

Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті

ӘОЖ: 624.011.9:539.376

Қолжазба құқығында

ЕНСЕБАЕВА ГУЛЬЗАТ МУРАТБЕКОВНА

**Реономды материалдардың жылжымалылығы мен зақымданғандығына
жүктеу режимінің әсерін модельдеу және зерттеу**

6D060300 – Механика

Философия докторы (PhD)
дәрежесін алу үшін дайындалған диссертация

Отандық ғылыми кеңесші:
Ысқақбаев Әлібай Ысқақбайұлы,
ф-м.ғ.д., профессор

Шетелдік ғылыми кеңесші:
Cesare Oliviero Rossi, PhD, профессор

Қазақстан Республикасы
Алматы, 2020

МАЗМҰНЫ

НОРМАТИВТІК СІЛТЕМЕЛЕР	4
БЕЛГІЛЕУЛЕР	5
КІРІСПЕ	6
1 ЕСТЕ САҚТАУДЫҢ ӨШУІ ТҰЖЫРЫМДАМАСЫ НЕГІЗІНДЕ МАТЕРИАЛДАРДЫҢ ЖЫЛЖЫМАЛЫЛЫҚ ПРОЦЕСІНЕ ЖҮКТЕУ РЕЖИМІНІҢ ӘСЕРІН МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ЗЕРТТЕУ	15
1.1 Реономды материалдардың жылжымалылық процесін сипаттау	15
1.2 Мұралық материалдардың сызықтық емес теңдеуі	17
1.3 Реономды материалдардың сызықты емес деформациялануын сипаттау алгоритмі	23
1.4 Реономды материалдардың жылжымалылығын Абель ядросымен компьютерлік модельдеу	26
1.5 Ұсынылған әдістер мен әзірленген бағдарламаны қолдану мысалдары	29
1.5.1 Нейлон 6 материалы	29
1.5.2 ТС 8/3-250 шыныпластик материалы	32
1.5.3 СВМ араמידтік талшығы	42
1.5.4 EDT-10 шайыры материалы	46
1.5.5 Поликристалды графит материалы	49
1.5.6 Эпоксифенолды шыныпластик материалы	55
1.5.7 Полиэфирлі полимербетон материалы	62
1.6 Әр түрлі жүктеу режимдерінде полиэфирлі полимербетон материалының жылжымалылығын зерттеу	65
1.7 Тұрақты жүктеу жылдамдығы режимінде эпоксифенолды шыныпластик материалының жылжымалылығын зерттеу	74
1.8 Реономды материалдардың жылжымалылық қисығынан кернеулердің релаксациясы қисықтарын салу	77
1.9 Бөлім бойынша қысқаша қорытынды	84
2 АСФАЛЬТБЕТОН ҮЛГІЛЕРІНІҢ ЖЫЛЖЫМАЛЫЛЫҚ ПРОЦЕСІНЕ ЖҮКТЕУ РЕЖИМДЕРІНІҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ	86
2.1 Асфальтбетон үлгілерін әзірлеу	86
2.2 Асфальтбетонның тұрақты кернеудегі жылжымалылығы	90
2.3 Сатылы жүктемеде асфальтбетон үлгілерін тәжірибелік зерттеу	97
2.4 Асфальтбетон үлгілерін тұрақты жүктеу жылдамдығы режимінде зерттеу	101
2.5 Бөлім бойынша қысқаша қорытынды	108
3 АСФАЛЬТБЕТОН ҮЛГІЛЕРІНІҢ ҚИРАУ ПРОЦЕСІНЕ ЖҮКТЕУ РЕЖИМІНІҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ	109
3.1 Асфальтбетон үлгілерінің тұрақты кернеуіндегі беріктігі	109
3.2 Тұрақты жүктеме жылдамдығындағы асфальтбетонның беріктігі	114

3.3	Асфальтбетонның циклдік жүктемедегі беріктігі	120
3.4	Бөлім бойынша қысқаша қорытынды	126
	ҚОРЫТЫНДЫ	128
	ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ	131
	ҚОСЫМША А	140

НОРМАТИВТІК СІЛТЕМЕЛЕР

Диссертациялық жұмысында келесі стандарттарға сілтемелер қолданылады:

МЕМСТ 7.32-2017 «Ғылыми зерттеу жұмыс туралы есеп». Құрылымы және рәсімделу ережесі.

МЕМСТ 7.1-2003. Библиографиялық жазба. Библиографиялық сипаттама. Құрастырудың жалпы талаптары мен ережелері.

ҚР СТ 1225-2013 Жол, аэродром асфальтбетон қоспалары және асфальтбетон. Техникалық шарттар.

ҚР СТ 1373-2013 Битумдар және битум тұтқырғыштар. Жол тұтқыр мұнай битумдар. Техникалық шарттар.

ҚР СТ 1284-2004 Құрылыс жұмыстарына арналған тығыз тау жыныстарынан алынған қиыршықтас және ұсақ тас. Техникалық шарттар.

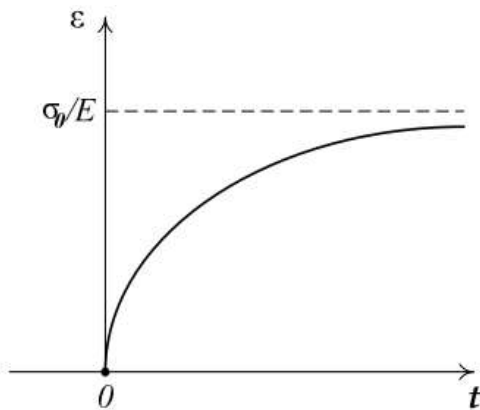
БЕЛГІЛЕУЛЕР

ε	- деформация, %;
E	- серпімділік модулі;
σ	- кернеу, МПа;
t	- уақыт,
τ	- бақылау уақыты алдындағы уақыт;
S	- ауытқудың квадраттар қосындысы;
α	- ерекшелік параметр, $0 < \alpha < 1$;
δ	- жылжымалылық параметрі, $\delta > 0$;
$\psi(\sigma)$	- шартты лездік жүктеу функциясы,
β	- жылжымалылық параметр, $\beta > 0$;
λ	- жылжымалылық параметр, $\lambda > 0$;
ε_e	- тәжірибелік жылжымалылық деформациясының мәндері,
m	- жылжымалылық деформациясының саны,
ε_0^e	- тәжірибелік шартты лездік деформация, %;
ε_0^m	- модельдік (есептелген) шартты лездік деформация, %;
ε_m	- жылжымалылық деформациясының есептелген мәндері, %;
k_e	- тәжірибелік реологиялық параметр,
k_m	- есептелген (теориялық) немесе модельдік реологиялық параметр,
\bar{k}_e	- орташа тәжірибелік реологиялық параметр,
\bar{k}_m	- орташа есептелген немесе модельдік реологиялық параметр,
T	- температура,
$\dot{\sigma}$	- жүктеу жылдамдығы, МПа/с;
A_*	- меншікті қирау жұмысы, Дж/см ³ ;
$\Gamma(\cdot)$	- гамма-функция
a, γ	- корреляция коэффициенттері
A, n	- асфальтбетон материалының ұзақ беріктігінің параметрлері

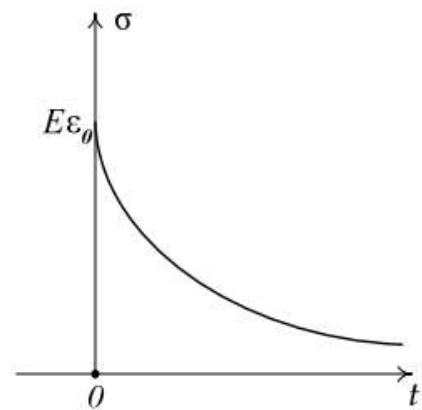
КІРІСПЕ

Көптеген табиғи материалдар (топырақ, тау жыныстары, ағаш, табиғи асфальт) және жасанды материалдар (металдар, олардың қорытпалары, полимерлер, бетон, композиттер) температура мен жүктеу деңгейіне байланысты қандайда болсын тұтқырлысерпімді қасиетін көрсетеді.

Деформацияланатын қатты дене механикасының негізгі есебінің бірі, тұтқырлысерпімді материалдардың деформациялану үдерістерін модельдеу болып табылады. Модельді шартты түрде екі класқа бөледі: склерономдық және реономдық [1, 2]. Склерономдық модельдердің анықтауыш қатынастары уақыт түрлендірулеріне инвариант. Реономдық модельдер уақыттан айқын тәуелді операторлық қатынастармен сипатталады. Деформацияланатын қатты дене механикасының қарапайым реономдық физикалық сызықты моделі, ол жылжымалылық және релаксация (бәсеңдеу) қасиеттерін сипаттайтын тұтқырлысерпімді дене моделі екені белгілі. Мұндағы, жылжымалылық деп жүктеме тұрақты кезіндегі деформацияның уақыт t бойынша өсу құбылысын айтамыз. Деформацияның өзгеру заңдылығының диаграммасы - жылжымалылық қисығы (сурет 1). Релаксация – деформация тұрақты кезіндегі кернеуінің кему құбылысы (сурет 2) [3, 4, б.91-92].



Сурет 1 - Жылжымалылық қисығы



Сурет 2 - Релаксация қисығы

Қазіргі уақытта материалдардың тұтқырлысерпімді қасиетін анықтауға және сипаттауға болатын жетілдірілген тұтқырлысерпімділік теориясы мен әдістері бар [1, с.239-255, 5-8]. Онда серпімділік теориясында болатын [9, 10] сызықты және сызықты емес тұтқырлысерпімділік ажыратылады. Қазіргі таңда сызықты тұтқырлысерпімділік теориясы мен әдістері жақсы дамыған. 1913 жылы В. Вольтерра [11] сызықты емес тұтқырлысерпімділікті екі мүшелі интегралдық теңдеумен сипаттауды ұсынғанымен, сызықты емес тұтқырлысерпімділік теориясы мен әдістері әлі де даму сатысында. Қазіргі уақытта инженерлік қызметтің көптеген салаларында беріктікке, орнықтылыққа және шыдаммерзімді есептеуде материалдар мен олардың конструкция бөлшектерінің тұтқырлысерпімді қасиетін ескерусіз немесе аз ғана есепке алумен жүзеге асырылуда.

Алдымен деформацияланатын тұтқырлысерпімді дененің қарапайым бір буынды модельдерін қарастырайық. Олардың көмегімен тұтқырлысерпімділіктің физикалық табиғатын және жалпылама сипатын түсіндіру оңай.

Тұтқырлысерпімді модель екі элементтерден тұрады [2, с.119, 3, с.46-47, 4, б.82-83]. Оның біреуі Гук элементі (сурет 3) – серпімді элемент. Серпімді элемент үшін Гук заңы мына түрде жазылады:

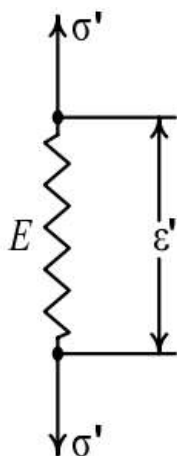
$$\sigma' = E\varepsilon', \quad (1)$$

мұндағы: σ' - серпімді кернеу, E – серпімді модуль, ε' - серпімді деформация.

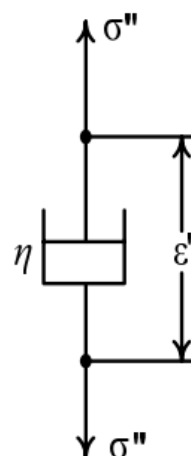
Екінші элемент, ньютон элементі (сурет 4) – тұтқыр элемент. Бұл модель үшін Ньютон заңы мына түрде жазылады:

$$\sigma'' = \eta \frac{d\varepsilon''}{dt}, \quad (2)$$

мұндағы: σ'' - тұтқыр кернеу, ε'' - тұтқыр деформация, η - тұтқырлық коэффициенті.



Сурет 3 – Серпімді элемент



Сурет 4 - Тұтқыр элемент

Гук (1) және Ньютон (2) заңдарын интегралды түрде жазуға болады, яғни кернеулер мен деформациялар арасындағы байланысты интегралдық операторлар арқылы анықтауға болады [2, с.122, 7, с.120, 8, с.61]:

$$\varepsilon(t) = \int_0^t \Pi(t-\tau) d\sigma(\tau); \quad (3)$$

$$\sigma(t) = \int_0^t R(t-\tau) d\varepsilon(\tau), \quad (4)$$

мұндағы $\Pi(t)$ – жылжымалылық функциясы, $R(t)$ – релаксация функциясы.

Сызықты және сызықтық емес тұтқырлысерпімділік теориясында бұл есеп жылжымалылық және релаксация ядросын іздеуге келеді. Жылжымалылық және релаксация ядросы белгілі интегралдық қатынастармен өзара байланысқан, кернеу, деформация және уақыт арасындағы байланысты орнататын анықтауыш теңдеуден тұрады [12]:

$$\varphi(\varepsilon(t)) = \int_0^t \Pi(t-\tau) d\sigma(\tau), \quad \sigma(t) = \int_0^t R(t-\tau) \varphi'(\varepsilon(\tau)) d\varepsilon(\tau), \quad t \geq 0. \quad (5)$$

Тұтқырлысерпімді материалдардың жылжымалылығының сызықты емес деформациялануын сипаттайтын анықтауыш қатынасын (5) ең алғаш Ю.Н. Работнов ұсынған болатын және ол әлі күнге дейін математикалық есептердің тақырыбы болып қалуда. Бұл анықтауыш қатынасы шыныпластиктердің [13-15], нейлон материалдары [16-18], EDT-10 шайыры, СВМ араמידтік талшығы [19], графит [20], полиэфирлі полимербетон [21] және т.б. материалдардың, биологиялық ұлпалардың [22, 23] механикалық қасиеттерін сипаттауда қолданылады. Реономды материалдар үшін екі материалдық функциялардан тұратын Работновтың сызықтық емес анықтауыш қатынасы А.В. Хохловтың [24-33] еңбектерінде аналитикалық түрде зерттелген.

Реономды типті сызықты емес тұтқырлысерпімді ортаның деформациялану моделін құруымен байланысты есептері әлі де негізгі болып табылады. Онда материалдардың деформациясының ядро құрылысын таңдау, олардың резольвенттерін табу мен ядро параметрлерін дәл анықтау, олардың нәтижелері тәжірибемен сәйкес келуі әлі де негізгі сұрақтардың бірі болуда. Зерттелетін осындай есеп белгілі, оған көптеген жарияланымдар арналған. Дегенмен, ол жарияланымдарда материалдың жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндерін қанағаттандыруда ядро параметрлері санының өсуімен негізделеді. Сондықтан қазіргі уақытта аз параметрлер санынан тұратын, базалық тәжірибеліктен анықтауға болатын механика есебінің жылжымалылығы үшін Работновтың бөлшек-экспоненциалды ядросын [7, с.128, 8, с.29] және Абель ядросын [7, с.128, 8, с.27] қолдану көбірек тиімді болып келеді. Бұл ядролар шынайы материалдардың жылжымалылық қисығын тұрақты кернеуде дәл сипаттауға мүмкіндік береді және реономды жылжымалылық теориясы қисығы есебін шешуде белсенді қолданылады. Диссертациялық жұмысында физикалық сызықты (сызықты емес) реономды процестерді зерттеуде Ю.Н. Работновтың реономды сызықты емес теңдеуінің параметрлерін анықтайтын жаңа тиімді әдісті табу талаптары қойылады.

Диссертация жұмысында ұсынылған алгоритмдер модельдері үшін алынған тұтқырлысерпімді материалдардың зерттелуіне сипаттама берейік. Онда авторлар материалдарды мына түрде зерттеген:

- ТС 8/3-250 шыныпластик материалының кернеу мен деформацияның сызықты емес сипатталуы Работновтың сызықтық емес теңдеуімен сипатталған және изохронды жылжымалылық қисықтарының ұқсастығымен шешілген [13, с.392-394, 14, с.83-84];

- нейлон 6 материалының жылжымалылығы Ю.Н. Работнов ұсынған сызықтық емес мұралық теңдеуімен және ядросы Ю.Н. Работновтың бөлшек-экспоненциалды функциясымен сипатталады. Ядро параметрлерін анықтауда Лаплас-Карсон түрлендірулері қолданылған [16, с. 55-56, 17, с. 177, 18, с.84-85];

- СВМ арамидтік талшығы мен ЕДТ 10 шайыры материалының жылжымалылығы Больцман-Вольтеррдің сызықты теңдеуімен сипатталады және жылжымалылық ядросы экспоненциалды функциямен сипатталып, зерттелген [19, р. 273-274];

- полиэфирлі полимербетон материалының жылжымалылық қисығы Больцман-Вольтеррдің теориясымен сипатталады, ал жылжымалылық ядросы экспоненциалды функциямен сипатталған [21, р. 105-106];

- поликристалды графит материалының жылжымалылығының кернеу мен деформация байланысы жалпы түрде Вольтерр-Фреше теңдеуімен сипатталып, зерттелген [20, с.76];

-эпоксифенолды шыныпластик материалының сызықты емес жылжымалылығының тәжірибелік нәтижелеріне, авторлар Лидерман-Розовскийдің интегралдық тәуелділігін пайдаланып зерттеген [15, с. 415].

Материалдардың ұзақ қызмет ету мерзіміндегі механикалық күйін есептеу қажет болса, онда жүктеу тарихының әсерін ескеру қажет [34, с.47]. Реономды материалдардың жүктеме тарихы көптеген авторлармен зерттелуде, олар тұрақты кернеуде [7, 8, 13, 15, 17, 19-21, 24, 25, 28, 35-37] және т.б., сатылы жүктемеде [8, 21, 35-43] және т.б., жүктеу-жүксіздеу циклдік жүктеменің әр түрлі түрлеріндегі жүктемелерде [8, 19, 31, 44-52] және т.б. және тұрақты жылдамдықтағы жүктемелерінде [50, 51, 53-57] және т.б.

Әдебиеттерге талдау жүргізуден, сызықты емес реономды типтің параметрлі теңдеуін әр түрлі жүктеу режимдеріндегі сипаттауда пайдалануға болатыны ескерілді. Мұндай теңдеулерді қолдану материалдар конструкциясының инженерлік тәжірибелік есептеулерінде тиімді болады.

Бұл жұмыста реономды материалдың бірі, асфальтбетон материалы зерттеледі. Ұсақ түйіршікті ыстық тығыз асфальтбетон көптеген елдерде, соның ішінде Қазақстанда автокөлік жолдарының үстіңгі қабатын жабу үшін қолданылады. Асфальтбетон қабаттары автокөлік дөңгелектерінің механикалық күйлері мен қоршаған орта температурасының әсерінен күрделі өзгеріске ұшырайды. Асфальтбетонның механикалық қасиеттері температура мен жүктеу сипаттамаларына, мысалы өлшеміне, ұзақтығына және жүктеу жылдамдығына тәуелді болатыны белгілі [58, 59]. Сондықтан, әр түрлі жүктеу режимдерінде және температураларда асфальтбетонның деформациялануын, беріктігін және шыдаммерзімін зерттеу тәжірибелік маңызды сұрақтардың бірі болып табылады.

Осы мақсатта «Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институтында» асфальтбетон үлгілеріне бірсыткік тікелей созуға сынауда әр түрлі режимдерде шынайы түрде тәжірибелік сынақтар жүргізіледі. Институт автомобиль жолдарын жобалау және салу, жаңарту және күрделі жөндеуден өткізу салаларында еңбек етуде. Онда асфальтбетон үлгілерінің жылжымалылық

процесіне жүктеу режимдерінің әсері зерттеледі. Сонымен бірге, асфальтбетон материалының беріктігін анықтауда, асфальтбетон үлгілерінің қирау үдерісіне жүктеу режимінің әсеріндегі зерттеулерге талдау жасалады.

Бұл диссертациялық жұмыс материалдардың жылжымалылық процесін тәжірибелік және теориялық түрде зерттелуін әрі қарай дамыту болып табылады.

20-30 жылдарда зақымдардың жинақталуы түсінігі қалыптасты. Бұл идея өте жемісті болды және Л.М. Качановтың [60] жылжымалықтан қирау теориясының дамуымен жалғасты.

Барлық қатты денелерде және ерекше поликристалдарда микрокернеулер бар. Микрокернеулердің болуының бір себебі қатты денелердің құрылымдарының микробіртектілігі және микроанизотропиялығы. Микрокернеулер өрісіне өте үлкен ықпал жасайтын фактор – кез-келген деформация және оның ішінде ерекше – пластикалық деформация [4, б.119].

Микрокернеулердің ең үлкен мәні болған жерлерде микросызаттар мен микрокеуектер пайда болады. Пластикалық деформацияның даму кезінде олардың мөлшері біртіндеп көбейеді, ал өлшемі өседі. Бұл процесс – зақымдардың жинақталуы, қираудың бірінші кезеңі болады. Денедегі микрозақымдардың бөлімдері бірігіп макросызат құраған кезде, бірінші кезең аяқталады. Қазіргі кезде тұтас орта механикасының бұл бағыты – зақымдану механикасы («damage mechanics») деп аталады [4, б.120].

Ю.Н. Работнов [61] жылжымалылық және қирау процестерінің өзара әрекеттесуін ескеруді және кернеудің концентрациясының ұзақ мерзімді беріктікке әсерін талдаудың әдісін ескере отырып, Качановтың критерийлерін жалпылады. В.В. Новожиловтың критерийлерін [62], яғни зақымдану параметрі пластикалық деформацияның тарихымен тығыз байланысты, ал шекті шарттарда жүктеу тарихы ескерілетін В.В. Москвитин критерийін [45] және т.б. айтуға болады. Қазіргі уақытта В.В. Болотин [63] және Ә.Ы. Ысқақбаев [64, 65] Работнов пен Качановтың континуальды қирау тұжырымдамасын дамытуды жалғастыруда. Зақымдану процестерін зерттеуде көптеген авторлар [66, 67] еңбек етуде.

