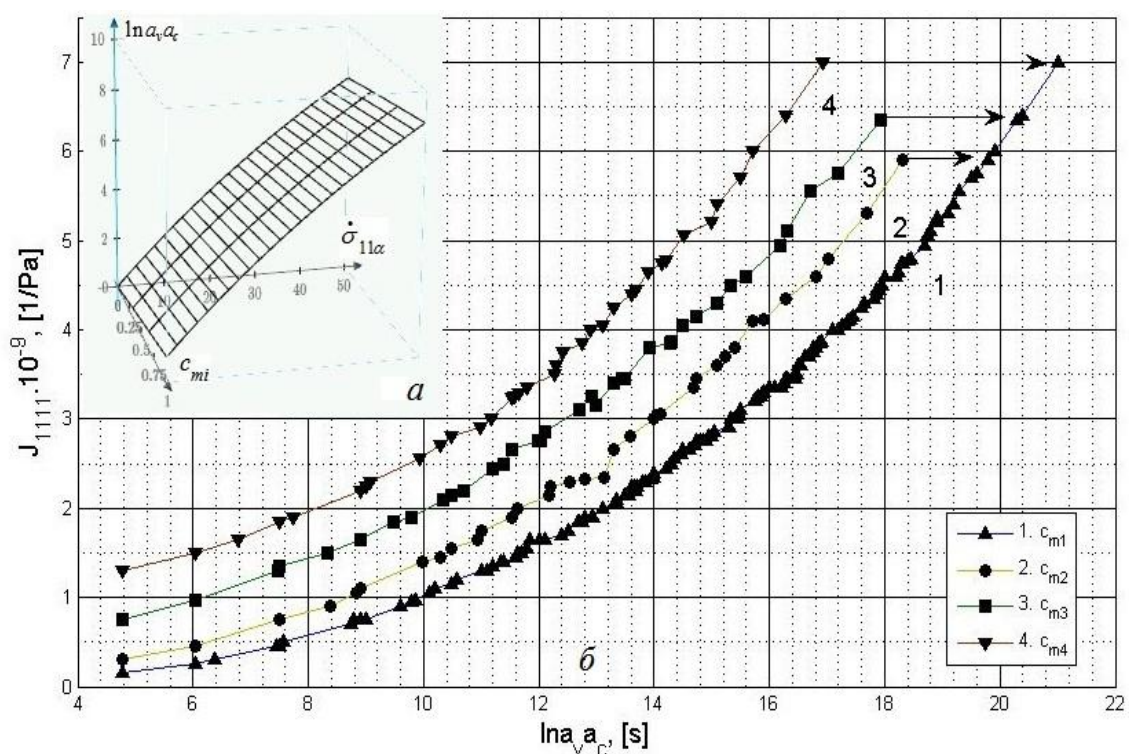
Така в условията на линейната вискозоеластичност двупараметровата функция ще представим чрез суперпозицията

$$\ln a_{vc} = \ln a_v + \ln a_c \quad (5.27)$$

$$\ln a_{vc} = \frac{d_1(\dot{\sigma}_{\alpha 1} - \dot{\sigma}_{\alpha 1})}{d_2 + \dot{\sigma}_{\alpha 1} - \dot{\sigma}_{\alpha 1}} + \frac{d_3(C - C_0)}{d_4 + C - C_0}.$$

Комплексната обобщена крива показана на (Фиг. 5.8) е построена за базови условия

$C_0 = c_{m1} = 0\%$ и $\dot{\sigma}_{\alpha 0} = \dot{\sigma}_{\alpha 1} = 0 [Pa/s]$ и в началния си участък лежи върху обобщената крива 1 дадена на (Фиг. 5.7).



Фиг. 5.8. Двупараметрова функция на вибро-течно времева редукция – (а) и комплексна обобщена крива – (б)

Комплексната обобщена крива построена по обратния ред – построяване на обобщените криви на ТнВР и последващото им хлъзгане чрез ВбВР съвпада напълно с тази от (Фиг. 5.8), което дава основание обобщения запис в новите координати при дадени амплитуда на скоростта на вибропъзене и концентрация на течна среда в еластомери различни от базовите

$\dot{\sigma}_{11\alpha}$ и c_{m0} да се представят във вида:

- за непрекъснат релаксационен спектър

$$J(t, \dot{\sigma}_{11\alpha}, c_m) = J_0(\dot{\sigma}_{11\alpha}, c_m) + \int_{-\infty}^{\infty} L \left(\ln \tau, \dot{\sigma}_{11\alpha}, c_m \right) \left(1 - \exp \left(- \frac{ta_c a_v}{\tau} \right) \right) d \ln \tau, \quad (5.29)$$