Зақымдардың жинақталуы әсерінен реономды материалдарда қирау процесі жылдам жүреді. Бұл жұмыста асфальтбетон үлгілерінің беріктігіне жүктеу режимдерінің әсері зерттеледі.

Диссертацияда жүргізілген зерттеулер жоспар бойынша ғылыми-зерттеу жұмыстарына сай орындалды.

Зерттеу тақырыбының өзектілігі. Инженерлік құрылымдарда пайдаланылатын реономды материалдардың беріктігі мен шыдаммерзімін анықтау маңызды мәселелердің бірі болып табылады. Материалдардың механикалық қасиетін талдауда, оның сыртқы күш әсерінен деформациялануы қарастырылады.

Диссертациялық жұмыстың мақсаты - реономды материалдардың жылжымалылығы мен зақымданғандығына жүктеу режимінің әсерін модельдеу және зерттеу. Материалдардың беріктігі мен шыдаммерзімін бағалау.

Зерттеу міндеттері:

- реономды материалдардың жылжымалылық қасиеттерін сипаттайтын анықтауыш теңдеулерді зерттеу;

- Ю.Н. Работновтың мұралық сызықты емес теңдеуінің параметрлерін анықтайтын жаңа тиімді әдісті табу;

- табылған әдістемені пайдала отырып, физикалық сызықты емес (сызықты) реономды процестерді зерттеу;

- жүктеу тарихының реономды физикалық сызықты және сызықты емес материалдардың жылжымалылық процестеріне әсерін зерттеу және талдау;

- жүктеу тарихының реономды физикалық сызықты және сызықты емес материалдардың зақымдану процестеріне әсерін зерттеу.

Зерттеу нысаны – нейлон 6, ТС 8/3-250 шыныпластик ($\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$), СВМ араמידтік талшығы, EDT-10 шайыры, поликристалды графит, эпоксифенолды шыныпластик, полиэфирлі полимербетон және асфальтбетон материалдарының тәжірибелік жасалған сынақ нәтижелерінің жылжымалылық деформация мәндері.

Зерттеу пәні болып, реономды материалдардың жылжымалылық процесін, олардың жүктеу режимдерін модельдеу, асфальтбетонның жылжымалылық және зақымданғандығына жүктеу режимінің әсерін зерттеу саналады. Зерттеулер деформацияланатын қатты дене және тұтас орта механикасындағы байқалатын фактілерге негізделген көзқарастарға сәйкес жүргізіледі.

Зерттеу әдістеріне мұралы материалдардың сызықты емес Работнов теңдеуі, материалдардың жылжымалылық ядросының Ю.Н. Работнов және Абель функциялары, Работновтың изохронды жылжымалылық қисықтары, α параметрін анықтауда бисекция әдісі, асфальтбетон материалын зерттеуде тікелей созуға сынау әдісі және тұтқырлысерпімділік және серпімділік теориясының әдістері қолданылады.

Зерттеу нәтижесінің теориялық және практикалық маңыздылығы: реономды материалдардың жылжымалылық қасиеттерін сипаттайтын анықтауыш теңдеулерді зерттеу. Ю.Н. Работновтың мұралық сызықты емес теңдеуінің параметрлерін анықтайтын жаңа тиімді әдісті табу. Табылған әдістемені пайдала отырып, физикалық сызықты емес (сызықты) реономдық процестерді зерттеу. Асфальтбетон материалы тәжірибелік түрде зерттелді. Жүктеу режимінің әсерінен асфальтбетон материалының жылжымалылығына модельдеу жасалды және зақымданғандығына жүктеу режимінің әсері зерттелді. Бұл материалдардың беріктігін және асфальтбетонның ұзақ беріктігін бағалауда практикалық жағынан маңызды болмақ.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы. Реономды материалдар деформациясының физикалық сызықты еместігін (сызықтығын) бағалаудың тәжірибелік реологиялық параметр деп аталатын жаңа параметр енгізілді. Реономды материалдардың жылжымалылық қисығын есептеу әдістері мен алгоритмдері жасалды және компьютерлік бағдарлама әзірленді. Асфальтбетон материалы тәжірибелік түрде зерттелді және асфальтбетон материалының жылжымалылығына жүктеу режимінің әсеріне модельдеу жасалды.

Асфальтбетон материалының зақымданғандығына жүктеу режимінің әсері зерттелді.

Тәжірибелік құндылығы. Ол материалдар деформациясының сызықты еместігін (сызықтығын) көрнекі бағалауында қолданылатын тәжірибелік реологиялық параметрінің ұсынылуы.

Жұмыстың апробациясы. Диссертациялық жұмыстың негізгі ойлары мен нәтижелері келесі ғылыми конференциялар мен семинарларда баяндалған және талқыланған:

- Теориялық және қолданбалы механиканың негізгі мәселелері бойынша XII Бүкілресейлік конгресс: «Анализ процессов ползучести и релаксаций материалов на основе нелинейной наследственной теории Работнова». (Уфа, Ресей, 19-24 тамыз 2019 ж.);

- IV Халықаралық ғылыми-тәжірибелік конференция «Қазіргі әлемдегі Ғылым және Білім XXI ғасырдың мәселелері»: «Анализ влияния режима нагружения на ползучесть реономных материалов». (Нұр-Сұлтан, Қазақстан, 29-31 қазан, 2019 ж.);

- Workshop on “Smart Nanostructured Materials: from Molecular Self-assembly to Advanced Applications”: «Analysis of the influence of loading mode on creep of rheonomic materials». (Rome, 2-4 October 2019);

- Халықаралық ғылыми конференция: Физика-математика ғылымдарының докторы, профессор М.Б. Рамазановтың 70 жылдық мерейтойына орайластырылған «Математика, механика және информатиканың теориялық қолданбалы мәселелері»: «Исследование релаксации напряжений методом Работнова». (Қарағанды, Қазақстан, 12-13 маусым, 2019 ж.);

- V Халықаралық фараби оқулары. Студенттер мен жас ғалымдардың «Фараби әлемі» атты халықаралық ғылыми конференция: «Реономды процестерді изохронды жылжымалылық қисықтарының ұқсастық әдісімен модельдеу». (Алматы, Қазақстан, 10-12 сәуір, 2018 ж.);

- Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ механика кафедрасының ғылыми семинарлары (Алматы, Қазақстан, 2017-2020 жж.).

Жарияланымдар. Диссертация мазмұны бойынша 10 жұмыс жарияланды, солардың ішінде Scopus және Web of Science дерекқорымен индекстелетін халықаралық ғылыми журналдарында 5 [38, 49, 53, 68, 69], олардың 3 жарияланымдары ҚР Білім және ғылым министрлігінің Білім және ғылым саласындағы бақылау комитеті ұсынған ғылыми басылымдарына жатады [49, 53, 68] және шет елдердегі халықаралық ғылыми конференциялардың материалдарында 2 [70, 71] мақалада және отандық халықаралық ғылыми конференциялардың материалдарында 3 [72, 73, 74] мақалада баяндалған.

Автордың жеке қосқан үлесі:

- реономды материалдардың жылжымалылық қисығын модельдеудегі есептеу әдістемесін жасау процесінің барлық кезеңдеріне қатысты;

- сандық мәндерін анықтау бағдарламасын жасауға ізденуші тікелей қатысты;

- реономды материалдардың жылжымалылығын зерттеу нәтижелерін апробациялауға жеке қатысты;

- орындалған жұмыс бойынша негізгі жарияланымдарды дайындау.
- «Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институтында» асфальтбетон материалын тәжірибелік зерттеуге қатысты.

Диссертацияның құрылымы мен көлемі. Диссертациялық жұмыс кіріспеден, үш бөлімнен, қорытындыдан және әдебиеттер тізімінен тұрады. Диссертацияның жалпы көлемі 141 қағаз беттерінде баяндалған, онда 100 суреттер, 52 кестелер, 136 атаулардан тұратын қолданылған әдебиеттер тізімі бар.

Диссертациялық жұмыстың негізгі мазмұны. Кіріспеде зерттелетін мәселенің қазіргі күйін талдай отырып, қазіргі бар жұмыстарға шолу жасалды; диссертациялық зерттеу тақырыбының өзектілігі негізделді; жұмыстың мақсаты, нысаны, зерттеу міндеттері, ғылыми жаңалығы, теориялық және практикалық маңыздылығы, қорғауға шығарылатын негізгі қағидалары, диссертация тақырыбы бойынша жарияланған жұмыстар туралы мәліметтер және оның әзірлену дәрежесі қамтылды.

Диссертацияның **бірінші бөлімінде** реономды материалдардың жылжымалылық процесін сипаттауда Ю.Н. Работновтың сызықтық емес интегралдық теңдеуі қарастырылады. Материалдың жылжымалылық қисықтары мен изохронды қисықтарының схемалық түрін қолдана отырып, Ю.Н. Работновтың изохронды жылжымалылық қисықтарының әдісі нақты түсіндіріледі. Ю.Н. Работновтың сызықтық емес интегралдық теңдеуіне бөлшек-экспоненциалды Работнов ядросы немесе Абель ядросын пайдалана отырып, сәйкесті материалдардың реономды сызықтық емес деформациясына сәйкесті теңдеу алынады. Жылжымалылық параметрлерін α , ε_0 , δ , β және λ анықтаудың жақсартылған әдістері ұсынылады. Реономды материалдардың сызықтық емес деформациялану процесін сипаттаудың толық әдістемесі жасалады. Сатылы және циклдік жүктемелерде сыналған полиэфирлі полимербетон материалының зерттеу нәтижелерінен алынған жылжымалылық деформациясының мәндеріне математикалық модельдеу жасалады. Әр түрлі деңгей кернеулеріндегі полиэфирлі полимербетон материалының деформациялануының мәндеріне математикалық модельдеу жасалады. Тұрақты жүктеу жылдамдығы режимінде сыналған эпоксифенолды шыныпластик материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндеріне математикалық модельдеу жасалады. Тұтқырлысерпімді материалдардың кернеу релаксациясы есептері шешіледі.

Диссертацияның **екінші бөлімінде** Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институтында асфальтбетон үлгілерін 22-24° С температурада тікелей созуға сынауда деформациясы мен қирау сипаттамаларын тәжірибелік түрде анықтау нәтижелері қарастырылады.

Диссертацияның **үшінші бөлімінде** асфальтбетон үлгілерінің тұрақты кернеуде, тұрақты жылдамдықтағы және циклдік жүктемеде жүргізілген тәжірибелік сынақтары зерттеледі. Асфальтбетонның беріктігі анықталады.

Қорытындыда диссертациялық зерттеудің негізгі нәтижелері мен қорытындылары, қойылған міндеттердің толық шешілуін бағалау, нәтижелерді нақты пайдалану бойынша ұсыныстар келтіріледі.

Алғыс. Автор Отандық ғылыми кеңесшілері: физика-математика ғылымдарының докторы, профессор Ысқақбаев Әлібай Ысқақбайұлына және техника ғылымдарының докторы, профессор Телтаев Бағдат Бұрханбайұлына, шетелдік ғылыми кеңесші Калабрия университетінің (Италия) «Химия және химиялық технологиялар департаментінің» PhD, профессоры Cesare Oliviero Rossi зерттеу және тәжірибе жасау әдістемесін әзірлеуде көмек қолын созған, пайдалы кеңестері мен қолдау көрсетіп, көмектескендері үшін шынайы алғысын білдіреді, сонымен бірге «Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институтының» қызметкерлері мен зертхана ұжымына және Калабрия университетінің (Италия) «Physical Chemistry_Soft Matter (Terenzi)» зертхана орталығының қызметкерлеріне алғысын білдіреді.

1 ЕСТЕ САҚТАУДЫҢ ӨШУІ ТҰЖЫРЫМДАМАСЫ НЕГІЗІНДЕ МАТЕРИАЛДАРДЫҢ ЖЫЛЖЫМАЛЫЛЫҚ ПРОЦЕСІНЕ ЖҮКТЕУ РЕЖИМІНІҢ ӘСЕРІН МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ЗЕРТТЕУ

Серпімділік теориясының мұралық қатынастарын тұжырымдау кезінде есте сақтаудың өшуі шартын қанағаттандыратын ядролар қарастырылады. Мұралық ядросы τ уақытында жасалған әрекеті туралы t уақытында «ұмыту» дәрежесін сипаттайды. Демек, егер материалдың қасиеттері уақыт өткен сайын өзгермесе, онда «есте сақтау» мен «ұмыту» өлшемі t - τ айырмасына байланысты деп болжанады [3, с.576-577]. Онда релаксация функциялары уақытқа тәуелді оң монотонды кемитін функциялар болуы керек. Ал жылжымалылық функциялары уақытқа тәуелді монотонды өсетін функциялар болады [1, с.22].

1.1 Реономды материалдардың жылжымалылық процесін сипаттау

Мұралық материалдардың деформациясының сызықты еместігін есепке алудың қарапайым, бірақ тиімді әдістерінің бірін 1948 жылы Ю.Н. Работнов ұсынған [12]. Бұл әдіс материалдардың изохронды жылжымалылық қисықтарының ұқсастығына негізделген. Бұл әдісте, тұтқырлысерпімді материалдардың жылжымалылығының сызықтығы үшін деформациялану процесі Больцман-Вольтеррдің интегралдық теңдеуімен сипатталады, бірақ теңдеудің сол жағы тәжірибелік жолмен анықталған деформация, «шартты лездік деформация қисығы» деп аталатынмен ауыстырылған. Әдіс авторы, Ю.Н. Работновтың пікірінше, лездік деформация қисығы – бұл қиялдағы қисықтың түрі, оны іс жүзінде алу мүмкін емес, себебі шынайы жағдайда деформация жылдамдығы әрдайым шекті мән болып табылады. Бұл қисық изохронды жылжымалылық қисықтарының ұқсастығын ескере отырып, уақыттың ақырғы мәнінде алынуы мүмкін [61, с.36-37, 75, с.44-46, 76, р.908].

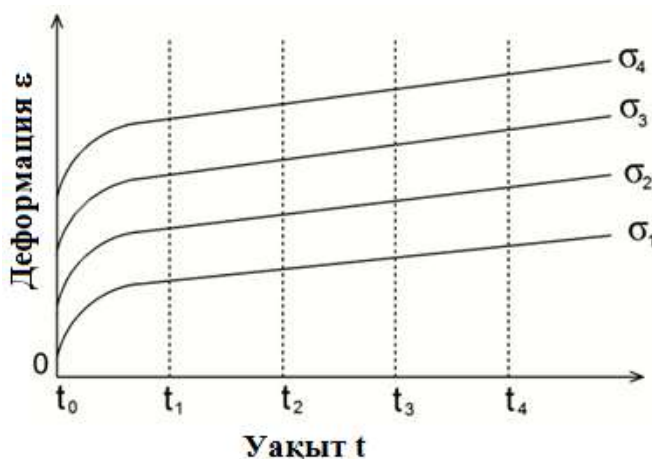
Тұтқырлысерпімді материалдардың механикалық күйін сипаттауда негізгі әрекеттердің бірі – ол интегралдық теңдеудің ядросын таңдау және оның параметрлерін анықтау екендігі белгілі. [35] жұмысында айтылғандай, жылжымалылық ядросының бөлшек-экспоненциалды түріндегі Работнов функциясы әмбебап. Бөлшек-экспоненциалды функциясы жақсы зерттелген [77] және де оны есептеулерде пайдалану үшін арнайы кесте дайындалған [78].

Работновтың бөлшек-экспоненциалды ядросының параметрлерін табудың бірнеше әдістері белгілі: тура жуықтау [79-83], Лаплас-Карсон түрлендіруін қолдану [16, с.55, 17, с.177, 79, с.16-19, 84], Лагранж көпмүшелерін интерполяциялау [85] және Миттаг-Леффлер функциясын қолдану [79, с.14-15, 86].

Ю.Н. Работновтың изохронды жылжымалылық қисықтар әдісі. Кез-келген материалдың механикалық қасиетін талдау мәселесінің бірі, ол материалдың деформациялану сипаттамасын анықтау болып табылады: сызықты немесе сызықты емес, ол әдетте тәжірибелік сынақтардың нәтижелерінен деформацияның кернеуден тәуелділігін құру арқылы анықталады. Ю.Н. Работнов ұсынған, бұл әдіс бойынша материалдар үлгілерін

жылжымалылыққа сынау нәтижелерінен тұрақты кернеулерінде изохронды жылжымалылық қисықтары құрылады.

Әр түрлі тұрақты кернеулердегі материалдың жылжымалылық қисықтары сурет 1.1 көрсетілген. Мысалы, осы жылжымалылық қисығына t_1, t_2, t_3 және t_4 уақыт мезеттеріне сәйкес келетін тігінен төрт сызық сызайық. Әрбір тігінен сызылған сызықтар $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ және σ_4 кернеулеріне сәйкес келетін төрт жылжымалылық қисықтарын қиып өтеді. Көрсетілген нүктелерден көлденең сызықтарды жүргізе отырып, t_1 уақытына сәйкесті тік сызық бойымен қиылысатын төрт деформация мәндерін $\varepsilon_1(t_1), \varepsilon_2(t_1), \varepsilon_3(t_1)$ және $\varepsilon_4(t_1)$ алуға болады. Осы төрт кернеу мен төрт деформация мәндерінен, t_1 уақытына сәйкесті изохронды жылжымалылық қисықтарын тұрғызуға болады. Осындай түрде, әрбір жүктеме ұзақтығындағы материалдың изохронды жылжымалылық қисықтарын салуға болады (сурет 1.2). Изохронды қисықтар материал деформациясының сипатын (сызықты және сызықтық емес) және сызықтық емес дәрежесін айқын бағалауға мүмкіндік береді. Мұндай изохронды қисықтардың ұқсастығы тәжірибеде жиі кездеспейді. Егер олардың кез келген біреуі белгілі болса, ұқсастық қасиеті бойынша материалдың барлық басқа изохронды жылжымалылық қисықтарын алуға болады.



Сурет 1.1 - Әр түрлі тұрақты кернеулердегі материалдың жылжымалылық қисықтары



Сурет 1.2 - Материалдың деформациясының изохронды қисықтары

1.2 Мұралық материалдардың сызықтық емес теңдеуі

Изохронды жылжымалылық қисықтарының ұқсастық қасиеті бойынша, мұралық материалдардың сызықтық емес деформациялану процесін сипаттауда Ю.Н. Работнов сызықтық емес интегралдық теңдеуді ұсынды [3, с.606, 8, с.215, 12, с.61]:

$$\varphi[\varepsilon(t)] = \sigma(t) + \int_0^t K(t-\tau)\sigma(\tau)d\tau, \quad (1.1)$$

мұндағы $\varepsilon(t)$ - t уақытындағы деформация;

$\sigma(t)$ - t уақытындағы кернеу;

$\sigma(\tau)$ - τ уақытындағы кернеу;

$K(t-\tau)$ - жылжымалылық ядросы;

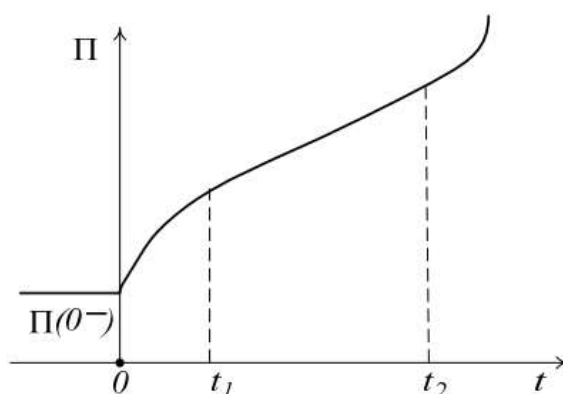
t – бақылау уақыты;

τ – бақылау уақыты t , алдындағы уақыт.

Интегралдық теңдеудің (1.1) сол жағындағы өрнек $\varphi[\varepsilon(t)]$ «лездік деформация қисығы» деп аталады.

Абель ядросы.

Материалдың жылжымалылық қисықтары кернеудің деңгейіне және температураға байланысты деформациясы екі немесе үш бөлікті сипаттамаларға ие болады [2, с.123-124, 3, с.613-614, 4, б.88] (сурет 1.3). 1.3-суретте көрсетілгендей, жылжымалылық қисығы деформацияға ε , ондағы уақытқа t және кернеуге σ тәуелді.



Сурет 1.3 - Жылжымалылық қисығы [2, с.124]

Олардың бірінші кезеңі ($0 \leq t \leq t_1$) бастапқы жылжымалылық деп аталады. Бұл кезеңде жылжымалылық функциясы жоғарыға қарай дөңес болады. Екінші кезең ($t_1 \leq t \leq t_2$) орныққан жылжымалылық деп аталады, онда ол түзу сызықпен бейнеленеді. Үшінші кезең ($t_2 \leq t \leq \infty$) төменге қарай жылжымалылық функциясының дөңес болуымен сипатталады және ол шектелмеген

жылжымалылық деп аталады. Бұл кезеңдер міндетті болып табылады. Материалдың жылжымалылық қисығын сипаттауда кейде бұл кезеңдердің тек біреуі немесе екеуі ғана болуы мүмкін екені ескеріледі.

Реономды материалдың анықтауыш қатынасы $(0, t_1)$ интервалында (t - уақыт, $t_1 > 0$) деформация $\varepsilon(t)$ уақытқа байланысты кемімейтін функция $\frac{d\varepsilon(t)}{dt} > 0$ болсын. Бұл жағдайда (1.1) анықтауыш қатынасын мына түрде аламыз:

$$\varepsilon(t) = \psi[\sigma(t)] + \int_0^t K(t-\tau)\psi[\sigma(\tau)]d\tau, \quad (1.2)$$

мұндағы σ - шартты кернеу;

$\psi(\sigma)$ –шартты лездік жүктеу функциясы;

$K(t-\tau)$ – тікелей жылжымалылық ядросы.

Тұрақты кернеуде, $\sigma = const$ және тұрақты температурада, $T = const$ үлгілерді созуға сынауда жылжымалылық ядросы мына түрде сипатталады [8, с.27]:

$$K(t-\tau) = \delta(t-\tau)^{-\alpha}, \quad (1.3)$$

мұндағы $\alpha \in (0,1)$; $\delta > 0$.