- за дискретен релаксационен спектър

$$J(t, \dot{\sigma}_{11\alpha}, c_m) = J_0(\dot{\sigma}_{11\alpha}, c_m) + \sum_{i=1}^N J_{\infty i} \left(1 - e^{-\frac{ta_v a_c}{\tau_{0i}}} \right) \quad (5.30)$$

Горните съотношения предполагат предварително изпълнение на предпоставката, че за всички нива на циклично натоварване и концентрация на течна обкръжаваща среда са приети едни и същи параметри на спектъра

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} L \dot{\sigma}_{\alpha}(\ln \tau) d \ln \tau &= \int_{-\infty}^{\infty} L \dot{\sigma}_{\alpha}(\ln \tau) \frac{d \tau}{\tau} = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} L \dot{\sigma}_{\alpha 0}(\ln \tau) \frac{d \tau}{a_v} \cdot \frac{a_v}{\tau} = \int_{-\infty}^{\infty} L \dot{\sigma}_{\alpha 0}(\ln \tau) d \ln \tau = J_{\infty} \end{aligned} \quad (5.31)$$

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} L_C(\ln \tau) d \ln \tau &= \int_{-\infty}^{\infty} L_C(\ln \tau) \frac{d \tau}{\tau} = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} L_{C0}(\ln \tau) \frac{d \tau}{a_c} \cdot \frac{a_c}{\tau} = \int_{-\infty}^{\infty} L_{C0}(\ln \tau) d \ln \tau = J_{\infty} \end{aligned} \quad (5.32)$$

Построените (посредством два параметъра на временна редукция) комплексни криви се апроксимират с дискретния спектър от времена на релаксация:

$$\begin{aligned}
\tau_{01} &= 0,0010 \cdot 10^3 h; & \tau_{06} &= 12,2258 \cdot 10^3 h; \\
\tau_{02} &= 0,0224 \cdot 10^3 h; & \tau_{07} &= 44,8604 \cdot 10^3 h; \\
\tau_{03} &= 0,0745 \cdot 10^3 h; & \tau_{08} &= 121,9430 \cdot 10^3 h; \\
\tau_{04} &= 1,0035 \cdot 10^3 h; & \tau_{09} &= 271,3800 \cdot 10^3 h; \\
\tau_{05} &= 3,6823 \cdot 10^3 h; & a_{1111} &= 0,125; \\
& & b_{1111} &= 6,970.
\end{aligned} \tag{5.33}$$

На (Фиг. 5.8) комплексната обобщена крива е съпоставена с дълготрайни контролни експерименти, проведени при същите базови условия на напрежение и влажност

($c_{m1} = 0$; $\sigma_{11} = 22.08$ [Pa]).

Изхождайки от показаните реологични съотношения, вибровременни и концентрационно временни функции, за апроксимация на деформацията ще се базираме на линейно наследствената теория

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \frac{1}{E} \int_0^t K(t-s) \sigma(s) ds, \tag{5.34}$$

От условията

$$\int_0^t K(t-s) ds = \Pi(t); \quad K(t) = \frac{\partial}{\partial t} [\Pi(t)], \tag{5.35}$$

при функция отчитаща влиянието на времето във вид на сума или безкраен ред експоненти, за ядрата на пълзене, следват удобните за принципа на аналозиите изрази

$$K(t-s) = \sum_{i=1}^N \frac{J_{\infty i}}{\tau_i} \exp\left(-\frac{t-s}{\tau_i}\right), \tag{5.36}$$

$$K(t-s) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\tau} L(\ln \tau) e\left(-\frac{t-s}{\tau}\right) d \ln \tau. \tag{5.37}$$

където

$J_{\infty i}$ - равновесните податливости при различни концентрации на течна среда,

τ_i - спектъра от времената на релаксация.

Причината за избора на такова ядро са теоретичните и експериментални връзки на релаксационния спектър с молекулярната и надмолекулярна структура на полимерните материали, където дълги линейни или разклонени молекули се обединяват в т. нар. верижни макромолекули.

Тогава съотношенията на линейната теория на вискозоеластичността приемат съответно вида

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \int_0^t \sum_{i=1}^N \frac{J_{\infty i}}{\tau_i} \exp\left(-\frac{t-s}{\tau_i}\right) \sigma(s) ds, \quad (5.38)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} \int_0^t \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\tau} L(\ln \tau) \exp\left(-\frac{t-s}{\tau}\right) \sigma(s) d \ln \tau ds. \quad (5.39)$$

За дискретен релаксационен спектър горните уравнения приемат вида

$$\varepsilon(t) = a \sigma(t) + b \int_0^t K(t-s) \sigma(s) ds, \quad (5.40)$$

където

a - мигновена податливост,

b - равновесна податливост.

В условия на пълзене при постоянно натоварване, апроксимирайки ядрото с изрази

$$K(t-s) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{\tau_i} \exp\left(-\frac{t-s}{\tau_i}\right), \quad (5.41)$$

и след представяне на дискретния спектър от времена на релаксация във вида

$$\tau_i = \frac{\tau_{0i}}{a_{vc}} = \frac{\tau_{0i}}{a_v \left[\dot{\sigma} \alpha(t) \right] a_c \left[C(t) \right]}, \quad (5.42)$$

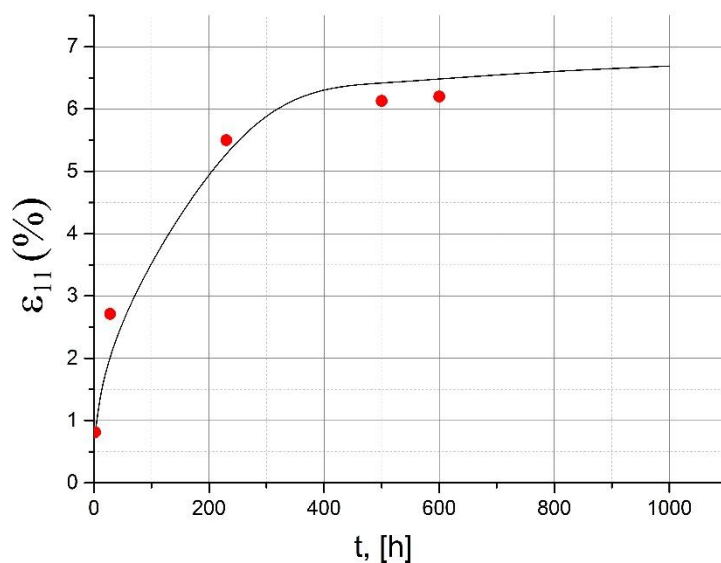
където a_{vc} е функцията на множествена редукция, получаваме математическия модел, отчитащ свързания ефект на влиянието на цикличното натоварване и течната обкръжаваща среда,

$$\varepsilon(t) = a\sigma + b\sigma \int_0^t \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{\tau_{0i}} \exp\left(-\frac{a_v a_c t}{\tau_{0i}}\right) dt. \quad (5.43)$$

Решението на модела (5.43) при чист натиск приема вида

$$\varepsilon(t) = a\sigma + \frac{b\sigma}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{ta_v a_c}{\tau_{0i}}\right) \right\}. \quad (5.44)$$

На (Фиг. 5.9) е показана теоретична крива за модела (5.44) и експериментално измерени стойности на деформацията при тези условия.



Фиг. 5.9. Двупараметрово прогнозиране на пълзене на ПУ

5.4. Пълзене на еластомери в нестационарни условия на напрежения и концентрация.

В нестационарни вибро-концентрационни условия на пълзене посредством замяната на истинското време с условно такова, чрез интегралните трансформации

$$\begin{aligned} t' &= \int_0^t a_{VC} \left[\bar{\sigma}_\alpha(z), \bar{C}_m(z) \right] dz, \\ s' &= \int_0^s a_{VC} \left[\bar{\sigma}_\alpha(z), \bar{C}_m(z) \right] dz, \end{aligned} \quad (5.50)$$

уравнението (5.34) ще приеме вида

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E} \left[\sigma(t) + \int_0^t K(t-s') \sigma(s') ds' \right]. \quad (5.51)$$

Разбира се в (5.50) $\bar{C}_m$ и $\bar{\sigma}_\alpha$ са функции само на времето и не зависят от пространствените координати [22].

Закона на пълзене, следващ от тези съотношения се проверява в различни условия на концентрация и напрежение, като се сравняват теоретичните криви с експериментално получените стойности за деформацията.

5.4.1. Пълзене в условия на постоянно напрежение и концентрация нарастваща по параболичен закон.

$$0 \leq t \leq 740; \quad \sigma_{11}(t) = \text{const}; \quad \bar{C} = \bar{C}(t). \quad (5.52)$$

За да се намери аналитично решение, времето за сорбция на течна среда от полимера е разделено на три последователни интервала, във всеки от които нарастването на концентрацията е представено по линеен закон с приближение, т. е.