(1.3) теңдеуді ескере отырып, (1.2) теңдеуден жай жылжымалылық теңдеуін аламыз:

$$\varepsilon_m(t, \sigma) = \psi[\sigma(0)] \left(1 + \frac{\delta}{1-\alpha} t^{1-\alpha} \right), \quad (1.4)$$

мұндағы $\psi[\sigma(0)] = \varepsilon_0^m(\sigma)$ - шартты лездік деформация, $\varepsilon_m(t, \sigma)$ - материалдың жылжымалылық деформациясының есептелген мәндері.

Алынған (1.4) теңдеудің оң жағы, белгісіз α және δ параметрлерден тұратын, белгілі Абель функциясы екендігін көруге болады. Бұл теңдеу (1.4) үш белгісіз параметрлерден $\varepsilon_0^m(\sigma)$, α және δ тұрады. Әрі қарай α параметрін $(0, 1)$ интервалында белгілі деп алып [16, с.55, 17, с.176, 35, р.3-4, 37, р.171, 38, р.5], ал белгісіз параметрлерін $\varepsilon_0^m(\sigma)$ және δ ең кіші квадраттар әдісін қолдана отырып анықтаймыз. Ең кіші квадраттар әдісіне сәйкес $\varepsilon_0^m(\sigma)$ және δ параметрлерінің мәні келесі шартты қанағаттандыруы керек [38, р. 4]:

$$S(\varepsilon_0^m, \delta) = \sum_{i=1}^m \left[\varepsilon_0^m \left(1 + \frac{\delta}{1-\alpha} t_i^{1-\alpha} \right) - \varepsilon_e(t_i) \right]^2 \rightarrow \min, \quad (1.5)$$

мұндағы $S(\varepsilon_0^m, \delta)$ - ауытқудың квадраттар қосындысы;

$\varepsilon_e(t_i)$ – тәжірибелік жолмен анықталған, жылжымалылық

деформациясының мәндері;
 m – жылжымалылық деформация саны.

Келесі екі $\frac{\partial S(\varepsilon_0^m, \delta)}{\partial \varepsilon_0^m} = 0$ және $\frac{\partial S(\varepsilon_0^m, \delta)}{\partial \delta} = 0$ дербес туындылардан ε_0^m және δ параметрлерін анықтайтын өрнектер табылды [38, p.4-5]:

$$\varepsilon_0^m = \frac{\sum_{i=1}^m \varepsilon_e(t_i) \sum_{i=1}^m t_i^{2(1-\alpha)} - \sum_{i=1}^m \varepsilon_e(t_i) t_i^{(1-\alpha)} \sum_{i=1}^m t_i^{(1-\alpha)}}{m \sum_{i=1}^m t_i^{2(1-\alpha)} - \left[\sum_{i=1}^m t_i^{(1-\alpha)} \right]^2},$$

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\varepsilon_e(t_i)}{\varepsilon_0^m} - 1 \right) t_i^{(1-\alpha)}}{\frac{1}{1-\alpha} \sum_{i=1}^m t_i^{2(1-\alpha)}},$$
(1.6)

α параметрінің мәндерін (0, 1) интервалынан белгілі бір қадаммен кездейсоқ таңдай отырып, (1.6) өрнегінен $\varepsilon_0^m = \varepsilon_0^m(\alpha)$ параметрінің мәнін табамыз. Табылған ε_0^m параметр мәнін және сәйкесті ерекшелік параметрі α мәнінен, $\delta = \delta(\varepsilon_0^m, \alpha)$ параметрінің мәні анықталады.

Әрі қарай табылған параметрлер α , ε_0^m және δ мәндерін кезекті (1.4) теңдеуге қоя отырып, жылжымалылық деформациясының мәндері есептелінеді $\varepsilon_m(t, \sigma) = \varepsilon_m(t_i, \alpha, \delta, \varepsilon_0^m)$.

Формула бойынша жылжымалылық деформациясының есептелген мәндерін тәжірибе жүзінде анықталғандардың ауытқуынан

$$\Delta \varepsilon_m(t_i, \sigma) = \frac{\varepsilon_m(t_i, \alpha, \delta, \varepsilon_0^m) - \varepsilon_e(t_i)}{\varepsilon_e(t_i)} \cdot 100\%,$$
(1.7)

$\Delta \varepsilon_m(t_i, \sigma)$ ең кіші мәнін қамтитын α , ε_0^m және δ параметрлерінің оңтайлы мәндерін таңдауға болады [38, p. 5].

Көптеген тәжірибелік және есептелген нәтижелерді талдаудан модельдік $\varepsilon_0^m(\sigma)$ және тәжірибелік жолмен алынған $\varepsilon_0^e(\sigma)$ шартты лездік деформациялар әрдайым жоғары дәлдікпен сәйкес келетіні байқалады. Сондықтан мына шарт қабылданады [68, p. 68]:

$$\varepsilon_0^m(\sigma) \approx \varepsilon_0^e(\sigma).$$
(1.8)

Берілген (1.8) теңдікті ескере отырып, онда (1.6) өрнектерден келесі теңдеулерді алуға болады [68, p. 68]:

$$1 = \frac{\sum_{i=1}^m k_e(t_i) \sum_{i=1}^m t_i^{2(1-\alpha)} - \sum_{i=1}^m t_i^{(1-\alpha)} \sum_{i=1}^m k_e(t_i) t_i^{(1-\alpha)}}{m \sum_{i=1}^m t_i^{2(1-\alpha)} - \left[\sum_{i=1}^m t_i^{(1-\alpha)} \right]^2}, \quad (1.9)$$

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^m (k_e(t_i) - 1)}{\frac{1}{1-\alpha} \sum_{i=1}^m t_i^{2(1-\alpha)}}. \quad (1.10)$$

(1.9) және (1.10) өрнектеріндегі $k_e(t)$ жылжымалылықтың тәжірибелік реологиялық параметрі деп аталады және ол келесі формуламен анықталады [38, p. 6, 70, 72, б. 66]:

$$k_e(t, \sigma_\xi, T) = \frac{\varepsilon_e(t, \sigma_\xi, T)}{\varepsilon_0^e(\sigma_\xi, T)}, \quad (1.11)$$

мұндағы $\sigma_\xi (\xi = 1 - n), n$ - жүктемелер саны.

Жылжымалылықтың тәжірибелік реологиялық параметрі, $k_e(t)$ - тәжірибе жүзінде алынған шартты лездік деформацияға қатысты қалыпқа келтірілген уақыт функциясы. Ол $t=0$ уақытында 1-ге тең және $t>0$ уақытында 1-ден үлкен. Бұл әр түрлі уақыттарындағы жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндерінен шартты лездік деформацияға қатысты бірнеше есе үлкен болатынын көрсететін тәжірибелік мәндер.

Көріп отырғанымыздай, (1.9) өрнегінде бір ғана белгісіз параметр α бар. Математикалық тұрғыдан алғанда, белгісіз параметрі α (1.9) теңдеудің түбірі болып табылады, ал α параметрін табу үшін жуықтау әдістерінің бірін пайдалануға болады. Біздің жағдайда бисекция әдісі (дихотомия әдісі, қақ бөлу әдісі) қолданылды [87].

Жылжымалылық ядросының параметрі α (0, 1) интервалындағы мәнге ие болатыны алдын ала белгілі. Бисекция әдісінің мағынасы: түбірі ізделініп жатқан аралық (кесінді) қақ бөлінеді және ақырында функция қарама-қарсы таңбалы мәндерді қабылдайтын екі аралықтың біреуі таңдап алынады.

Онда (1.9) өрнекті келесі түрде қайта жазамыз [68, p. 69]:

$$f(\alpha) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m k_e(t_i) \sum_{i=1}^m t_i^{2(1-\alpha)} - \sum_{i=1}^m t_i^{(1-\alpha)} \sum_{i=1}^m k_e(t_i) t_i^{(1-\alpha)}}{m \sum_{i=1}^m t_i^{2(1-\alpha)} - \left[\sum_{i=1}^m t_i^{(1-\alpha)} \right]^2}, \quad (1.12)$$

Әрі қарай α параметрінің мәнін есептеу процедурасын келесі алгоритм бойынша жүргізуге болады:

1. t_i уақытының мәндері, жылжымалылық деформациясының тәжірибелік реологиялық параметр мәндері $k_e(t_i)$ және есептелетін дәлдік $\bar{\varepsilon}$ енгізіледі;
2. $\alpha \in (0,1)$ интервалында $[a, b]$ кесіндісі таңдалады;
3. $[a, b]$ кесіндісінің ортасы мына формула бойынша есептеледі:

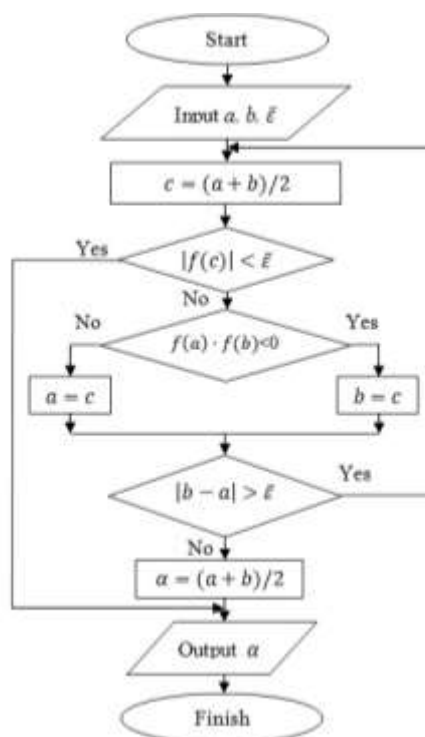
$$c = \frac{a + b}{2}; \quad (1.13)$$

4. $\alpha = c$ үшін $f(\alpha)$ функциясының мәні есептеледі, яғни $f(c)$;
5. шарт тексеріледі:

$$f(c) \leq \bar{\varepsilon}; \quad (1.14)$$

6. егер (1.13) шарт орындалса, онда a параметрінің мәні ретінде $[a, b]$ кесіндісінің орталық мәні c алынып, (1.14) шарт тексеріледі. Кері жағдайда, $[a, b]$ кесіндісі қаж бөлінеді және одан кейінгі есептеулер үшін екеуінің біреуі алынады, ақырында $f(\alpha)$ функциясы қарама-қарсы таңбалы мәнге ие болса, онда есептеулер 3-тен бастап қайталаанады;
7. α параметрінің мәні анықталғаннан кейін, (1.10) өрнегін қолдана отырып, δ параметрінің мәні есептелінеді.

Жоғарыда келтірілген алгоритмге сәйкес, 1.4-суретте жылжымалылық ядросының α параметрі мәнін есептеу процедурасы орындалатын компьютерлік бағдарламаның блок-схемасы көрсетілген.



Сурет 1.4 - α параметрі мәнін есептеудің блок-схемасы [68, p.70]

Работнов ядросы.

Интегралдық теңдеудің (1.1) жылжымалылық ядросы Работновтың бөлшек-экспоненциалды функциясымен сипатталады [7, с.128, 8, с.29]:

$$K(t-\tau) = \lambda \mathcal{E}_{-\alpha}(-\beta, t-\tau) = \lambda(t-\tau)^{-\alpha} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\beta)^n (t-\tau)^{(1-\alpha)n}}{\Gamma[(1-\alpha)(1+n)]}, \quad (1.15)$$

мұндағы $\mathcal{E}_{-\alpha}(-\beta, t-\tau)$ - Работновтың бөлшек-экспоненциалды функциясы;
 λ, α, β – жылжымалылық ядро параметрлері ($\lambda > 0, 0 < \alpha < 1, \beta > 0$);
 $\Gamma(\cdot)$ – гамма-функция.

(1.15) теңдеуді ескере отырып, (1.2) теңдеуден $\sigma = const$ және $T = const$ болғанда, жай жылжымалылық теңдеуін аламыз:

$$\varepsilon_m(t, \sigma) = \psi[\sigma(0)] \left[1 + \lambda \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\beta)^n t^{(1-\alpha)(1+n)}}{\Gamma[(1-\alpha)(1+n)+1]} \right]. \quad (1.16)$$

$t_k = \beta^{-\left(\frac{1}{1-\alpha}\right)}$ енгізе отырып, (1.16) теңдеуді келесі түрде қайта жазайық:

$$\varepsilon_m(t, \sigma) = \varepsilon_0^m (1 + \lambda F_{4i}), \quad (1.17)$$

мұндағы
$$F_{4i} = t_k^{(1-\alpha)} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \left(\frac{t_i}{t_k}\right)^{(1-\alpha)(1+n)}}{\Gamma[(1-\alpha)(1+n)+1]}. \quad (1.18)$$

Ең кіші квадраттар әдісін қолдана отырып, (1.5) шартқа ұқсас экстремум шартын мына түрде жазайық [38, р.4]:

$$S(\beta, \lambda) = \sum_{i=1}^m \left[\varepsilon_0^m (1 + \lambda F_{4i}) - \varepsilon_e(t_i) \right]^2 \rightarrow \min. \quad (1.19)$$

Келесі екі дербес туындылардан, $\frac{\partial S(\beta, \lambda)}{\partial \beta} = 0$ және $\frac{\partial S(\beta, \lambda)}{\partial \lambda} = 0$, β және λ параметрлерін анықтайтын келесі өрнектер табылады [38, р. 5-6]:

$$\sum_{i=1}^m \left[(1 - k_e(t_i)) \sum_{i=1}^m F_{4i}^2 + F_{4i} \sum_{i=1}^m (k_e(t_i) - 1) F_{4i} \right] F_{5i} = 0, \quad (1.20)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^m (k_e(t_i) - 1) F_{4i}}{\sum_{i=1}^m F_{4i}^2}, \quad (1.21)$$

$$\text{мұндағы } F_{Si} = t_k^{2(1-\alpha)} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n n \beta^{(n-1)} \left(\frac{t_i}{t_k}\right)^{(1-\alpha)(1+n)}}{\Gamma[(1-\alpha)(1+n)+1]}. \quad (1.22)$$

(1.20) теңдеуінен β параметрінің мәні анықталады. Егер бұл теңдеудің жалғыз шешімі бар болса, онда $\beta > 0$ параметрі (1.20) теңдеудің ізделіп отырған мәні болып табылады. β және λ параметрлерінің мәндерін анықтау кезінде, сәйкесті (1.20) және (1.21) теңдеулеріне бұрын есептелген α және ε_0^m параметрлерінің мәндері қолданылады.

Жылжымалылық ядросында Работновтың бөлшек-экспоненциалды функциясын кеңінен қолданылуына кедергі келтіретін мәселенің бірі оның параметрлерін анықтау оңай болмайтындығы [17]. Ол үшін арнайы кестелер өңделген [78], оның көмегімен бөлшек-экспоненциалды функциясы $x \leq 4$ болғанда, $x = \beta t^{(1-\alpha)}$ аргументімен есептелінеді. Ал $x > 4$ болғанда, Б.Д. Аниннің асимптоталық формуласын қолдану ұсынылады [88]. Есептеулер көрсеткендей, аргументтің аз мәндерінде $x < 4$ болғанда, (1.16) теңдеудің оң жағындағы шексіз қатар нашар жинақталады.

Арнайы енгізілген белгілеуі $t_k = \beta^{-\left(\frac{1}{1-\alpha}\right)}$ (1.18) және (1.22) өрнектердегі қатарларда алынған t_i уақыты емес, салыстырмалы уақыттың (t_i/t_k) енгізілуі, есептеулердің жинақтылығын едәуір арттырады. Бұл аргументтің кез-келген мәнінде бөлшек-экспоненциалды функциясының жеткілікті дәл мәндерін жылдам алуға мүмкіндік береді [38, p. 6].

1.3 Реономды материалдардың сызықты емес деформациялануын сипаттау алгоритмі

Диссертацияда реономды материалдардың сызықты емес деформациясын сипаттайтын жаңа әдіс ұсынылды [38, 68]. Бұл әдіс бірнеше кезеңнен тұрады және келесі ретпен орындалады.

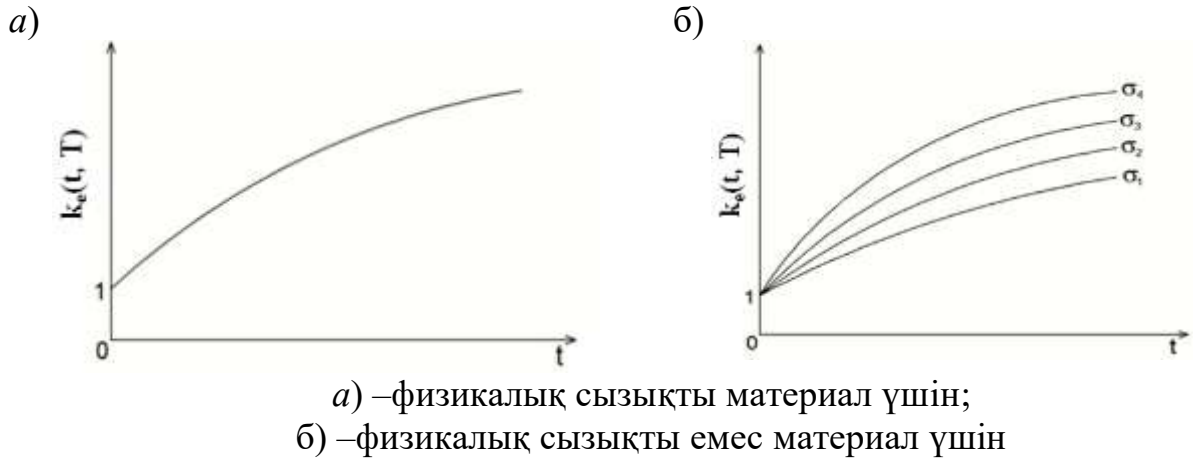
1. Жылжымалылықтың тәжірибелік реологиялық параметр деп аталатын, жаңа параметр енгізілді [38, p. 6-7]:

$$k_e(t, \sigma_\xi, T) = \frac{\varepsilon_e(t, \sigma_\xi, T)}{\varepsilon_0^e(\sigma_\xi, T)}, \quad (1.23)$$

Жылжымалылықтың тәжірибелік реологиялық параметрі, $k_e(t, \sigma, T)$ - тәжірибе жүзінде алынған шартты лездік деформацияға қатысты қалыпқа келтірілген уақыт функциясы. Ол $t=0$ уақытында 1-ге тең және $t>0$ уақытында 1-ден үлкен. Бұл әр түрлі уақыттарындағы жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндерінен шартты лездік деформацияға қатысты бірнеше есе үлкен болатынын көрсететін тәжірибелік мәндер.

2. Тәжірибелік реологиялық параметрінің $k_e(t, T)$ мәні әр түрлі уақыттар t мен кернеулерде σ есептелінеді. Есептеулер нәтижесі бойынша әр түрлі

кернеулерде σ , $k_e(t, T)$ графиктері тұрғызылады. Материалдың физикалық сызықтығы үшін әр түрлі кернеулеріндегі $k_e(t, T)$ қисықтарының барлығы бір-бірімен сәйкес келеді (сурет 1.5, а) (мысалы, [21] жұмысында), яғни барлық кернеулер үшін бір ғана қисығы $k_e(t, T)$ бар болады. Материалдың физикалық сызықты еместігі үшін әрбір кернеулерде өзінің $k_e(t, T)$ қисықтары бар болады (сурет 1.5, б).



Сурет 1.5 - Әр түрлі кернеулердегі σ , тәжірибелік реологиялық параметрінің $k_e(t, T)$ қисықтары [38]

(1.9) - (1.11) қатынастарын талдаудан, барлық параметрлер жиынтығының мәндерін табуда анықтауыш қатынасы бір ғана сипаттамаға ие емес. Жылжымалылық қисығының үш типі болуы мүмкін.

I. Егер $k_e(t, T)$ практикалық түрде кернеу шамаларынан тәуелді болмаса, онда (1.9) және (1.10) мына түрдегі бір ғана шешімге ие болады:

$$\alpha(T) = const; \quad \delta(T) = const. \quad (1.24)$$

Бұл жағдайда жылжымалылық қисығы ұқсас болады.

II. Егер $k_e(t, \sigma_\xi)$ ($\xi = 1 - n$) кернеу шамаларынан σ_ξ тәуелді болса, онда (1.9) және (1.10) тендеулерінің $n+1$ шешімі бар болады:

$$\alpha(\sigma_\xi, T) = const; \quad \delta(\sigma_\xi, T) = const, \quad (1.25)$$

$$\alpha(\bar{k}_e, T) = const; \quad \delta(\bar{k}_e, T) = const, \quad (1.26)$$

мұндағы

$$\bar{k}_e(t, T) = \frac{1}{n} \sum_{\xi=1}^n k_e(t, \sigma_\xi, T). \quad (1.27)$$

Бұл орташа тәжірибелік реологиялық параметрінің, $\bar{k}_e(t, T)$ мәндері келесі шартты қанағаттандыру керек:

$$\left| \frac{\bar{k}_e(t, \sigma) - k_e(t, \sigma)}{k_e(t, \sigma)} \right| \leq 10 \%. \quad (1.28)$$

Егер тікелей жылжымалылықта оларды бір параметрлер жиынымен сипаттауға болатын болса, бұл жағдайда жылжымалылық қисықтарын шамамен ұқсас деп аламыз.

III. Егер тікелей жылжымалылықта оларды бір параметрлер жиынымен сипаттауға болмайтын болса, яғни жылжымалылық қисықтары бір бірімен өзара ұқсас емес. Онда жылжымалылықтың есептелген (модельдік) реологиялық параметрі келесі формуламен анықталады:

$$k_m(t, T) = 1 + \frac{\delta}{1 - \alpha} t^{1 - \alpha}, \quad (1.29)$$

мұндағы $\alpha(T) \in (0, 1)$; $\delta(T) > 0$, $t \in [0, t_1]$.

Ұқсастық коэффициенті бойынша (1.29) өрнек келесі формуламен сипатталады:

$$k_m(t_s, T) = 1 + \frac{\delta}{1 - \alpha} t_s^{1 - \alpha}, \quad (1.30)$$

мұндағы $t_s \in [0, t_1]$.