I - ви интервал:

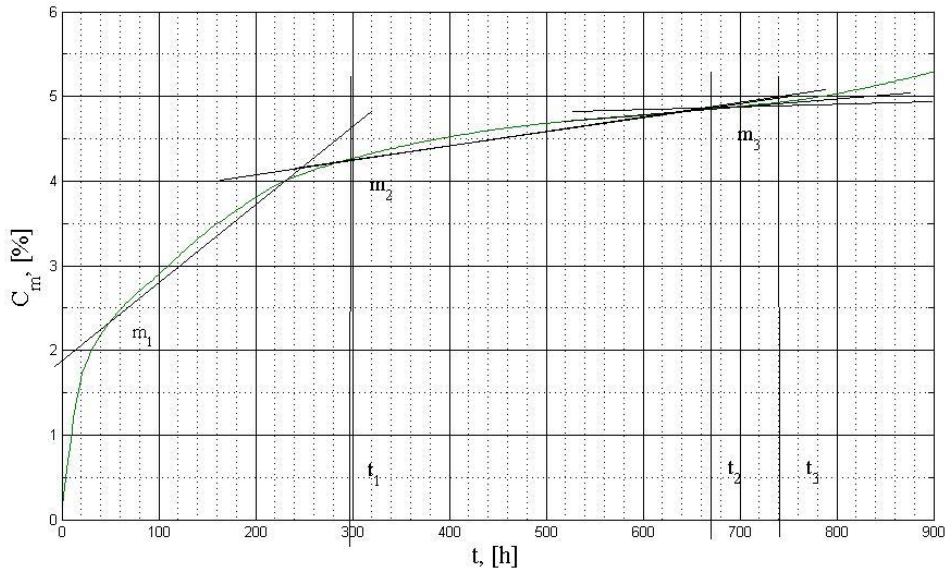
$$0 \leq t \leq t_1; \quad \bar{C}_1 = C_{t_0} + m_1 t; \quad C_{m_0} = 0; \quad m_1 = 0.00031$$

II - ри интервал:

$$t_1 \leq t \leq t_2; \quad \bar{C}_2 = C_{t_1} + m_2 t; \quad C_{t_1} = 0.62\%; \quad m_2 = 0.0001055$$

III - ти интервал:

$$t_2 \leq t \leq t_3; \quad \bar{C}_3 = C_{t_2} + m_3 t; \quad C_{t_2} = 1.372\%; \quad m_3 = 0.0001087$$



Фиг. 5.10. Сорбционна крива ПУ-вода

При тези условия след интегриране в скалата на условното време за деформацията на пълзене в съответните интервали се получава съответно:

$$\varepsilon_{11}^{\Pi}(t) = \frac{b_{1111}\sigma_{11}}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{1}{\tau_{0i}} \int_0^t a_{c_{11}}(\bar{C}_1(t)) dt \right] \right\}, \quad (5.53)$$

$$\varepsilon_{11}^{\Pi}(t) = \frac{b_{1111}\sigma_{11}}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{1}{\tau_{0i}} \left[\int_0^{t_1} a_{c_{11}}(\bar{C}_1(t)) dt + \int_{t_1}^{t_2} a_{c_{11}}(\bar{C}_2(t)) dt \right] \right] \right\}, \quad (5.54)$$

$$\varepsilon_{11}^{\Pi}(t) = \frac{b_{1111}\sigma_{11}}{N} \times \sum_{i=1}^N \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{1}{\tau_{0i}} \left[\int_0^{t_1} a_{c_{11}}(\bar{C}_1(t)) dt + \int_{t_1}^{t_2} a_{c_{11}}(\bar{C}_2(t)) dt + \int_{t_2}^{t_3} a_{c_{11}}(\bar{C}_3(t)) dt \right] \right] \right\} \quad (5.55)$$

За опростяване на изчислителните процедури в рамките на допустимата грешка за влаговременната функция ще приемем линейната апроксимация

$$\ln a_c = q(C_m - C_{m0}), \quad (5.56)$$

след пресмятане на интегралите в горните уравнения за пълната деформация се получава

$$\varepsilon(t) = a \sigma + \frac{b \sigma}{N} \times \sum_{i=1}^N \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{1}{\tau_{0i}} \left(\frac{e^{qm_1 t} - 1}{qm_1} \right) + \left(\frac{e^{qm_2(t_2-t_1)} - 1}{qm_2} \right) + \left(\frac{e^{qm_3(t-t_2)}}{qm_3} \right) \right] \right\} \Bigg|_{t_2}^{t_3} \quad (5.59)$$

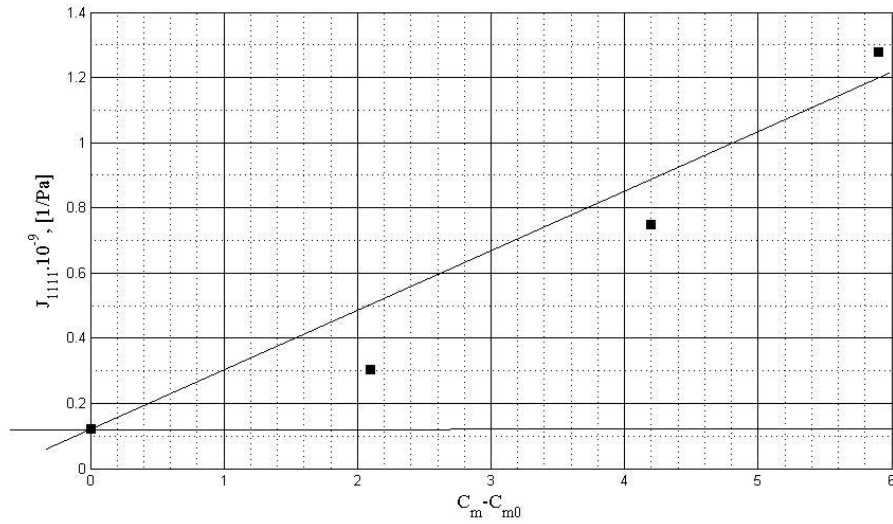
5.4.2. Пълзене в условия на постоянна концентрация и напрежение нарастващо с постоянна скорост.

$$\begin{aligned} 0 \leq t \leq 8h; \quad & \bar{C} = C_m - C_{m0}, \% \\ \sigma_{11}(t) = \dot{\sigma}_{11} t; \quad & 0 \leq \sigma_{11} \leq 9,6 (MPa). \\ \dot{\sigma}_{11} = 1.2 (MPa/h); \end{aligned} \quad (5.60)$$

Условно мигновенната компонента на деформацията ще представим с израза

$$\varepsilon_0(\sigma, \bar{C}) = (A + B\bar{C}) \dot{\sigma}_{11} t. \quad (5.61)$$

Тук константите A и B са определени от зависимостта податливост-концентрация при $t = 0$, която апроксимираме с права



Фиг. 5.11. Зависимост мигновена податливост-концентрация

За деформацията на пълзене в условно време съгласно принципа на аналозиите, закона приема вида

$$\varepsilon_{11}^{\Pi}(t) = b_{1111} \frac{1}{N} \int_0^{t'} \sum_{i=1}^N \frac{1}{\tau_{0i}} \exp\left(-\frac{t'-s'}{\tau_{0i}}\right) \sigma(s') ds', \quad (5.62)$$

където, τ_{0i} - спектъра от времена на релаксация при базови условия.

След интегриране на горния израз се получава

$$\varepsilon_{11}^{\Pi}(t') = \frac{b_{1111} \dot{\sigma}_{11}}{N} \sum_{i=1}^N \tau_{0i} \left(\exp\left(-\frac{t'}{\tau_{0i}}\right) + \frac{t'}{\tau_{0i}} - 1 \right). \quad (5.63)$$

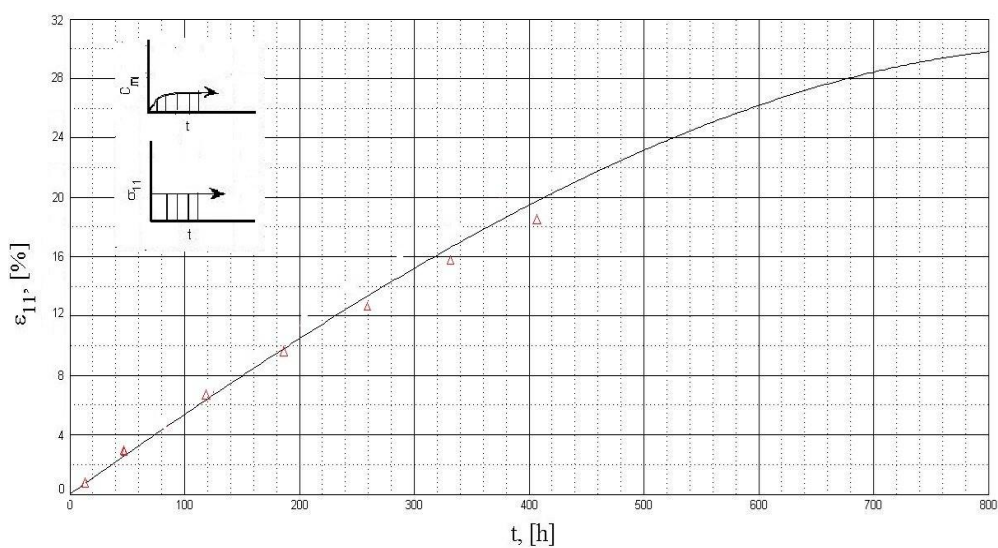
След трансформиране на скалата на времето съгласно

$$t' = \int_0^t a_{c11} [\bar{C}(t)] dt; \quad s' = \int_0^{s'} a_{c11} [\bar{C}(s')] ds; \quad (5.64)$$