Жоғарыда айтылғандай, материалдың физикалық сызықты еместігін (сызықтығын) бағалаудың көрнекі әдісі изохронды жылжымалылық қисықтарын салу болып табылады. Осылайша, біз материалдар деформациясының сызықты еместігін (сызықтығын) көрнекі бағалаудың екі әдісіне ие болдық: біріншісі – жылжымалылықтың тәжірибелік реологиялық параметрі $k_e(t, T)$ арқылы; екіншісі – изохронды жылжымалылық қисықтарын тұрғызу арқылы.

3. Жоғарыда айтылған әдістерді қолдана отырып, Абель функциясын (1.4) немесе Ю.Н. Работновтың бөлшек-экспоненциалды функциясын (1.16) пайдаланып, сәйкесті кернеулердегі жылжымалылық параметрлерінің α , δ , ε_0^m , β және λ мәндерін табамыз.

4. $\sigma = const$ және $T = const$ болғанда, үлгілерді созуға сынауда (1.2) интегралдық теңдеуден келесі теңдеуді аламыз:

$$\varepsilon(t) = \psi(\sigma) \left[1 + \int_0^t K(t - \tau) d\tau \right]. \quad (1.31)$$

Бұл интегралдық теңдеудің оң жақ бөлігін $k_m(t, T)$ арқылы белгілейміз:

$$k_m(t, T) = 1 + \int_0^t K(t - \tau) d\tau, \quad (1.32)$$

оны модельдік (теориялық немесе есептелген) реологиялық параметр деп атаймыз.

(1.32) теңдеуінен көріп отырғанымыздай, модельдік реологиялық параметр $k_m(t, T)$ тек t уақытына ғана тәуелді. Тәжірибелік реологиялық параметрі модельдік реологиялық параметріне ұқсас, ол да $t=0$ уақытында 1-ге тең болады, ал $t>0$ уақыттарында 1-ден үлкен болады.

5. Енді әр түрлі кернеулердегі σ шартты лездік деформация мәндерін келесі формула бойынша анықтаймыз:

$$\varepsilon_0^m(\sigma_\xi, T) = \frac{1}{m} \sum_{s=1}^m \frac{\varepsilon_e(t_s, \sigma_\xi, T)}{k_m(t_s, T)}, \quad (1.33)$$

мұндағы $\varepsilon_e(t)$ - материалдың жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері.

Әрі қарай, әр түрлі кернеулердегі жылжымалылық деформациясының есептелген мәні келесі формуламен есептеледі:

$$\varepsilon_m(t, \sigma, T) = \varepsilon_0^m(\sigma_\xi, T) \cdot k_m(t, T). \quad (1.34)$$

1.4 Реономды материалдардың жылжымалылығын Абель ядросымен компьютерлік модельдеу

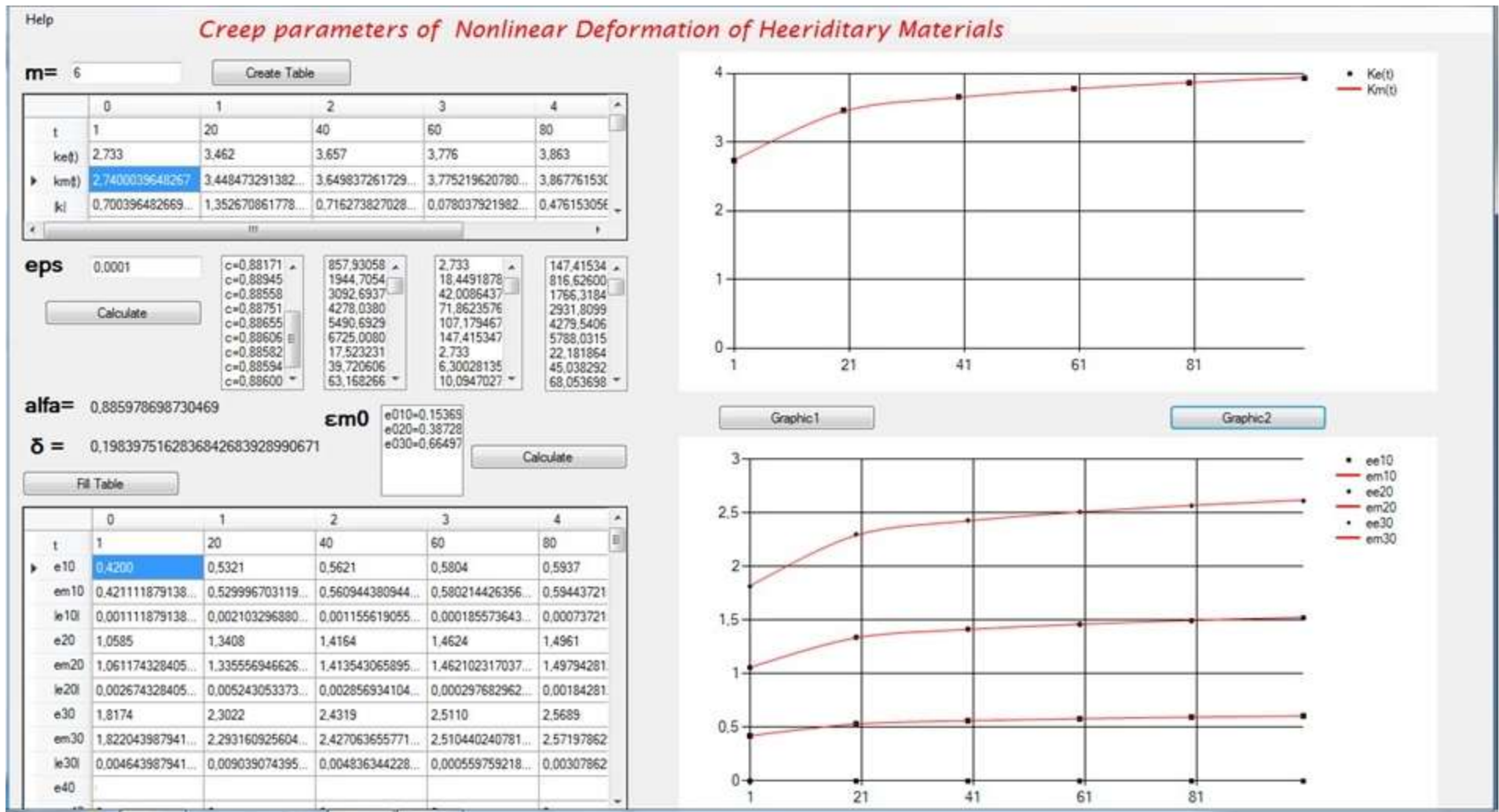
Жоғарыда айтылғандай, реономды материалдардың жылжымалылық процесі Ю.Н. Работновтың сызықтық емес интегралдық теңдеуімен, жылжымалылық ядросы Работновтың бөлшек-экспоненциалды функциясымен немесе Абель функциясымен сипатталады. Материалдардың жылжымалылық процесін сипаттауда компьютерлік бағдарламалауға қолайлы Абель ядросы таңдалды. Абель ядросының параметрлерін (α, δ) анықтаудың жаңа тиімді әдісі жоғарыда ұсынылды. Онда α параметрін анықтау үшін жуықтау әдісінің бірі – бисекция әдісі қолданылды. Бисекция әдісімен ізделінетін функцияның мәнін анықтауда уақытты үнемдеу қажеттілігі туындады. Сондықтан жоғарыда сипатталған бисекция әдісімен Абель ядросының α және δ параметрлерін, реономды материалдардың шартты лездік деформациясы мен жылжымалылық деформациясын санауға арналған Visual C# бағдарламалау тілінде [89] қолданбалы бағдарламалық жасақтама әзірленді. Бұл қолданбалы бағдарлама реономды материалдардың жылжымалылық ядросының параметрлерін оңай анықтай алатын, жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндерін енгізе отырып, шартты лездік деформациясы мен жылжымалылық деформациясын санап, есептелген мәндері арқылы материалдың

жылжымалылық қисығын оңай тұрғызуға мүмкіндік беретін ыңғайлы бағдарламалау ортасы.

Әзірленген бағдарлама интерфейсіне материалдың жылжымалылық қисығының бастапқы жылжымалылық кезіндегі деформацияның тәжірибелік мәндерін енгізу арқылы орындалады. Реономды материалдардың сызықты емес деформациялануын сипаттау алгоритмін қолдана отырып, компьютерлік бағдарлама көмегімен Абель ядросының параметрлерін (α , δ) және жылжымалылық деформациясының модельдік (теориялық, есептелген) мәндерін есептеу үшін келесі қадамдар орындалады:

1. бағдарламаға жылжымалылық деформациясының тәжірибелік реологиялық параметрінің $k_e(t_i, T)$ мәндерінің сәйкесті жалпы саны m енгізіледі;
2. әрі қарай бағдарлама кестесіне $t > 0$ уақыттарындағы t_s мәндері және сәйкесті (1.23) формуласынан (жылжымалылық қисығының шарттарын ескерумен) тәжірибелік реологиялық параметрінің $k_e(t, \sigma, T)$ мәндері, α параметрін анықтау үшін (1.12) өрнекті қанағаттандыратын дәлдік $\bar{\varepsilon}$ енгізіледі;
3. бағдарламада α параметрін $(0, 1)$ интервалындағы мәнге ие болатын бисекция әдісімен саналатын (1.12) функцияның мәні анықталады;
4. бағдарламада Абель ядросының δ параметрінің мәні (1.10) формуламен есептелінеді;
5. есептелген (модельдік) реологиялық параметрдің $k_m(t)$ мәні (1.29) немесе (1.30) формуламен есептелінеді.
6. әр кернеулердегі σ шартты лездік деформация мәні (1.33) теңдеуімен есептелінеді;
7. бағдарламада әр түрлі кернеулердегі σ жылжымалылық деформациясының есептелген мәндері (1.34) өрнекпен анықталады.

Бағдарлама көмегімен реономды материалдардың жылжымалылығының Абель ядросының параметрлері α және δ , шартты лездік деформация мен жылжымалылық деформация мәндерін оңай есептеуге болады. Жоғарыдағы алгоритмге сәйкес компьютерлік бағдарлама көмегімен орындалуының мысалы ретінде, нейлон 6 материалының жылжымалылық параметрлері мен шартты лездік деформация мәндері, сонымен бірге жылжымалылық деформациясының мәндерінің есептелуі 1.6-суретте көрсетілген.



● – тәжірибелік нүктелер; — - есептелген нүктелер;
 1 – 5 МПа; 2 – 10 МПа; 3 - 15 МПа

Сурет 1.6 – Бағдарламалау ортасындағы Нейлон 6 материалының әр түрлі кернеулердегі жылжымалылығы

1.5 Ұсынылған әдістер мен әзірленген бағдарламаны қолдану мысалдары

1.5.1 Нейлон 6 материалы

[16, 17] жұмыстарында нейлон 6 материалының 5, 10 және 15 МПа кернеулердегі бақылау нәтижелері келтірілген. Барлық кернеулер үшін тәжірибелік уақыт ұзақтығы 100 сағатты құрайды. Тәжірибе нәтижелерін өңдеуден алынған, нейлон 6 материалының көрсетілген кернеулердегі жылжымалылық деформациясының мәні 1.1-кестеде келтірілген.

Кесте 1.1 - Нейлон 6 материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері

Уақыт t, сағ	Кернеуіндегі σ , МПа, деформация $\varepsilon_e(t)$, %		
	5	10	15
0	0,1537	0,3873	0,6650
1	0,4200	1,0585	1,8174
20	0,5321	1,3408	2,3022
40	0,5621	1,4164	2,4319
60	0,5804	1,4624	2,5110
80	0,5937	1,4961	2,5689
100	0,6043	1,5229	2,6148

Нейлон 6 материалының шартты лездік қисығы дәрежелік функциямен жуықталады [35, p. 3]:

$$\psi(\sigma) = \left(\frac{\sigma}{19,0371} \right)^{1,3334} \quad (1.35)$$

Работновтың бөлшек-экспоненциалды ядросын қолдана отырып, ең кіші кернеуіндегі ($\sigma=5$ МПа) жылжымалылық деформациясының мәндерін жуықтауынан жылжымалылық параметрінің келесі мәндері табылды [38, p. 8]: $\alpha = 0,85$; $\varepsilon_0 = 0,1682$; $\beta = 0,18$ және $\lambda = 1,6682$.

Сонда нейлон 6 материалының $\sigma=5$ МПа кернеуіндегі жылжымалылық қисығы мына теңдеумен сипатталады:

$$\varepsilon_m(t) = 0,1682 \left[1 + 1,6682 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-0,18)^n t^{0,15(1+n)}}{\Gamma[0,15(1+n)+1]} \right]. \quad (1.36)$$

(1.35) теңдеуінен $\sigma=5$ МПа болғанда, шартты лездік деформация мәні $\varepsilon_0^m = 0,1682$ % тең. Осыны ескере отырып, есептелген (модельдік) реологиялық параметрі келесі теңдеумен анықталады:

$$k_m(t) = \frac{\varepsilon_m(t)}{\varepsilon_0^m} = 1 + 1,6682 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-0,18)^n t^{0,15(1+n)}}{\Gamma[0,15(1+n)+1]} \quad (1.37)$$

Әрі қарай (1.34) формула бойынша жылжымалылық деформациясының 10 және 15 МПа кернеулеріндегі мәндерін есептеуге болады. Осы кернеулердегі (1.35) формула бойынша табылған шартты лездік деформация мәндері сәйкесті 0,4238 % және 0,7277 % тең.

Келесі нейлон 6 материалының 5, 10 және 15 МПа кернеулеріндегі жылжымалылығының шартты лездік деформациясы мен жылжымалылық деформациясының мәндерін және олардың жылжымалылық қисықтарын әзірленген бағдарлама көмегімен орындайық.

Нейлон 6 материалының деформациясының сызықты (сызықты емес) екенін бағалауда жылжымалылықтың тәжірибелік реологиялық параметр $k_e(t)$ әдісін қолданайық [38]. Әдіс бойынша нейлон 6 материалының 5, 10 және 15 МПа кернеулеріндегі және берілген уақыттарындағы t реологиялық параметрдің $k_e(t)$ тәжірибелік мәні (1.23) формула бойынша анықталады. Табылған нәтижелердің үш кернеулеріндегі реологиялық параметрлердің тәжірибелік мәндері 1.2-кестеде келтірілген.

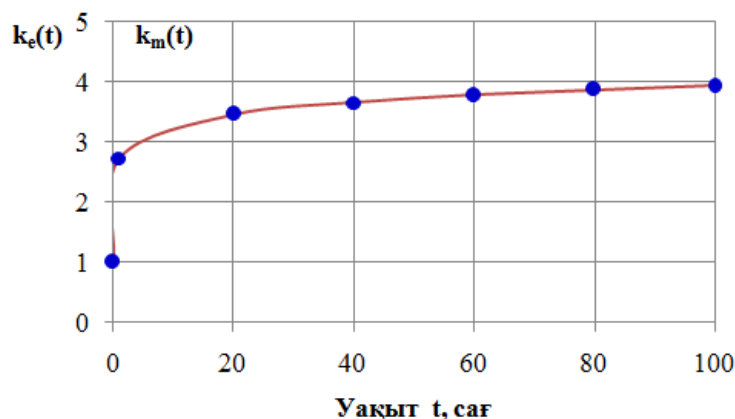
Кесте 1.2 - Нейлон 6 материалының реологиялық параметрінің тәжірибелік мәндері

Уақыт t , сағ	Кернеуіндегі σ , МПа, тәжірибелік реологиялық параметр мәні $k_e(t)$		
	5	10	15
0	1	1	1
1	2,7326	2,7330	2,7329
20	3,4619	3,4619	3,4620
40	3,6571	3,6571	3,6570
60	3,7762	3,7759	3,7759
80	3,8627	3,8629	3,8630
100	3,9317	3,9321	3,9320

1.2-кестедегі тәжірибелік реологиялық параметрінің мәндерінен барлық кернеулер үшін бір ғана қисығы болатынын көруге болады. Нейлон 6 материалының белгіленген $t > 0$ уақыттарындағы t_s мәндері мен сәйкесті $\sigma_1 = 5$ МПа кернеуіндегі тәжірибелік реологиялық параметр мәндерін, $k_e(t)$ әзірленген бағдарлама интерфейсіне енгіземіз. Берілгендер енгізілгеннен кейін, бағдарламаның орындалуынан нейлон 6 материалының 5, 10 және 15 МПа кернеулеріндегі жылжымалылық деформациясының шартты лездік деформациясы мен олардың жылжымалылық деформациясының саналған мәндері және сәйкесті жылжымалылық қисықтары көрсетілді (сурет 1.6).

Бағдарламадан нейлон 6 материалының жылжымалылық ядросы параметрлерінің келесі мәндері анықталды [68, p. 70]: $\alpha = 0,8860$; $\delta = 0,1984$.

1.7-суретте, $\sigma_1 = 5 \text{ МПа}$ кернеуіндегі тәжірибелік реологиялық параметрінің мәндері мен модельдік реологиялық параметрінің графигі көрсетілген. Көріп отырғанымыздай, тәжірибелік және модельдік реологиялық параметрі жоғары деңгейде сәйкес келеді. Ең үлкен ауытқу 0,26 % тең.



- – тәжірибелік реологиялық параметрлер мәндері, $k_e(t)$;
- - есептелген реологиялық параметрлер мәндері, $k_m(t)$

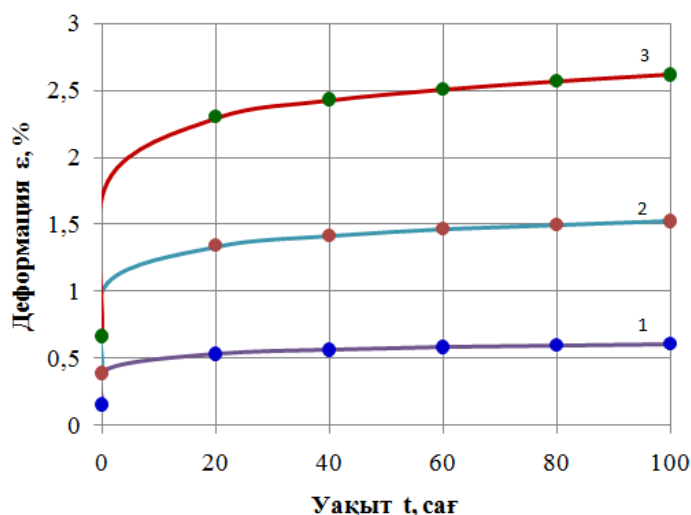
Сурет 1.7 - Нейлон 6 материалының тәжірибелік және модельдік реологиялық параметрлері [68, p.71]

Барлық үш кернеудегі нейлон 6 материалының жылжымалылық деформациясының бағдарлама бойынша есептелген мәндері 1.3-кестеде келтірілген.

Кесте 1.3 - Нейлон 6 материалының жылжымалылық деформациясының есептелген мәндері

Уақыт t, сағ	Кернеуіндегі σ , МПа, деформация $\varepsilon_m(t)$, %		
	5	10	15
0	0,1537	0,3873	0,6650
1	0,4211	1,0612	1,8220
20	0,5300	1,3356	2,2932
40	0,5609	1,4135	2,4271
60	0,5802	1,4621	2,5104
80	0,5944	1,4979	2,5720
100	0,6058	1,5266	2,6211

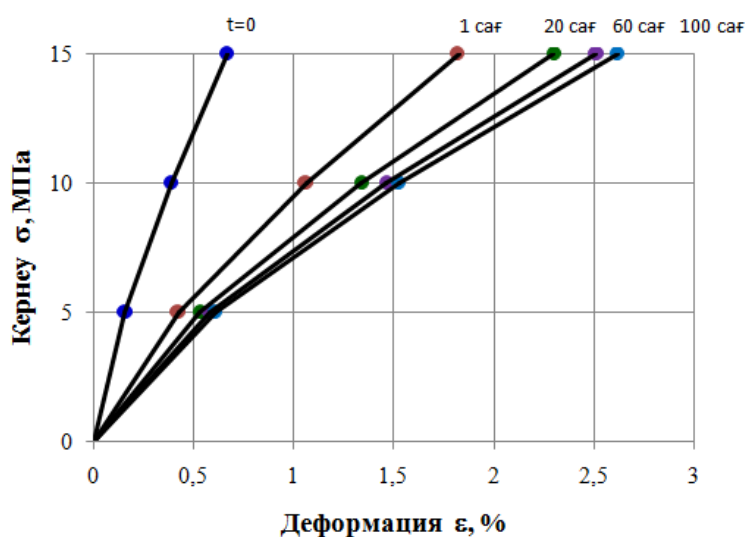
5, 10 және 15 МПа кернеулеріндегі нейлон 6 материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік және есептелген мәндері 1.8-суретте көрсетілген. Көріп отырғанымыздай, есептелген деформация мәндері мен тәжірибелік деформация мәндері арасындағы сәйкестік жақсы.



● – тәжірибелік нүктелер; – - есептелген нүктелер;
1 – 5 МПа; 2 – 10 МПа; 3 – 15 МПа

Сурет 1.8 - Нейлон 6 материалының әр түрлі кернеулердегі жылжымалылық қисықтары [68, р. 71]

Нейлон 6 материалының жылжымалылық деформациясының 1.1-кестедегі тәжірибелік мәндері мен 1.3-кестедегі есептелген мәндерінен изохронды жылжымалылық қисықтары тұрғызылды (сурет 1.9).



● – тәжірибелік нүктелер; – - есептелген нүктелер

Сурет 1.9 - Нейлон 6 материалының изохронды жылжымалылық қисықтары

1.5.2 ТС 8/3-250 шыныпластик материалы

[13, 14] жұмыстарында ТС 8/3-250 шыныпластик үлгілері $23,5 \pm 2^\circ\text{C}$ температурада жылжымалылыққа сыналған. Шыныпластик анизотропты материал болғандықтан, үлгілер материалдың негізіне перпендикуляр ($\Theta = 0^\circ$), материалдың негізіне ен бойымен ($\Theta = 90^\circ$) және материал негізіне $\Theta = 45^\circ$ бұрыш жасай кесілген.