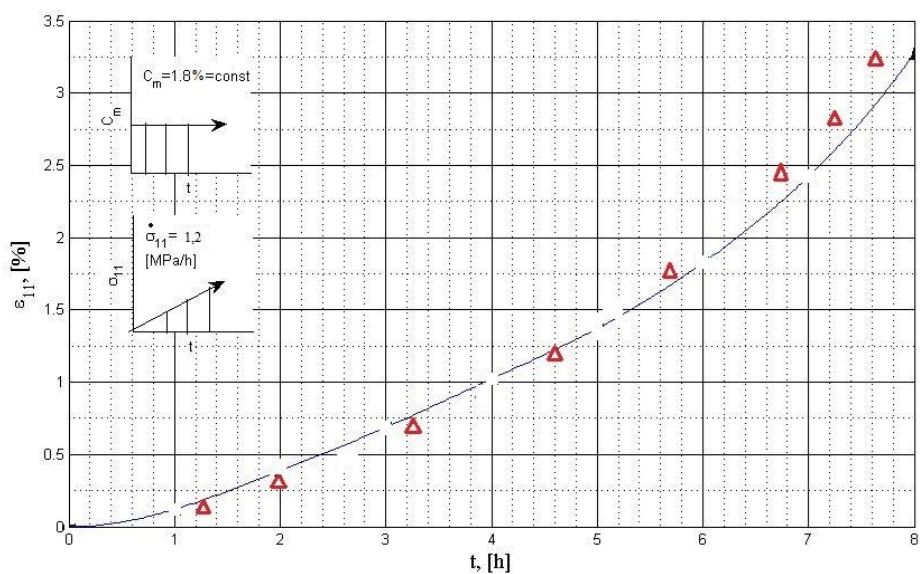
при условията (5.60) и (5.61) за пълната деформация в скалата на истинското време се получава

$$\varepsilon_{11}(t) = (A + B\bar{C})\dot{\sigma}_{11}t + \frac{b_{1111}\dot{\sigma}_{11}}{N} \sum_{i=1}^N \tau_{0i} \left\{ \exp\left[-\frac{t \exp(q\bar{C})}{\tau_{0i}}\right] + \frac{t \exp(q\bar{C})}{\tau_{0i}} - 1 \right\}. \quad (5.65)$$

На (Фиг. 5.12, 5.13) са показани експерименталните резултати и теоретичните криви на пълзене в съответните условия на описаните контролни опити. Експериментите са проведени на специален стенд осигуряващ необходимите експериментални условия, като максималното отклонение не превишава 7%.



Фиг. 5.12. Експериментални резултати от I-ви опит



Фиг. 5.13. Експериментални резултати от II-ри опит

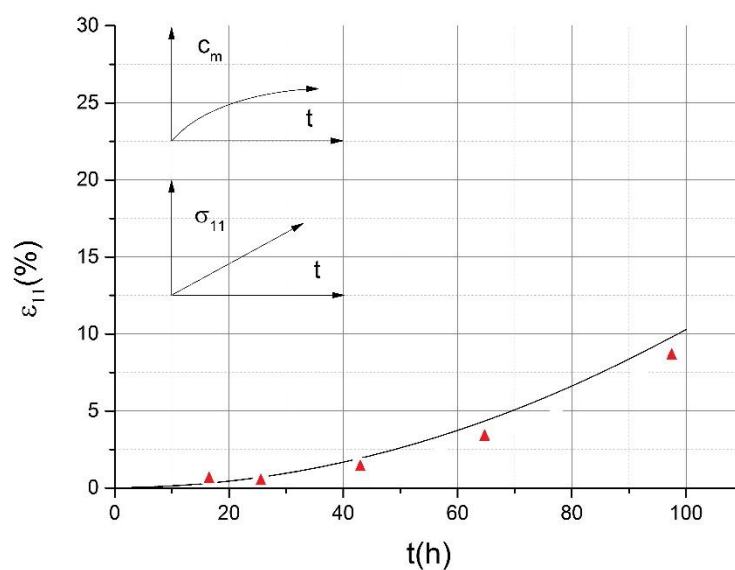
5.4.3. Пълзене в условия на променливи концентрация и напрежение.

Условия:

$$0 \leq t \leq 100\text{h}, \quad \sigma_{11}(t) = \dot{\sigma}_{11} t; \quad 0 \leq \sigma_{11} \leq 0,2(\text{Мпа/ h}), \quad \bar{C} = \bar{C}(t).$$

$$\varepsilon_{11}(t) = \frac{b_{1111} \cdot \dot{\sigma}_{11}}{N \cdot q \cdot m_1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{\tau_{0i}} \right) \cdot \left[\left(t + \frac{1}{q \cdot m_1 \cdot \exp[-q(C_{m0} + m_1 \cdot t)]} \right) \times \right. \\ \left. \times \ln(t \cdot q \cdot m_1 \cdot \exp[-q \cdot (C_{m0} + m_1 \cdot t) + 1]) - t \right] \quad (5.72)$$

На (Фиг. 5.14) получените експериментални резултати са сравнени с теоретичната крива по уравнението (5.72).



Фиг. 5.14. Експериментални резултати от 3-ти контролен опит

5.4.4. Вибропълзене на сух и сорбирал течна среда еластомер.

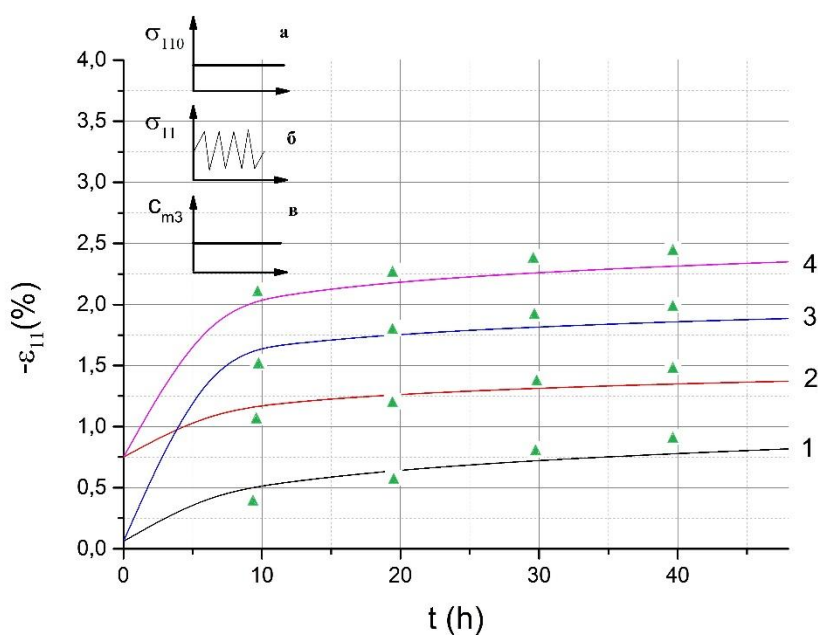
Условия:

4. Статично и циклично напрежение придружено с постоянна концентрация:

$$\sigma_{11_0} = 5 \text{ MPa}; \quad \dot{\sigma}_{11_\alpha} = 28.08; \quad C_{m3} = 0.71; \quad 0 \leq t \leq 48 \text{ h.} \quad (\mathbf{a} + \mathbf{б} + \mathbf{в})$$

$$\varepsilon_{11}(t) = a_{1111} \cdot \sigma_{11} + b_{1111} \cdot \sigma_{11} \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[1 - \exp \left(- \frac{a_v \cdot a_c \cdot t}{\tau_{0i}} \right) \right]. \quad (5.76)$$

На (Фиг. 5.15), чрез семейство от криви са представени експерименталните резултати от 4-ти контролен опит:



Фиг. 5.15. Експериментални резултати от 4-ти контролен опит

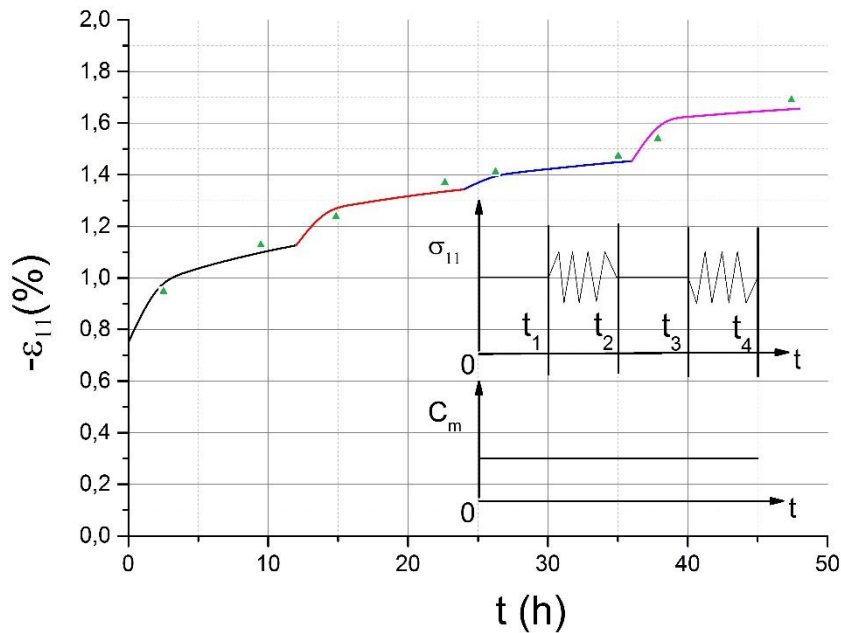
5.4.5. Пълзене при смесен режим на натоварване.