ТС 8/3-250 шыныпластик материалының ($\Theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері сәйкесті 1.4-1.6 кестелерде келтірілген.

Кесте 1.4 - ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta = 0^\circ$) материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері

Уақыт t, сағ	Кернеуіндегі σ , МПа, деформация $\varepsilon_e(t)$, %					
	40,1	80,2	120,3	160,4	200,5	240,6
0	0,1822	0,3855	0,6140	0,8987	1,2111	1,5219
1	0,1948	0,4121	0,6564	0,9608	1,2948	1,6271
100	0,2051	0,4339	0,6911	1,0116	1,3632	1,7131
200	0,2068	0,4375	0,6968	1,0199	1,3745	1,7272
400	0,2085	0,4411	0,7026	1,0284	1,3859	1,7415
600	0,2095	0,4433	0,7060	1,0334	1,3926	1,7500
800	0,2102	0,4447	0,7083	1,0367	1,3971	1,7557
1000	0,2107	0,4458	0,7100	1,0392	1,4004	1,7598
1368	0,2115	0,4474	0,7127	1,0431	1,4057	1,7665

Кесте 1.5 - ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta = 45^\circ$) материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері

Уақыт t, сағ	Кернеуіндегі σ , МПа, деформация $\varepsilon_e(t)$, %					
	20,3	40,6	60,9	81,2	101,5	121,8
0	0,1260	0,1862	0,3100	0,7000	1,5500	2,9500
1	0,1302	0,1946	0,4805	1,1624	2,143	3,9262
20	0,1387	0,2359	0,6037	1,3715	2,5724	4,7291
62	0,1457	0,2629	0,6873	1,5478	2,9234	5,1951
200	0,1518	0,2755	0,7804	1,7255	3,2627	5,5489
502	0,1548	0,2826	0,8270	1,8443	3,5222	5,6608
632	0,1566	0,2848	0,8456	1,8769	3,5629	5,7160
862	0,1587	0,2871	0,8617	1,9227	3,5912	5,7715
1002	0,1598	0,2887	0,8696	1,9615	3,6132	5,8068
1320	0,1625	0,2922	0,8847	2,001	3,6401	5,8500

Кесте 1.6 - ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta = 90^\circ$) материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері

Уақыт t, сағ	Кернеуіндегі σ , МПа, деформация $\varepsilon_e(t)$, %			
	104,7	209,4	279,2	349,0
1	2	3	4	5
0	0,3478	0,6957	0,9276	1,1595
1	0,3616	0,7232	0,9643	1,2054
10	0,3668	0,7337	0,9782	1,2228

1.6 кестенің жалғасы

1	2	3	4	5
50	0,3709	0,7419	0,9892	1,2365
100	0,3728	0,7457	0,9942	1,2428
200	0,3746	0,7493	0,9991	1,2489
300	0,3757	0,7515	1,0020	1,2525
400	0,3765	0,7530	1,0040	1,2550
500	0,3771	0,7542	1,0056	1,2570

ТС 8/3-250 шыныпластик материалының кернеулеріндегі σ және берілген уақыттарындағы t тәжірибелік реологиялық параметрінің $k_e(t)$ мәндері (1.23) формула бойынша есептелді. Есептелген нәтижелердің ТС 8/3-250 шыныпластик материалының ($\Theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) әрбір деңгейлі кернеулеріндегі тәжірибелік реологиялық параметрінің мәндері сәйкесті 1.7-1.9 кестелерде келтірілген.

Кесте 1.7 - ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta = 0^\circ$) материалының реологиялық параметрінің тәжірибелік мәндері

Уақыт t , сағ	Кернеуіндегі σ , МПа, тәжірибелік реологиялық параметр мәні $k_e(t)$						Орташа мәні, $\bar{k}_e(t)$
	40,1	80,2	120,3	160,4	200,5	240,6	
0	1	1	1	1	1	1	1
1	1,0691	1,0690	1,0691	1,0691	1,0691	1,0691	1,0691
100	1,1257	1,1256	1,1256	1,1256	1,1256	1,1256	1,1256
200	1,1350	1,1349	1,1349	1,1349	1,1349	1,1349	1,1349
400	1,1443	1,1442	1,1443	1,1443	1,1443	1,1443	1,1443
600	1,1498	1,1499	1,1498	1,1499	1,1499	1,1499	1,1499
800	1,1537	1,1536	1,1536	1,1536	1,1536	1,1536	1,1536
1000	1,1564	1,1564	1,1564	1,1563	1,1563	1,1563	1,1564
1368	1,1608	1,1606	1,1607	1,1607	1,1607	1,1607	1,1607

Кесте 1.8 - ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta = 45^\circ$) материалының реологиялық параметрінің тәжірибелік мәндері

Уақыт t , сағ	Кернеуіндегі σ , МПа, тәжірибелік реологиялық параметр мәні $k_e(t)$						Орташа мәні, $\bar{k}_e(t)$
	20,3	40,6	60,9	81,2	101,5	121,8	
1	2	3	4	5	6	7	8
0	1	1	1	1	1	1	1
1	1,0333	1,0451	1,55	1,6606	1,3826	1,3309	1,3338
20	1,1008	1,2669	1,9474	1,9593	1,6596	1,6031	1,5895

1.8 кестенің жалғасы

1	2	3	4	5	6	7	8
62	1,1563	1,4119	2,2171	2,2111	1,8861	1,7611	1,7739
200	1,2048	1,4796	2,5174	2,4650	2,1050	1,8810	1,9421
502	1,2286	1,5177	2,6677	2,6347	2,2724	1,9189	2,0400
632	1,2429	1,5295	2,7277	2,6813	2,2986	1,9376	2,0696
862	1,2595	1,5419	2,7797	2,7467	2,3169	1,9564	2,1002
1002	1,2683	1,5505	2,8052	2,8021	2,3311	1,9684	2,1209
1320	1,2897	1,5693	2,8539	2,8586	2,3485	1,9831	2,1505

Кесте 1.9 - ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta = 90^\circ$) материалының реологиялық параметрінің тәжірибелік мәндері

Уақыт t, сағ	Кернеуіндегі σ , МПа, тәжірибелік реологиялық параметр мәні $k_e(t)$				Орташа мәні, $\bar{k}_e(t)$
	104,7	209,4	279,2	349	
0	1	1	1	1	1
1	1,0397	1,0395	1,0396	1,0396	1,0396
10	1,0546	1,0546	1,0545	1,0546	1,0546
50	1,0664	1,0664	1,0664	1,0664	1,0664
100	1,0719	1,0719	1,0718	1,0718	1,0718
200	1,0771	1,0770	1,0771	1,0771	1,0771
300	1,0802	1,0802	1,0802	1,0802	1,0802
400	1,0825	1,0824	1,0824	1,0824	1,0824
500	1,0842	1,0841	1,0841	1,0841	1,0841

Әрі қарай, ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta = 0^\circ$) материалының $\sigma_1 = 40,1$ МПа кернеуіндегі және ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta = 90^\circ$) материалының $\sigma_1 = 104,7$ МПа кернеуіндегі уақытқа байланысты тәжірибелік реологиялық параметр мәндерін бағдарламаға енгізе отырып, сәйкесті Абель ядросының келесі параметрлерінің мәндері анықталды [68, p. 72]:

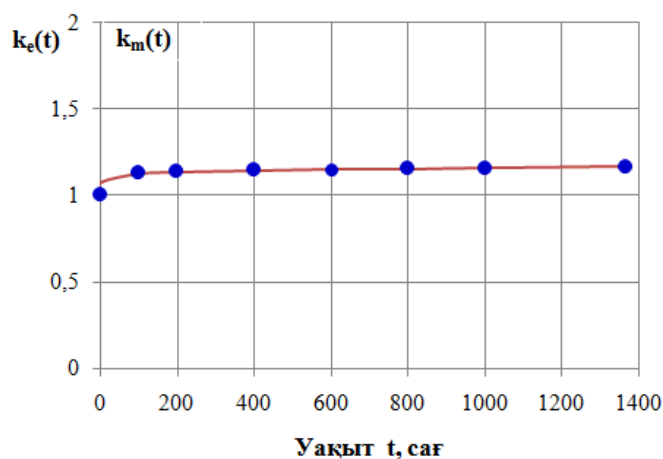
$$\Theta = 0^\circ: \alpha = 0,8863; \delta = 0,0082;$$

$$\Theta = 90^\circ: \alpha = 0,8826; \delta = 0,0048.$$

Сонымен бірге, ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta = 45^\circ$) материалының 1.8-кестеде табылған орташа тәжірибелік реологиялық параметрінің мәндерін $\bar{k}_e(t)$ компьютерлік бағдарламаға енгізіп, орындалу нәтижесінен жылжымалылық ядросының келесі параметр мәндері анықталды:

$$\Theta = 45^\circ: \alpha = 0,8384; \delta = 0,0604.$$

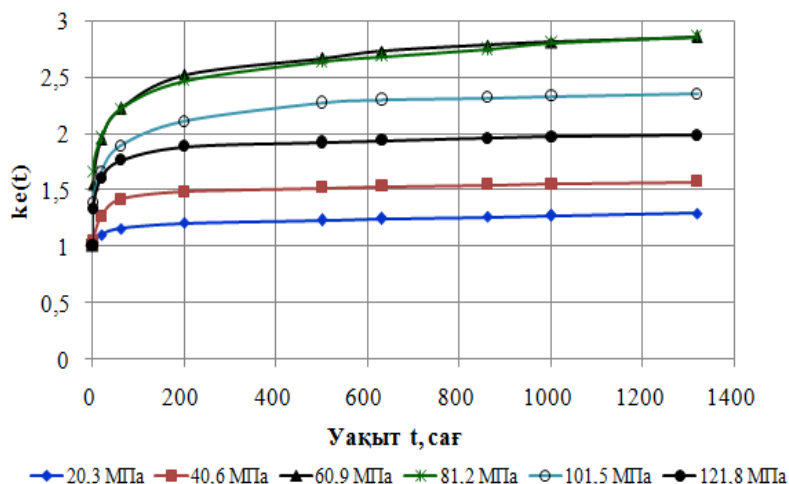
1.7-кестедегі ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta = 0^\circ$) материалының $\sigma_1 = 40,1$ МПа кернеуіндегі тәжірибелік реологиялық параметрінің мәндері мен модельдік реологиялық параметрінің графигі 1.10-суретте көрсетілген.



- – тәжірибелік реологиялық параметрлер мәндері, $k_e(t)$;
- - есептелген реологиялық параметрлер мәндері, $k_m(t)$.

Сурет 1.10 - ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta = 0^\circ$) материалының $\sigma_1 = 40,1$ МПа кернеуіндегі тәжірибелік және модельдік реологиялық параметрлері [68, р. 72]

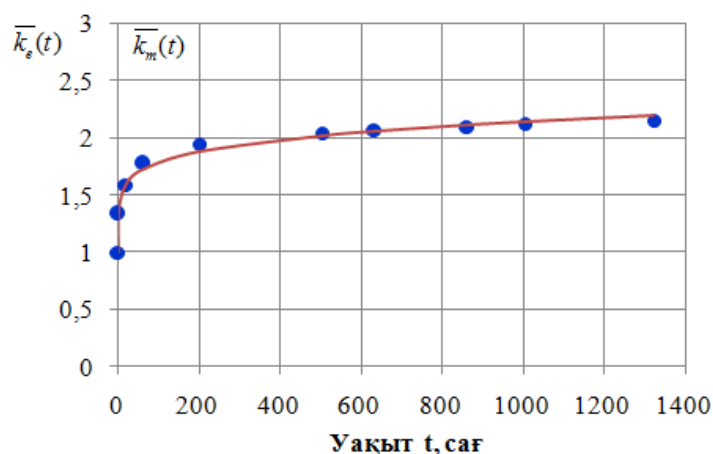
1.8-кестедегі берілгендерінен, ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta=45^\circ$) материалының әр түрлі деңгей кернеулеріндегі тәжірибелік реологиялық параметрінің, $k_e(t)$ графигі 1.11-суретте көрсетілген.



Сурет 1.11 - Әр түрлі кернеулердегі ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta = 45^\circ$) материалының тәжірибелік реологиялық параметрлер графигтері

Көріп отырғанымыздай, әрбір кернеулерде материалдың жылжымалылығының тәжірибелік реологиялық параметрлерінің қисықтары бар болады.

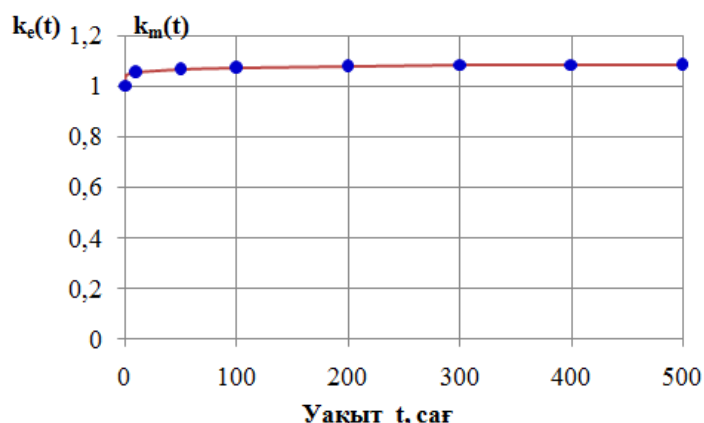
Әрі қарай, ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta = 45^\circ$) материалының 20,3; 40,6; 60,9; 81,2; 101,5 және 121,8 МПа кернеулеріндегі тәжірибелік реологиялық параметрінің орташа мәндері мен есептелген реологиялық параметрінің графигі 1.12-суретте көрсетілген.



- – орташа тәжірибелік реологиялық параметрлер мәндері, $\bar{k}_e(t)$;
- - орташа есептелген реологиялық параметрлер мәндері, $\bar{k}_m(t)$

Сурет 1.12 - ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta = 45^\circ$) материалының тәжірибелік және модельдік реологиялық параметрлері

ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta=90^\circ$) материалының $\sigma_1 = 104,7$ МПа кернеуіндегі тәжірибелік реологиялық параметрінің мәндері мен модельдік реологиялық параметрінің графигі 1.13-суретте көрсетілген.



- – тәжірибелік реологиялық параметрлер мәндері, $k_e(t)$;
- - есептелген реологиялық параметрлер мәндері, $k_m(t)$.

Сурет 1.13 - ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta = 90^\circ$) материалының $\sigma_1 = 104,7$ МПа кернеуіндегі тәжірибелік және модельдік реологиялық параметрлері [68, p. 73]

Көріп отырғанымыздай, ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta = 0^\circ$) және ($\Theta = 90^\circ$) материалының деформациялануы физикалық сызықты екенін сәйкесті 1.7-кестеден және 1.9-кестеден көруге болады. Әр түрлі деңгей кернеулерінде қисықтарының барлығы бір-бірімен сәйкес келеді. Ал, ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta= 45^\circ$) материалының 1.8-кесте бойынша әрбір кернеулеріндегі σ өзінің тәжірибелік реологиялық параметр қисықтары бар болатынын көреміз

(сурет 1.11). Материалдың деформациялануы физикалық сызықты емес екендігін көруге болады.

Бағдарлама көмегімен, ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta=0^\circ$) материалының 40,1; 80,2; 120,3; 160,4; 200,5 және 240,6 МПа кернеулеріндегі шартты лездік деформациясының сәйкесті келесі мәндері есептелді: 0,1822; 0,3855; 0,6140; 0,8987; 1,2111 және 1,5219 %.

Сондай-ақ, ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta = 0^\circ$) материалының шартты лездік қисығы мына түрде жуықталды:

$$\psi(\sigma) = 2 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma^{1,2}. \quad (1.38)$$

ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta = 45^\circ$) материалының 20,3; 40,6; 60,9; 81,2; 101,5 және 121,8 МПа кернеулеріндегі бағдарламадан табылған сәйкесті шартты лездік деформацияның мәндері мыналарға тең: 0,0803; 0,141; 0,3972; 0,8971; 1,6783 және 2,8268 %.

ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta = 45^\circ$) материалының шартты лездік қисығы келесі түрде жуықталады:

$$\psi(\sigma) = 1,1 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma^{2,2}. \quad (1.39)$$

Бағдарламадан 104,7; 209,4; 279,2 және 349,0 МПа кернеулері үшін табылған сәйкесті шартты лездік деформацияның мәндері мыналарға тең: 0,3478; 0,6957; 0,9276 және 1,1595 %.

ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta = 90^\circ$) материалының әрбір кернеулерінде σ , шартты лездік қисығы келесі түрде жуықталады:

$$\psi(\sigma) = 3 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma \quad (1.40)$$

ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) материалының жылжымалылық деформациясының есептелген мәндері сәйкесті кестелерде 1.10-1.12 келтірілген.

Кесте 1.10 - ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta=0^\circ$) материалының жылжымалылық деформациясының есептелген мәндері

Уақыт t, сағ	Кернеуіндегі σ , МПа, деформация $\varepsilon_m(t)$, %					
	40,1	80,2	120,3	160,4	200,5	240,6
1	2	3	4	5	6	7
0	0,1822	0,3855	0,6140	0,8987	1,2111	1,5219
1	0,1954	0,4133	0,6583	0,9636	1,2985	1,6318
100	0,2044	0,4325	0,6888	1,0081	1,3586	1,7073
200	0,2062	0,4363	0,6949	1,0172	1,3707	1,7225
400	0,2082	0,4405	0,7016	1,0269	1,3838	1,7390

1.10 кестенің жалғасы

1	2	3	4	5	6	7
600	0,2094	0,4431	0,7057	1,0329	1,3920	1,7492
800	0,2103	0,4450	0,7087	1,0374	1,3980	1,7568
1000	0,2111	0,4465	0,7111	1,0409	1,4028	1,7628
1368	0,2121	0,4487	0,7147	1,0461	1,4097	1,7715

Кесте 1.11 - ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta=45^\circ$) материалының жылжымалылық деформациясының есептелген мәндері

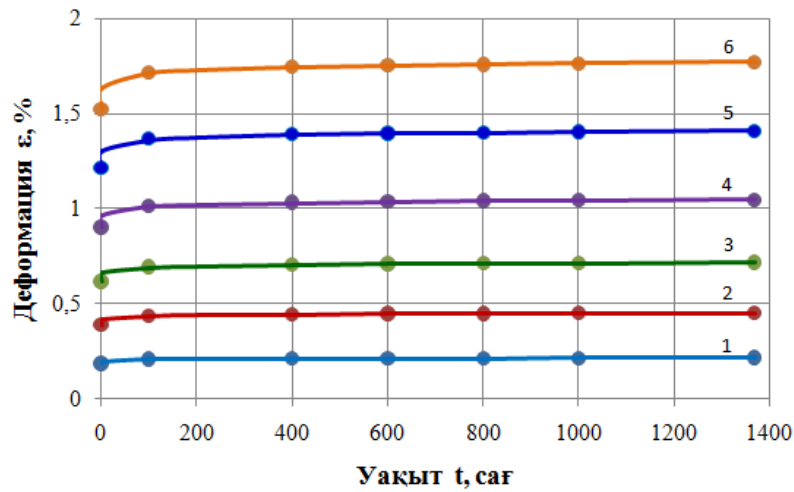
Уақыт t, сағ	Кернеуіндегі σ , МПа, деформация $\epsilon_m(t)$, %					
	20,3	40,6	60,9	81,2	101,5	121,8
0	0,0803	0,141	0,3972	0,8971	1,6783	2,8268
1	0,1103	0,1937	0,5457	1,2325	2,3058	3,8837
20	0,1290	0,2265	0,6382	1,4413	2,6965	4,5417
62	0,1387	0,2437	0,6865	1,5505	2,9007	4,8857
200	0,1509	0,2651	0,7468	1,6866	3,1553	5,3147
502	0,1623	0,2850	0,8028	1,8132	3,3922	5,7135
632	0,1654	0,2904	0,8182	1,8479	3,4571	5,8230
862	0,1697	0,2981	0,8398	1,8968	3,5486	5,9770
1002	0,1719	0,3020	0,8507	1,9214	3,5946	6,0546
1320	0,1761	0,3093	0,8714	1,9681	3,6819	6,2016

Кесте 1.12 - ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta=90^\circ$) материалының жылжымалылық деформациясының есептелген мәндері

Уақыт t, сағ	Кернеуіндегі σ , МПа, деформация $\epsilon_m(t)$, %			
	104,7	209,4	279,2	349,0
0	0,3478	0,6957	0,9276	1,1595
1	0,3621	0,7243	0,9657	1,2072
10	0,3666	0,7332	0,9776	1,2220
50	0,3705	0,7410	0,9880	1,2350
100	0,3724	0,7448	0,9931	1,2414
200	0,3745	0,7490	0,9987	1,2483
300	0,3758	0,7516	1,0021	1,2527
400	0,3767	0,7535	1,0047	1,2559
500	0,3775	0,7551	1,0067	1,2584

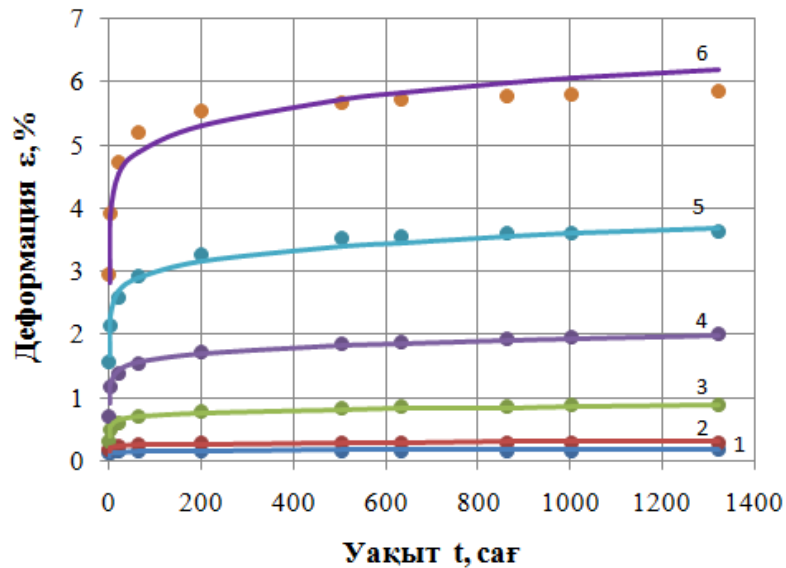
ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) материалының жылжымалылық деформациясының 1.4-1.6 кестелеріндегі тәжірибелік мәндері мен 1.10-1.12 кестелеріндегі есептелген мәндерінен сәйкесті жылжымалылық қисықтары

тұрғызылды (суреттер 1.14-1.16) [68, р. 73-74]. Сонымен бірге, изохронды жылжымалылық қисықтары суреттерде 1.17-1.19 көрсетілген.