Условията на провеждане на експеримента:

4. Постоянно и циклично напрежение придружено с постоянна концентрация за време от 48 h:

$$\sigma_{11_0} = 5 \text{ MPa}; \quad \dot{\sigma}_{11_\alpha} = 28.08; \quad C_{m3} = 0.71; \quad 36 \leq t \leq 48$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{11}(t) = & a_{1111} \cdot \sigma_{11_0} + b_{1111} \cdot \sigma_{11_0} \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[1 - \exp \left(-\frac{a_c \cdot t}{\tau_{0i}} \right) \right] + \\
& + b_{1111} \cdot \sigma_{11_\alpha} \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[1 - \exp \left(-\frac{a_v \cdot a_c \cdot t - t_3}{\tau_{0i}} \right) \right] + \\
& + b_{1111} \cdot \sigma_{11_\alpha} \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[1 - \exp \left(-\frac{a_c \cdot t - t_2}{\tau_{0i}} \right) \right] + \\
& + b_{1111} \cdot \sigma_{11_\alpha} \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[1 - \exp \left(-\frac{a_v \cdot a_c \cdot t - t_1}{\tau_{0i}} \right) \right].
\end{aligned} \tag{5.80}$$



Фиг. 5.16. Експериментални резултати от
5-ти опит, придружени от зададените условия

5.4.6. Изводи.

Проведените контролни експерименти потвърждават наличието на вибро-течно-временна аналогия за изследваната двойка еластомер-течна среда. Представеният подход позволява на базата на краткотрайни експерименти на пълзене на еластомери в условия на течни среди с отклонение не превишаващо 20 % да бъде описано тяхното вискозоеластично поведение.

ПРИНОСИ:

Приносите в работата имат научно-приложен и приложен характер и могат да се характеризират както следва:

По отношение на научно-приложните приноси:

1. Изследвана е кинетиката на проникване на течни среди в конструкционни еластомери в условие на ненатоварено състояние и в условие на едноосно натисково натоварване, породено от постоянен статичен товар и допълнително наслагваща се циклична компонента. Установена е независимост на дифузионния процес от цикличното натоварване.
2. Изучени са процесите на топлообразуване и дисипация на енергия при циклично натоварване. Предложена е двупараметрова функция на дисипация.
3. Изследвана е възможността за прогнозиране на деформационното поведение от експерименти на краткотрайно пълзене в условия на циклични натоварвания. /Вибро-временна аналогия (ВбВА)/ и са построени обобщени криви за различни нива на сорбция на течна среда.
4. Изследвана е възможността за вибро-течно-временна суперпозиция и е предложена множествена функция на редукция.
5. Предложен е модел за прогнозиране на деформативността чрез функция на множествена вибро-течно-временна редукция (Вб-ТнВР).

По отношение на приложените приноси:

6. Изследвано е механичното поведение на еластомери прилагани в промишлеността в условия на циклично натоварване и течни среди, и са разработени програми за решаване на съответните задачи.
7. Получените данни за разглежданите видове вулканизати и среди могат да бъдат използвани при решаване на различни задачи свързани с механичното поведение на еластомерите.
8. Усъвършенствано е устройство за натоварване на образци при термична и дифузионна атака.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

на инж. Михаил Димитров Колев

1. Alexandrov A., Halil G., Kolev M., Milenova M., DIFFUSION OF LIQUID MEDIA IN VULKANIZATS, International Electronic Journal of Pure and Applied Mathematics, Volume 3 No. 1 2011, 91-100.
2. Alexandrov A., Kolev M., Milenova M., Mazhdrakova A., Time-vibration superposition in a dry and sorbed liquid medium polyurethane, Proceedings of the Anniversary Scientific Conference with International Participation “60 Years UCTM”, June 4-5, 2013.
3. Велков Н., Миленова М., Колев М., Маждракова А., Експериментално изследване на краткотрайно вибропълъзене на твърд полиуретан в условия на течна среда, докладвана 10 септември, 4-то заседание на Национална конференция по машиностроене и машинознание „Дни на механиката във Варна“, Св. Константин и Елена, 2013.
4. Александров А., Колев М., Миленова М., Цолов Ц., Многопараметрово прогнозиране на деформативността чрез функция на множествена течностно-вибро временна редукция, Механика на машините, Книга 1, 2013, ISSN 0861-9727.