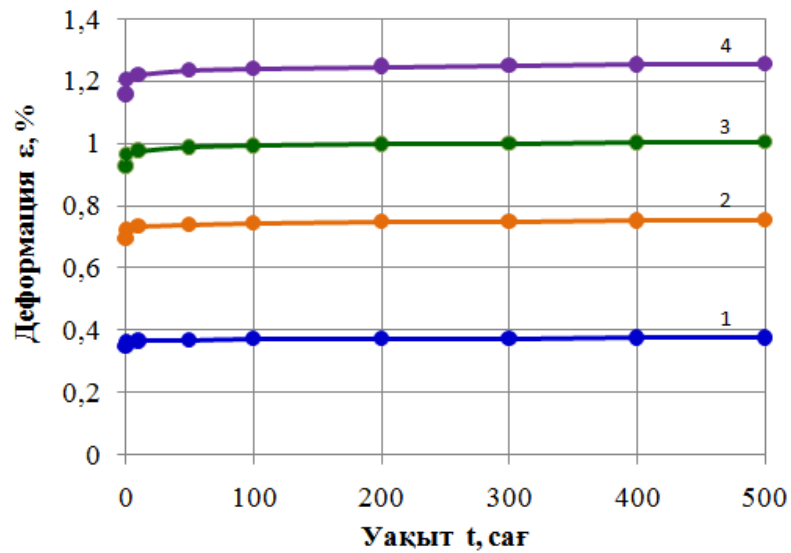
● – тәжірибелік нүктелер; – - есептелген нүктелер;
 1 – 40,1 МПа; 2 – 80,2 МПа; 3 – 120,3 МПа; 4 – 160,4 МПа;
 5 – 200,5 МПа; 6 – 240,6 МПа

Сурет 1.14 - ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta=0^\circ$) материалының әр түрлі кернеулердегі жылжымалылық қисықтары



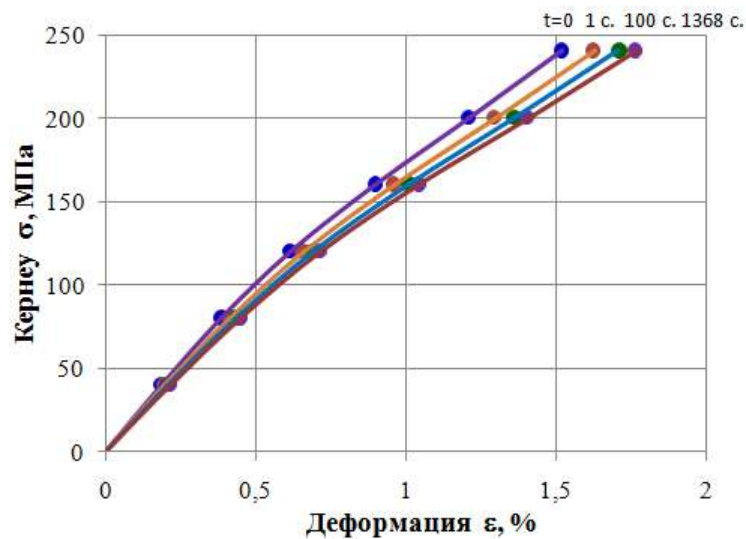
● – тәжірибелік нүктелер; – - есептелген нүктелер;
 1 – 20,3 МПа; 2 – 40,6 МПа; 3 – 60,9 МПа; 4 – 81,2 МПа;
 5 – 101,5 МПа; 6 – 121,8 МПа

Сурет 1.15 - Әр түрлі кернеулердегі ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta=45^\circ$) материалының жылжымалылық қисықтары



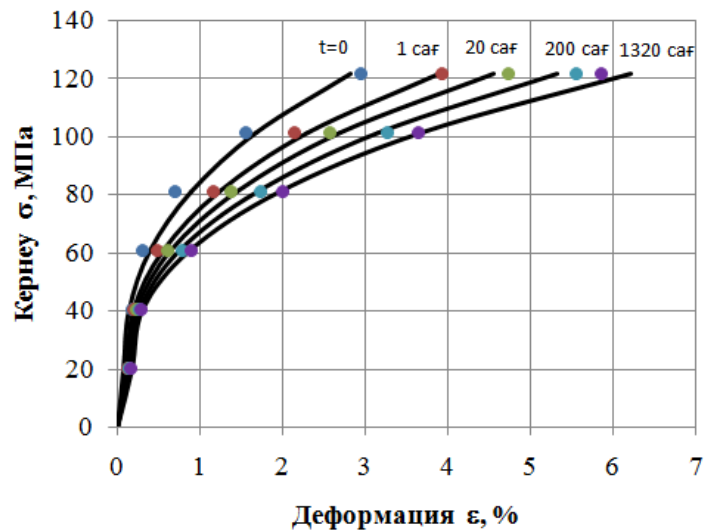
● – тәжірибелік нүктелер; – - есептелген нүктелер;
 1 – 104,7 МПа; 2 – 209,4 МПа; 3 – 279,2 МПа; 4 – 349,0 МПа

Сурет 1.16 - Әр түрлі кернеулердегі ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta=90^\circ$) материалының жылжымалылық қисықтары



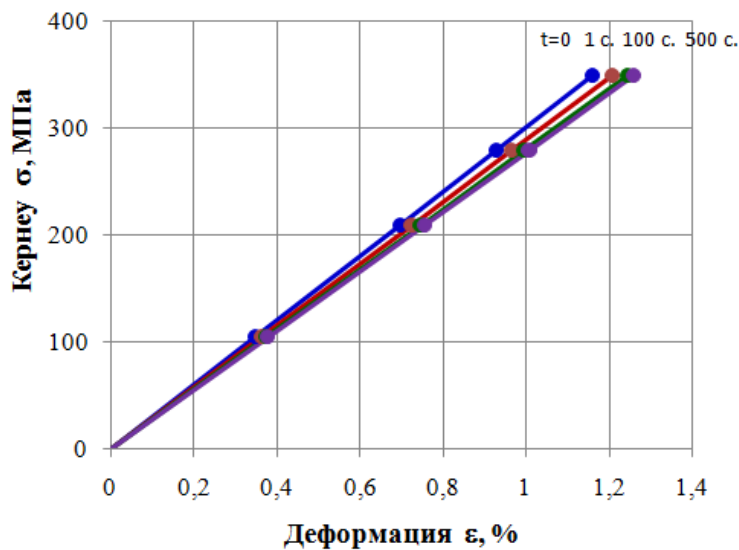
● – тәжірибелік нүктелер; – - есептелген нүктелер

Сурет 1.17 - ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta=0^\circ$) материалының изохронды жылжымалылық қисықтары



● – тәжірибелік нүктелер; – - есептелген нүктелер

Сурет 1.18 - ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta=45^\circ$) материалының изохронды жылжымалылық қисықтары



● – тәжірибелік нүктелер; – - есептелген нүктелер

Сурет 1.19 - ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta=90^\circ$) материалының изохронды жылжымалылық қисықтары

Құрылған графиктерді талдаудан, олардағы есептелген қисықтары сәйкесті тәжірибелік мәндерімен жоғары деңгейде сәйкес келетінін көрсетеді.

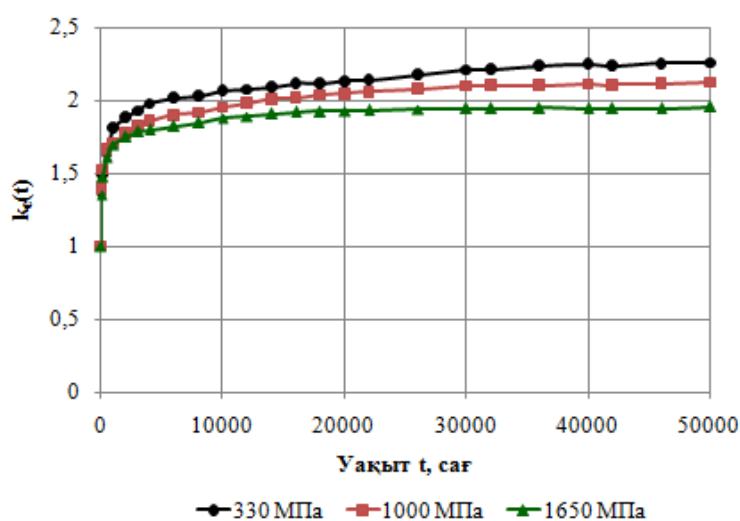
1.5.3 СВМ арамидтік талшығы

[19, p. 274-275] жұмысында СВМ арамидтік талшығы 330, 1000 және 1650 МПа кернеулерінде $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$ температурада жылжымалылыққа сыналған. Барлық кернеулерде тәжірибе ұзақтығы 50000 сағатты (5 жыл 7 айды) құрайды. СВМ арамидтік талшығының үш кернеуіндегі жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері 1.13-кестеде келтірілген.

Кесте 1.13 - СВМ арамидтік талшығының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері

Уақыт t, сағ	Кернеуіндегі σ , МПа, деформация $\varepsilon_e(t)$, %		
	330	1000	1650
0	0,2589	0,7711	1,3127
10	0,3544	1,0739	1,7720
100	0,3870	1,1727	1,9349
1000	0,4680	1,3140	2,2249
2000	0,4871	1,3686	2,2924
4000	0,5116	1,4313	2,3591
6000	0,5215	1,4637	2,3945
8000	0,5210	1,4739	2,4272
10000	0,5342	1,5054	2,4642
14000	0,5365	1,5485	2,4998
16000	0,5481	1,5555	2,5192
20000	0,5559	1,5767	2,5267
26000	0,5630	1,5930	2,5454
30000	0,5718	1,6167	2,5504
36000	0,5799	1,6196	2,5554
40000	0,5816	1,6261	2,5535
46000	0,5833	1,6282	2,5543
50000	0,5845	1,6343	2,5695

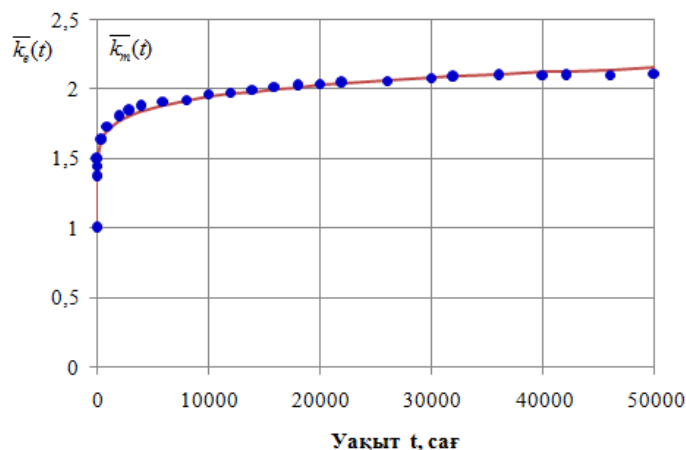
1.13-кестедегі берілгендерінен, (1.23) өрнекті ескере отырып, СВМ арамидтік талшығы материалының әр түрлі деңгей кернеулеріндегі тәжірибелік реологиялық параметрінің графигі 1.20-суретте көрсетілген.



Сурет 1.20 - СВМ арамидтік талшығының әр түрлі кернеулердегі тәжірибелік реологиялық параметрлері

Бағдарлама көмегімен, жылжымалылық ядросының келесі мәндері анықталды: $\alpha = 0,8745$; $\delta = 0,0372$.

1.21-суретте СВМ арамидтік талшығы материалының тәжірибелік реологиялық параметрінің орташа мәндері мен модельдік реологиялық параметрінің орташа мәндерінің графиктері көрсетілген. Көріп отырғанымыздай, тәжірибелік және модельдік реологиялық параметрі арасындағы сәйкестік жақсы. Ең үлкен ауытқу 2,14 % құрайды.



- – орташа тәжірибелік реологиялық параметрлер мәндері, $\bar{k}_e(t)$;
- - орташа есептелген реологиялық параметрлер мәндері, $\bar{k}_m(t)$

Сурет 1.21 - СВМ арамидтік талшығының тәжірибелік және модельдік реологиялық параметрлері

Сондай-ақ, материалдың шартты лездік деформация қисығы мына түрде жуықталады:

$$\psi(\sigma) = 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma. \quad (1.41)$$

Бағдарламадан 330, 1000 және 1650 МПа кернеулеріндегі СВМ арамидтік талшығы материалының шартты лездік деформацияның сәйкесті келесі мәндері анықталды: $\varepsilon_0^m = 0,2706$ %; 0,7724 % және 1,2510 %.

Барлық үш кернеудегі СВМ арамидтік талшығының жылжымалылық деформациясының есептелген мәндері 1.14-кестеде келтірілген.

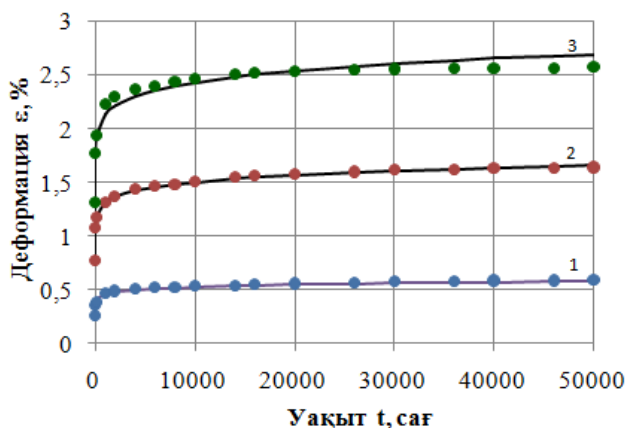
Кесте 1.14 - СВМ арамидтік талшығының жылжымалылық деформациясының есептелген мәні

Уақыт t, сағ	Кернеуіндегі σ , МПа, деформация $\varepsilon_m(t)$, %		
	330	1000	1650
1	2	3	4
0	0,2706	0,7724	1,2510
10	0,3777	1,0781	1,7461
100	0,4136	1,1806	1,9121

1.14 кестенің жалғасы

1	2	3	4
1000	0,4615	1,3174	2,1337
2000	0,4788	1,3669	2,2139
4000	0,4978	1,4210	2,3015
6000	0,5096	1,4548	2,3563
8000	0,5184	1,4799	2,3970
10000	0,5255	1,5000	2,4295
14000	0,5365	1,5314	2,4804
16000	0,5410	1,5442	2,5011
20000	0,5487	1,5662	2,5367
26000	0,558	1,5927	2,5797
30000	0,5632	1,6076	2,6038
36000	0,5699	1,6270	2,6351
40000	0,5739	1,6383	2,6535
46000	0,5793	1,6537	2,6784
50000	0,5826	1,6629	2,6934

330, 1000 және 1650 МПа кернеулерінде СВМ арамидтік талшығының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік және есептелген мәндерінің графиктері 1.22-суретте көрсетілген. Көріп отырғанымыздай, есептелген деформация мәндері мен тәжірибелік деформация мәндері арасындағы сәйкестік жақсы.

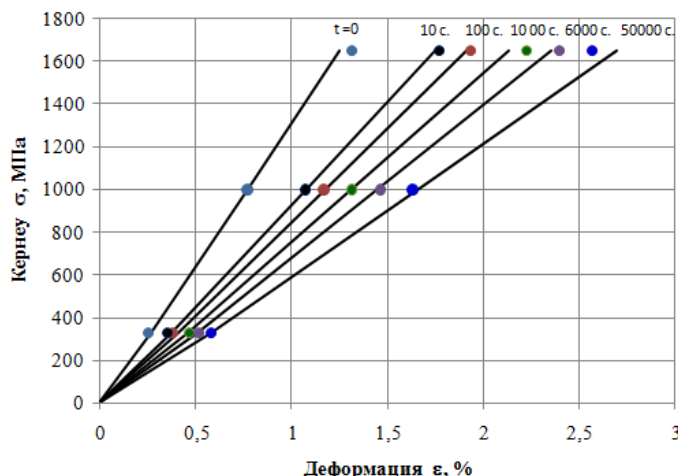


● – тәжірибелік нүктелер; — - есептелген нүктелер;
1 - 330 МПа; 2 - 1000 МПа; 3 - 1650 МПа

Сурет 1.22 - Әр түрлі кернеулердегі СВМ арамидтік талшығының жылжымалылық қисықтары

СВМ арамидтік талшығы материалының жылжымалылық деформациясының 1.13-кестедегі тәжірибелік мәндері мен 1.14-кестедегі

есептелген мәндерінен изохронды жылжымалылық қисықтары тұрғызылды (сурет 1.23).



● – тәжірибелік нүктелер; – - есептелген нүктелер

Сурет 1.23 - СВМ арамидтік талшығының изохронды жылжымалылық қисықтары

Графиктерді талдаудан көретініміз, ондағы есептелген қисықтар сәйкесті тәжірибелік берілгендерімен сәйкес келеді.

1.5.4 EDT-10 шайыры материалы

[19, p. 273-274] жұмысында EDT-10 шайыры материалына 6,8; 13,6 және 20,4 МПа кернеулерінде $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$ температурада жылжымалылыққа сынақтар жүргізілген. Барлық кернеулерде тәжірибе ұзақтығы 50000 сағатты (5 жыл 7 айды) құрайды. Берілген үш кернеулердегі EDT-10 шайыры материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері 1.15-кестеде келтірілген.

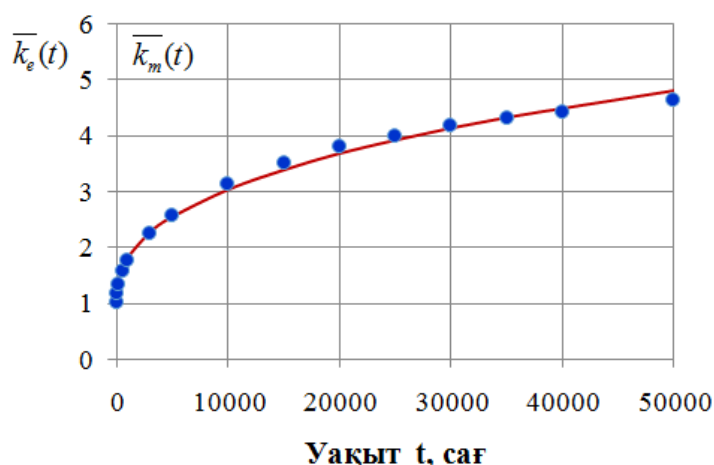
Кесте 1.15 - EDT-10 шайыры материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері

Уақыт t, сағ	Кернеуіндегі σ , МПа, деформация $\varepsilon_c(t)$, %		
	6,8	13,6	20,4
	2	3	4
0	0,2061	0,4121	0,6182
10	0,2414	0,4829	0,7243
100	0,2725	0,5451	0,8176
500	0,3222	0,6444	0,9665
1000	0,3619	0,7238	1,0858
3000	0,4605	0,9210	1,3815
5000	0,5254	1,0509	1,5763

1.15 кестенің жалғасы

1	2	3	4
10000	0,6424	1,2847	1,9271
15000	0,7223	1,4446	2,1669
20000	0,7797	1,5594	2,3391
25000	0,8230	1,6459	2,4689
30000	0,8573	1,7145	2,5718
35000	0,8857	1,7714	2,6571
40000	0,9102	1,8205	2,7307
50000	0,9519	1,9038	2,8557

Бағдарлама көмегімен, Абель ядросының келесі мәндері анықталды: $\alpha=0,6121$; $\delta=0,0222$. Тәжірибелік реологиялық параметрінің мәндері мен модельдік реологиялық параметрінің графигі 1.24-суретте көрсетілген.



- — орташа тәжірибелік реологиялық параметрлер мәндері, $\bar{k}_e(t)$;
- — орташа есептелген реологиялық параметрлер мәндері, $\bar{k}_m(t)$

Сурет 1.24 - EDT-10 шайырының тәжірибелік және модельдік реологиялық параметрлері

Бағдарламадан 6,8; 13,6 және 20,4 МПа кернеулердегі EDT-10 шайыры материалының табылған шартты лездік деформацияның сәйкесті мәндері 0,2057; 0,4115 және 0,6172 % тең.

Материалдың шартты лездік деформация қисығы мына түрде жуықталады:

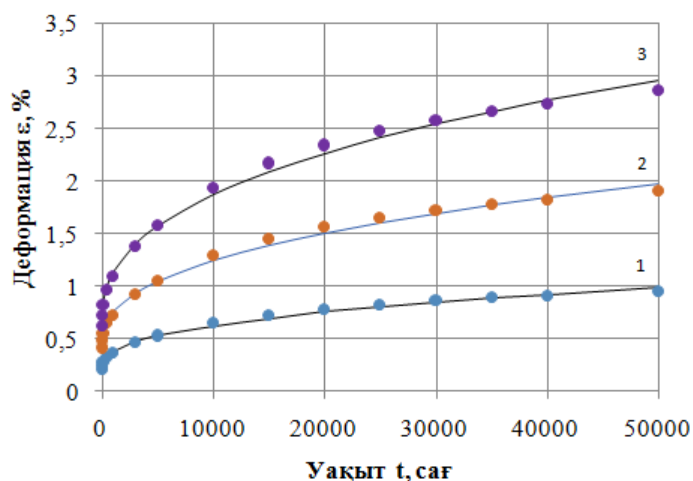
$$\psi(\sigma) = 3,02 \cdot 10^{-2} \cdot \sigma. \quad (1.42)$$

Барлық үш кернеудегі EDT-10 шайыры материалының жылжымалылық деформациясының есептелген мәндері 1.16-кестеде келтірілген.

Кесте 1.16 - EDT-10 шайырының жылжымалылық деформациясының есептелген мәндері

Уақыт t, сағ	Кернеуіндегі σ , МПа, деформация $\varepsilon_m(t)$, %		
	6,8	13,6	20,4
0	0,2057	0,4115	0,6172
10	0,2345	0,4689	0,7034
100	0,2759	0,5519	0,8278
500	0,3368	0,6736	1,0104
1000	0,3772	0,7545	1,1317
3000	0,4683	0,9367	1,4051
5000	0,5259	1,0518	1,5777
10000	0,6247	1,2494	1,8741
15000	0,6960	1,3921	2,0882
20000	0,7539	1,5079	2,2619
25000	0,8035	1,6071	2,4106
30000	0,8473	1,6947	2,5420
35000	0,8869	1,7738	2,6606
40000	0,9231	1,8462	2,7692
50000	0,9879	1,9759	2,9638

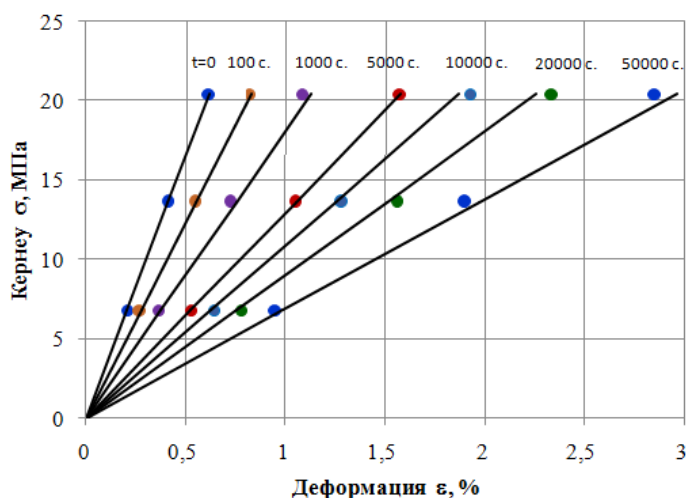
Үш кернеулердегі EDT-10 шайыры материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік (1.15-кесте) және есептелген (1.16-кесте) мәндерінен құрылған графигі 1.25-суретте көрсетілген.



● – тәжірибелік нүктелер; – - есептелген нүктелер;
1 – 6,8 МПа; 2 – 13,6 МПа; 3 – 20,4 МПа

Сурет 1.25 - Әр түрлі кернеулердегі EDT-10 шайырының жылжымалылық қисықтары

Сонымен бірге, EDT-10 шайыры материалының изохронды жылжымалылық қисықтары 1.26-суретте көрсетілген.



● – тәжірибелік нүктелер; – - есептелген нүктелер.

Сурет 1.26 - EDT-10 шайыры материалының изохронды жылжымалылық қисықтары

Көріп отырғанымыздай, EDT-10 шайыры материалының есептелген деформация мәндері мен тәжірибелік деформация мәндері арасындағы сәйкестік жақсы және изохронды жылжымалылық қисықтары түзу сызық болады.

1.5.5 Поликристалды графит материалы

[20, с. 78-79] жұмысында графиттің механикалық қасиетін ескере отырып, 2000, 2200, 2400, 2600, 2800° С температураларында әр түрлі деңгей кернеулерінде поликристалды графит материалының жылжымалылығына сынақтар жүргізілген. Сынақ нәтижелеріндегі жылжымалылық деформациясының мәндері сәйкесті 1.17-1.21 кестелерде келтірілген.

Кесте 1.17 - Поликристалды графит материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері (T=2000° C)

Уақыт t, мин	Кернеуіндегі σ , МПа, деформация $\epsilon_c(t)$, %			
	10	14	18	22
0	0,0681	0,1049	0,1504	0,2077
40	0,1105	0,1613	0,2096	0,2820
80	0,1189	0,1704	0,2251	0,3122
120	0,1232	0,1771	0,2337	0,3325
160	0,1247	0,1784	0,2383	0,3488

Кесте 1.18 - Поликристалды графит материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері (T=2200° C)

Уақыт t, мин	Кернеуіндегі σ , МПа, деформация $\varepsilon_e(t)$, %			
	10	14	18	22
0	0,0789	0,1263	0,2067	0,2382
40	0,1465	0,2228	0,2869	0,4279
80	0,1694	0,2526	0,3269	0,4862
120	0,1865	0,2675	0,3557	0,5339
160	0,1942	0,2760	0,3732	0,5684

Кесте 1.19 - Поликристалды графит материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері (T=2400° C)

Уақыт t, мин	Кернеуіндегі σ , МПа, деформация $\varepsilon_e(t)$, %			
	10	14	18	22
0	0,1329	0,2236	0,2507	0,3101
40	0,2445	0,3416	0,4933	0,6852
80	0,2778	0,3782	0,5752	0,8324
120	0,2973	0,4047	0,6319	0,9367
160	0,3074	0,4226	0,6763	1,0124

Кесте 1.20 - Поликристалды графит материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері (T=2600° C)

Уақыт t, мин	Кернеуіндегі σ , МПа, деформация $\varepsilon_e(t)$, %			
	6	10	14	18
0	0,0744	0,1689	0,300	0,4381
40	0,1924	0,2977	0,6012	0,9927
80	0,2061	0,3084	0,7143	1,2465
120	0,2168	0,3222	0,7816	1,4130
160	0,2305	0,3328	0,8168	1,5375

Кесте 1.21 - Поликристалды графит материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері (T=2800° C)

Уақыт t, мин	Кернеуіндегі σ , МПа, деформация $\varepsilon_e(t)$, %			
	6	10	12	14
0	0,0896	0,1876	0,2607	0,3127
20	0,2226	0,3381	0,5458	0,8344
40	0,2520	0,4855	0,6872	1,0654
60	0,2713	0,5531	0,7994	1,2270
80	0,2865	0,6078	0,8761	1,3651
100	0,3026	0,6489	0,9418	1,4863

Бағдарламаның орындалу нәтижесінен 2000, 2200, 2400, 2600, 2800° С температураларындағы материалдың әрбір тұрақты кернеулердегі Абель ядросы параметрлерінің сәйкесті келесі мәндері анықталды:

$$T = 2000^{\circ} \text{C}: \alpha = 0,7248; \delta = 0,0482,$$

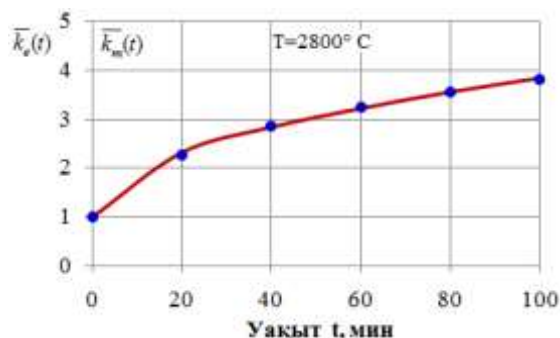
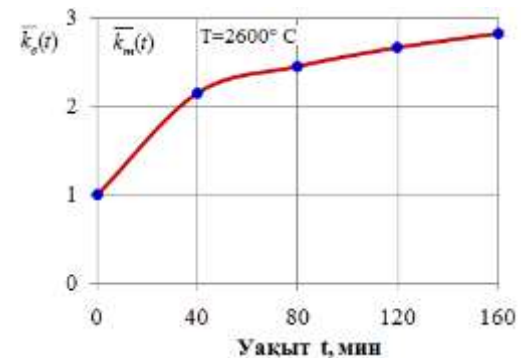
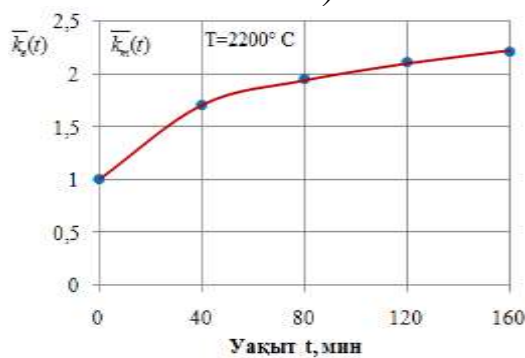
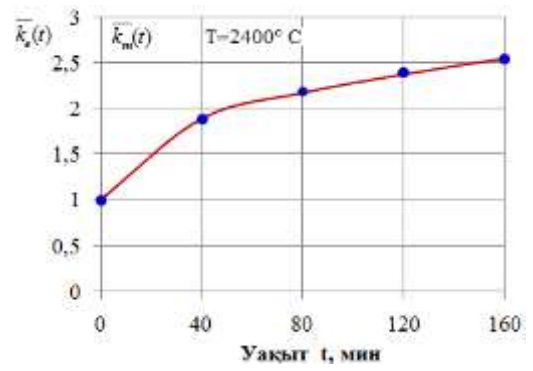
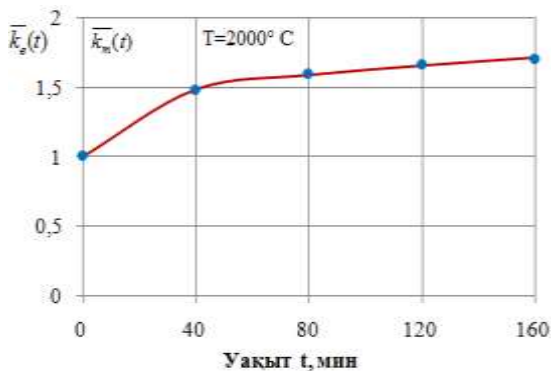
$$T = 2200^{\circ} \text{C}: \alpha = 0,6068; \delta = 0,0655,$$

$$T = 2400^{\circ} \text{C}: \alpha = 0,6020; \delta = 0,0821,$$

$$T = 2600^{\circ} \text{C}: \alpha = 0,6698; \delta = 0,1129,$$

$$T = 2800^{\circ} \text{C}: \alpha = 0,5171; \delta = 0,1479.$$

Поликристалды графит материалының көрсетілген температураларындағы тәжірибелік реологиялық параметрінің мәндері мен есептелген реологиялық параметрінің графиктері 1.27-суретте көрсетілген.



д)

- – орташа тәжірибелік нүктелер, $\bar{k}_e(t)$; – - орташа есептелген нүктелер, $\bar{k}_m(t)$
 $T=2000^{\circ} \text{C}$ (а), $T=2200^{\circ} \text{C}$ (б), $T=2400^{\circ} \text{C}$ (в), $T=2600^{\circ} \text{C}$ (г), $T=2800^{\circ} \text{C}$ (д)

Сурет 1.27 – Температураларындағы поликристалды графит материалының әр түрлі кернеулердегі тәжірибелік және модельдік реологиялық параметрлері

Бағдарламадан $T=2000^{\circ}$ С температурасында поликристалды графит материалының 10, 14, 18 және 22 МПа кернеулеріндегі сәйкесті шартты лездік деформация мәндері анықталды: $\varepsilon_0^m = 0,0742\%$; $0,1069\%$; $0,1410\%$ және $0,1980\%$. Сондай-ақ, әрбір кернеулердегі, σ шартты лездік қисығы мына түрде жуықталады:

$$\psi(\sigma) = 4 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma^{1,2}. \quad (1.43)$$

$T = 2200^{\circ}$ С температурасында поликристалды графит материалының 10, 14, 18 және 22 МПа кернеулеріндегі сәйкесті шартты лездік деформация мәндері мыналарға тең: $\varepsilon_0^m = 0,0874\%$; $0,1282\%$; $0,1686\%$ және $0,2530\%$. Шартты лездік қисығы мына түрде жуықталады:

$$\psi(\sigma) = 4 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma^{1,3}. \quad (1.44)$$

$T = 2400^{\circ}$ С температурасында поликристалды графит материалының 10, 14, 18 және 22 МПа кернеулеріндегі сәйкесті шартты лездік деформация мәндері мыналарға тең: $\varepsilon_0^m = 0,1254\%$; $0,1722\%$; $0,2635\%$ және $0,3831\%$. Шартты лездік қисығы мына түрде жуықталады:

$$\psi(\sigma) = 4 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma^{1,4}. \quad (1.45)$$

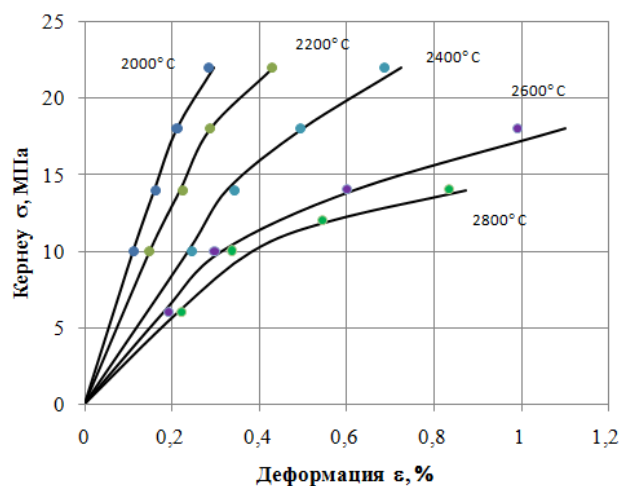
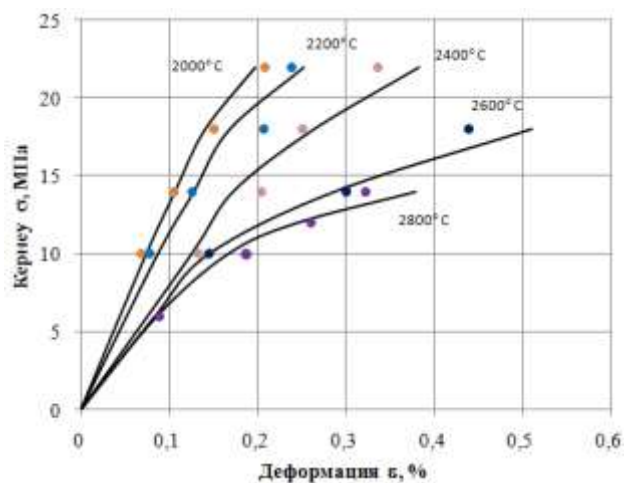
$T = 2600^{\circ}$ С температурасында поликристалды графит материалының 10, 14, 18 және 22 МПа кернеулеріндегі сәйкесті шартты лездік деформация мәндері мыналарға тең: $\varepsilon_0^m = 0,0841\%$; $0,1256\%$; $0,2881\%$ және $0,5108\%$. Шартты лездік қисығы мына түрде жуықталады:

$$\psi(\sigma) = 3 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma^{1,65}. \quad (1.46)$$

$T = 2800^{\circ}$ С температурасында поликристалды графит материалының 10, 14, 18 және 22 МПа кернеулеріндегі сәйкесті шартты лездік деформация мәндері мыналарға тең: $\varepsilon_0^m = 0,0861\%$; $0,1665\%$; $0,2446\%$ және $0,3792\%$. Шартты лездік қисығы мына түрде жуықталады:

$$\psi(\sigma) = 4 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma^{1,7}. \quad (1.47)$$

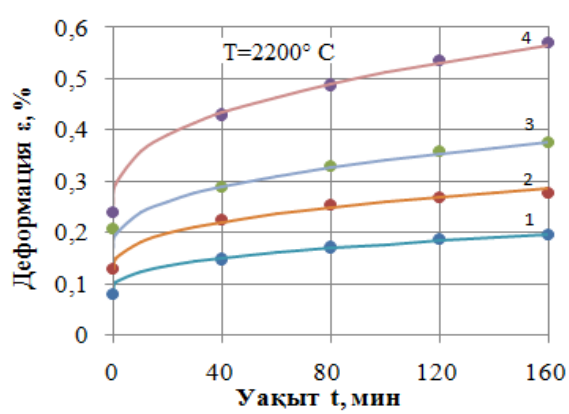
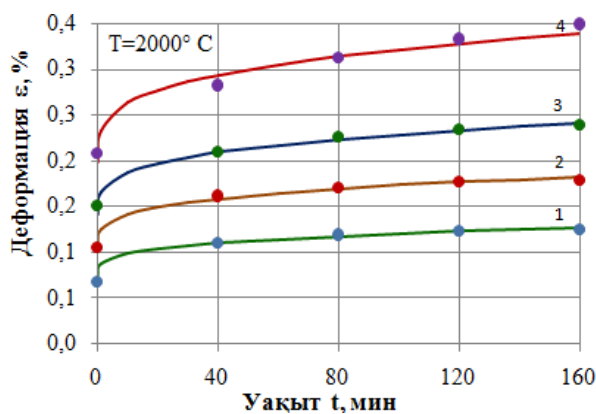
Әрі қарай 2000, 2200, 2400, 2600, 2800 $^{\circ}$ С температураларындағы поликристалды графит материалының тұрақты кернеулеріндегі уақыт $t=0$ және $t=40$ мин мезетіндегі «кернеу-деформация» графиктері 1.28-суретте көрсетілген. Көріп отырғанымыздай, жоғарыда аталған температураларда изохронды жылжымалылық қисықтарының ұқсастығы байқалады.



а) б)
 ● – тәжірибелік нүктелер; – - есептелген нүктелер;
 шартты лездік деформация, $t=0$ (а) және $t=40$ мин (б)

Сурет 1.28 - 2000, 2200, 2400, 2600, 2800° С температураларындағы тұрақты кернеулеріндегі поликристалды графит материалының изохронды жылжымалылық қисықтары

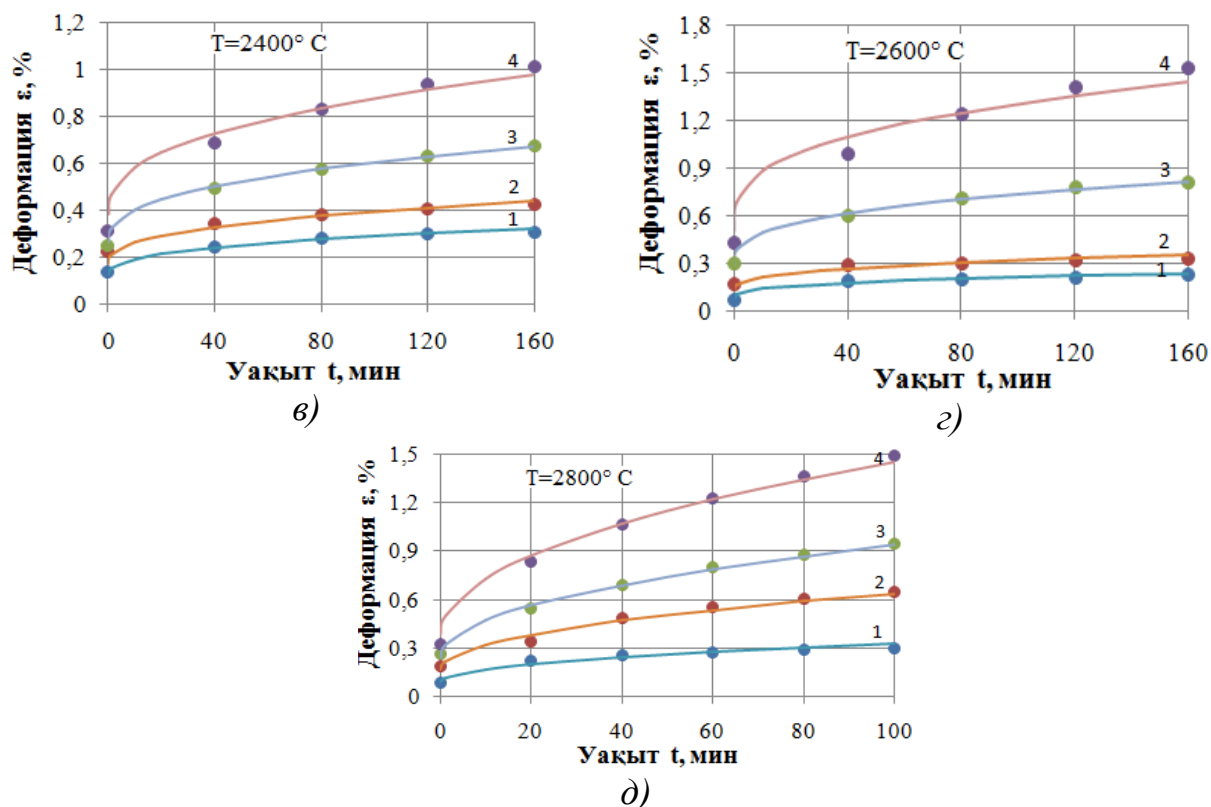
2000, 2200, 2400, 2600, 2800° С температураларындағы поликристалды графит материалының әр түрлі деңгей кернеулеріндегі жылжымалылық қисықтары 1.29-суретте көрсетілген.



а) б)
 ● – тәжірибелік нүктелер; – - есептелген нүктелер;
 Т=2000° С (а), Т=2200° С (б) температураларындағы әр түрлі кернеулердегі жылжымалылық қисықтары: 1 - 10 МПа; 2 - 14 МПа; 3 - 18 МПа; 4 - 22 МПа;

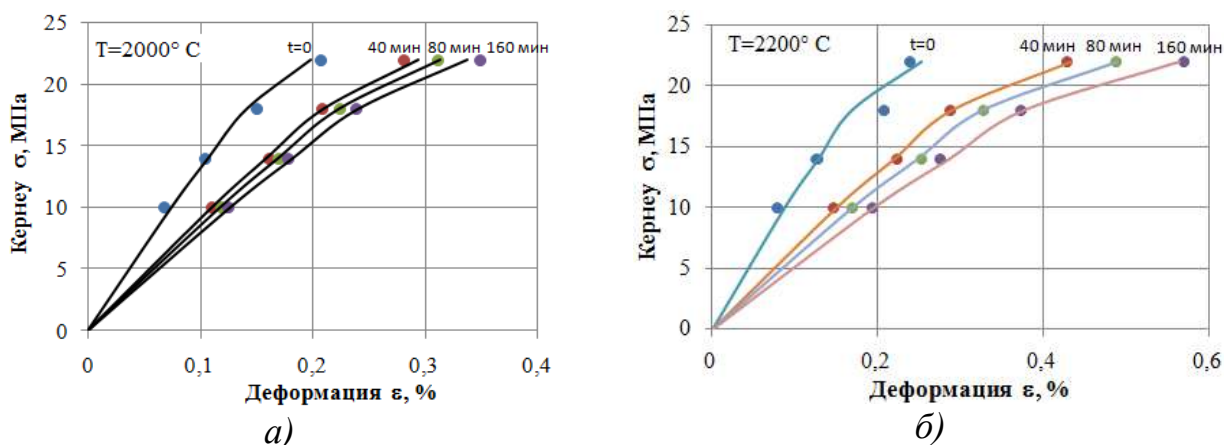
Сурет 1.29 - Поликристалды графит материалы, бет 1

Сурет 1.29, бет 2



- $T=2400^{\circ}\text{C}$ (v) температурадағы әр түрлі кернеулердегі жылжымалылық қисықтары: 1 - 10 МПа; 2 - 14 МПа; 3 - 18 МПа; 4 - 22 МПа; - $T=2600^{\circ}\text{C}$ (z) әр түрлі кернеулердегі жылжымалылық қисықтары: 1 - 6 МПа; 2 - 10 МПа; 3 - 14 МПа; 4 - 18 МПа; - $T=2800^{\circ}\text{C}$ (d) температурадағы әр түрлі кернеулердегі жылжымалылық қисықтары: 1 - 6 МПа; 2 - 10 МПа; 3 - 12 МПа; 4 - 14 МПа

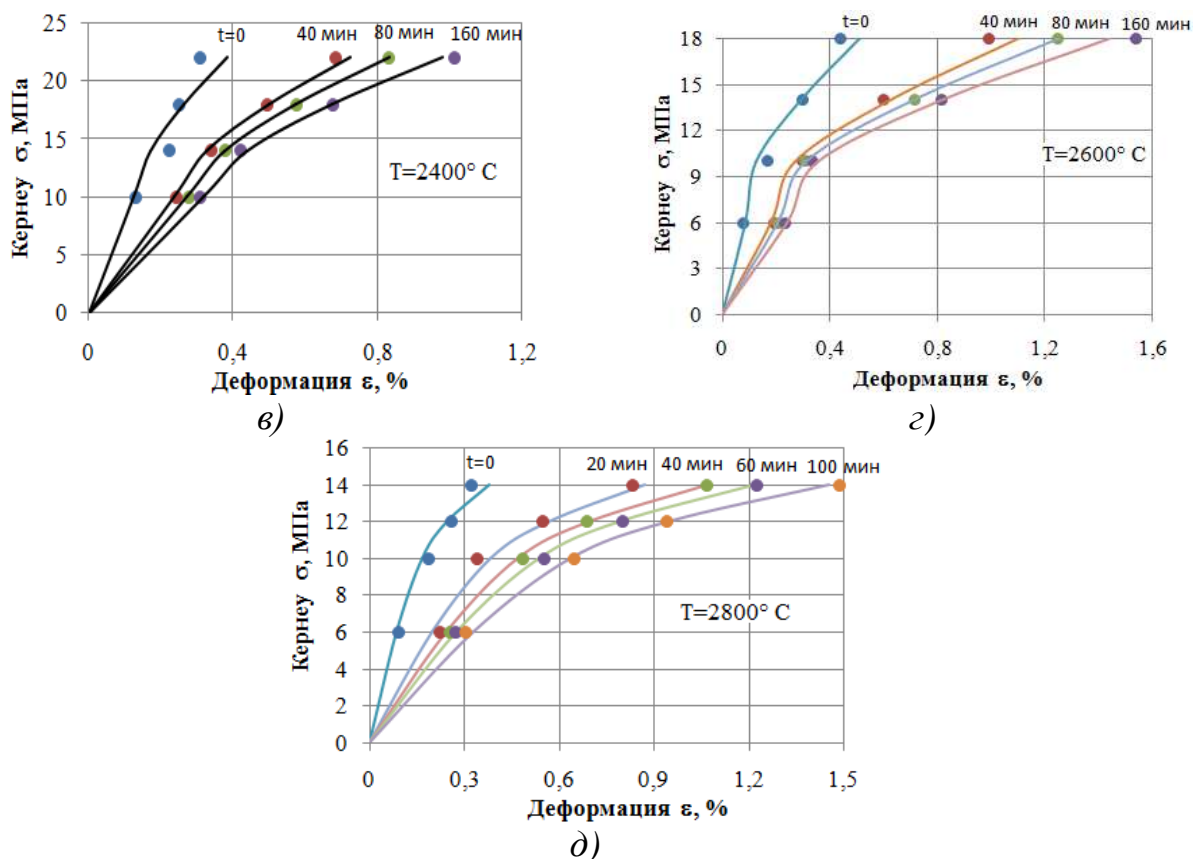
Сонымен бірге, материалдың жоғарыдағы аталған температураларында изохронды жылжымалылық қисықтары 1.30-суретте көрсетілген.



$T=2000^{\circ}\text{C}$ (a), $T=2200^{\circ}\text{C}$ (б)

Сурет 1.30 - Поликристалды графит материалының температураларындағы изохронды жылжымалылық қисықтары, бет 1

Сурет 1.30, бет 2



- – тәжірибелік нүктелер; – - есептелген нүктелер;
 $T=2400^{\circ}\text{C}$ (a), $T=2600^{\circ}\text{C}$ (b), $T=2800^{\circ}\text{C}$ (c)

Суреттерді талдаудан, поликристалды графит материалының барлық температураларындағы есептелген деформация мәндері тәжірибелік деформация мәндерімен сәйкес келеді.

1.5.6 Эпоксифенолды шыныпластик материалы

[15, с. 417-421] жұмысында эпоксифенолды шыныпластик материалына 20, 30, 40, 50, 60° С температураларында жылжымалылыққа сынақтар жүргізілген. Әр түрлі тұрақты кернеулеріндегі сынақ нәтижелері сәйкесті 1.22-1.26 кестелерде келтірілген.

Кесте 1.22 - Эпоксифенолды шыныпластик материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері ($T=20^{\circ}\text{C}$)

Уақыт t , сағ	Кернеуіндегі σ , МПа, деформация $\epsilon_{\sigma}(t)$, %		
	42,2	84,5	105,6
1	2	3	4
0	0,20	0,62	0,98
1	0,2212	0,812	1,3791
2	0,2262	0,8486	1,4421

1.22 кестенің жалғасы

1	2	3	4
3	0,2307	0,8722	1,5128
4	0,2320	0,8976	1,5606
5	0,2326	0,9162	1,5881
6	0,2334	0,9307	1,6013

Кесте 1.23 - Эпоксифенолды шыныпластик материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері (T=30° C)

Уақыт t, сағ	Кернеуіндегі σ , МПа, деформация $\varepsilon_c(t)$, %		
	42,2	84,5	105,6
0	0,23	0,8	1,3
1	0,27	0,99	1,65
2	0,29	1,09	1,83
3	0,3	1,14	1,92
4	0,306	1,16	1,97
5	0,309	1,18	2
6	0,311	1,19	2,02

Кесте 1.24 - Эпоксифенолды шыныпластик материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері (T=40° C)

Уақыт t, сағ	Кернеуіндегі σ , МПа, деформация $\varepsilon_c(t)$, %		
	42,2	84,5	105,6
0	0,26	0,97	1,62
1	0,3281	1,3173	2,2283
2	0,3390	1,3396	2,3163
3	0,3455	1,3769	2,3916
4	0,3532	1,3956	2,4530
5	0,3568	1,4117	2,4597
6	0,3581	1,4332	2,4899

Кесте 1.25 - Эпоксифенолды шыныпластик материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері (T=50° C)

Уақыт t, сағ	Кернеуіндегі σ , МПа, деформация $\varepsilon_c(t)$, %		
	42,2	84,5	105,6
1	2	3	4
0	0,29	1,14	1,94
1	0,3801	1,6046	2,7565
2	0,3868	1,6875	2,8761

1.25 кестенің жалғасы

1	2	3	4
3	0,3932	1,7202	2,9524
4	0,4025	1,7555	3,0182
5	0,4151	1,7842	3,0813
6	0,4191	1,7997	3,1128

Кесте 1.26 - Эпоксифенолды шыныпластик материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері (T=60° C)

Уақыт t, сағ	Кернеуіндегі σ , МПа, деформация $\varepsilon_e(t)$, %		
	42,2	84,5	105,6
0	0,32	1,31	2,26
1	0,4528	1,9022	3,2622
2	0,4663	1,9704	3,4276
3	0,4802	2,0513	3,5333
4	0,4898	2,1057	3,6853
5	0,4987	2,1543	3,7249
6	0,5074	2,1995	3,7600

20, 30, 40, 50, 60° C температураларындағы эпоксифенолды шыныпластик материалының әрбір тұрақты кернеулердегі Абель ядросы параметрлерінің келесі мәндері бағдарламадан анықталды:

T = 20° C: $\alpha = 0,7361$; $\delta = 0,0722$,

T = 30° C: $\alpha = 0,6336$; $\delta = 0,0927$,

T = 40° C: $\alpha = 0,8074$; $\delta = 0,0636$,

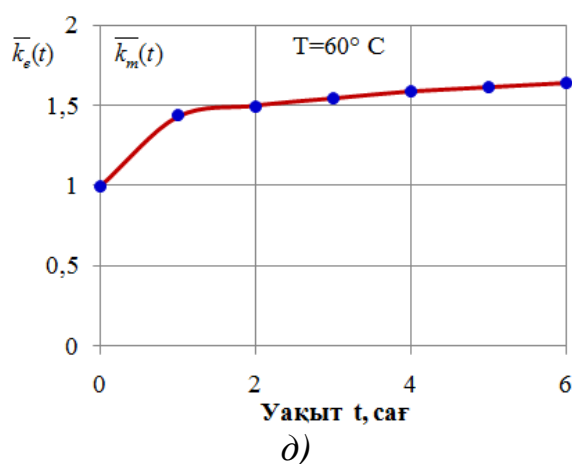
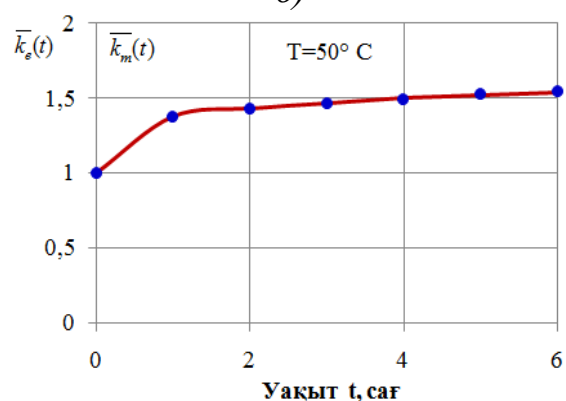
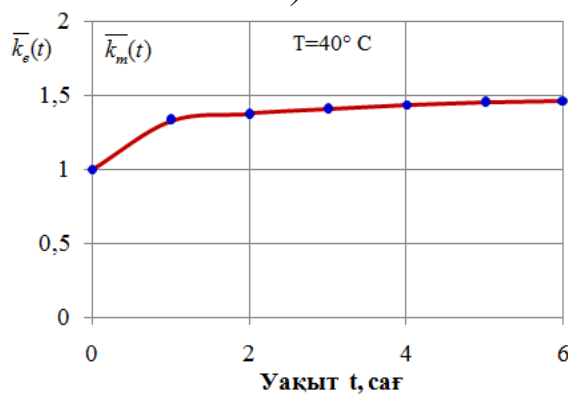
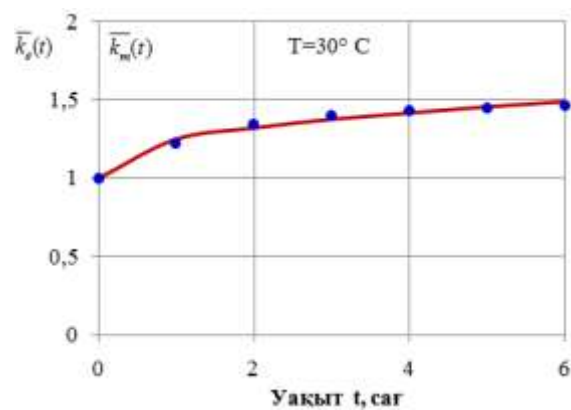
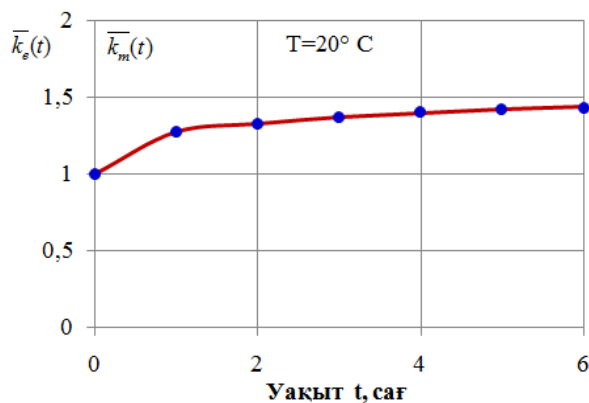
T = 50° C: $\alpha = 0,7964$; $\delta = 0,0765$,

T = 60° C: $\alpha = 0,7769$; $\delta = 0,0959$.

Материалдың берілген тұрақты температураларындағы тәжірибелік реологиялық параметрінің мәндері мен реологиялық параметрінің графиктері 1.31-суретте көрсетілген.

Бағдарламаны орындау нәтижесінен T=20° C температурасында эпоксифенолды шыныпластик материалының 42,2; 84,5 және 105,6 МПа кернеулеріндегі сәйкесті анықталған шартты лездік деформация мәндері мыналарға тең: 0,1675 %; 0,6418 % және 1,1045 %. Сондай-ақ, әрбір кернеулердегі, σ шартты лездік деформация қисығы мына түрде жуықталады:

$$\psi(\sigma) = 8 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma^{2,03}. \quad (1.48)$$



- – орташа тәжірибелік нүктелер, $\bar{k}_e(t)$; – орташа есептелген нүктелер, $\bar{k}_m(t)$
 T=20° C (a), T=30° C (б), T=40° C (в), T=50° C (з), T=60° C (д)

Сурет 1.31 - Эпоксифенолды шыныпластик материалының температураларындағы тәжірибелік және модельдік реологиялық параметрінің мәндері

T=30° C температурасында эпоксифенолды шыныпластик материалының 42,2; 84,5 және 105,6 МПа кернеулеріндегі сәйкесті шартты лездік деформация мәндері мыналарға тең: 0,2148 %; 0,8110 % және 1,3681 %. Әрбір кернеулерде σ , шартты лездік қисығы мына түрде жуықталады:

$$\psi(\sigma) = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma^2. \quad (1.49)$$

T=40° C температурасында эпоксифенолды шыныпластик материалының 42,2; 84,5 және 105,6 МПа кернеулеріндегі сәйкесті шартты лездік деформация мәндері мыналарға тең: 0,2459 %; 0,9780 % және 1,6943 %. Әрбір кернеулерде σ , шартты лездік қисығы мына түрде жуықталады:

$$\psi(\sigma) = 1 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma^{2,1}. \quad (1.50)$$

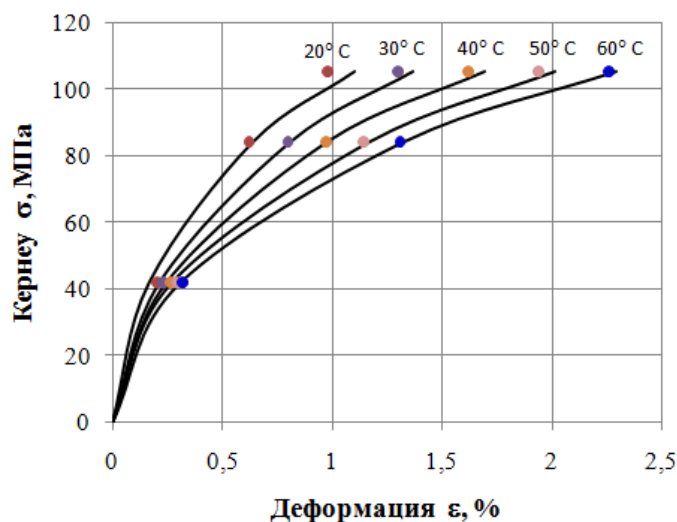
T=50° C температурасында эпоксифенолды шыныпластик материалының 42,2; 84,5 және 105,6 МПа кернеулеріндегі сәйкесті шартты лездік деформация мәндері 0,2712 %; 1,1710 % және 2,0131 % тең. Әрбір кернеулерде σ , шартты лездік қисығы мына түрде жуықталады:

$$\psi(\sigma) = 8 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma^{2,2}. \quad (1.51)$$

T=60° C температурасында эпоксифенолды шыныпластик материалының 42,2; 84,5 және 105,6 МПа кернеулеріндегі сәйкесті шартты лездік деформация мәндері 0,3107 %; 1,3282 % және 2,2945 % тең. Әрбір кернеулерде σ , шартты лездік қисығы мына түрде жуықталады:

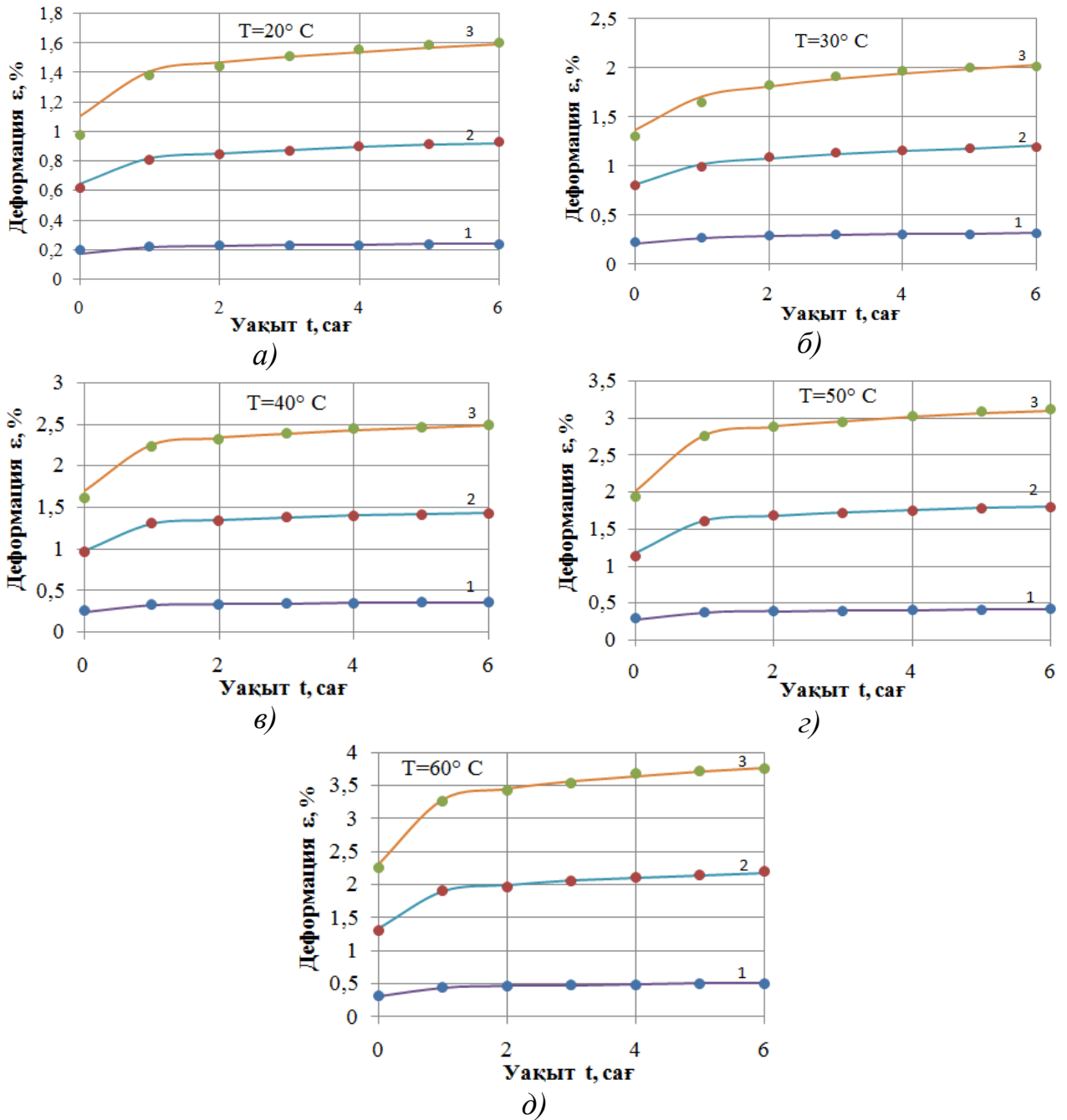
$$\psi(\sigma) = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma^{2,1}. \quad (1.52)$$

Әрі қарай, 20, 30, 40, 50, 60° C температураларындағы эпоксифенолды шыныпластик материалының тұрақты кернеулеріндегі шартты лездік деформация қисықтары 1.32-суретте көрсетілген. Көріп отырғанымыздай, жоғарыда аталған температураларда изохронды жылжымалылық қисықтарының ұқсастығы байқалады.



Сурет 1.32 - Эпоксифенолды шыныпластик материалының тұрақты кернеулеріндегі шартты лездік деформация қисықтары

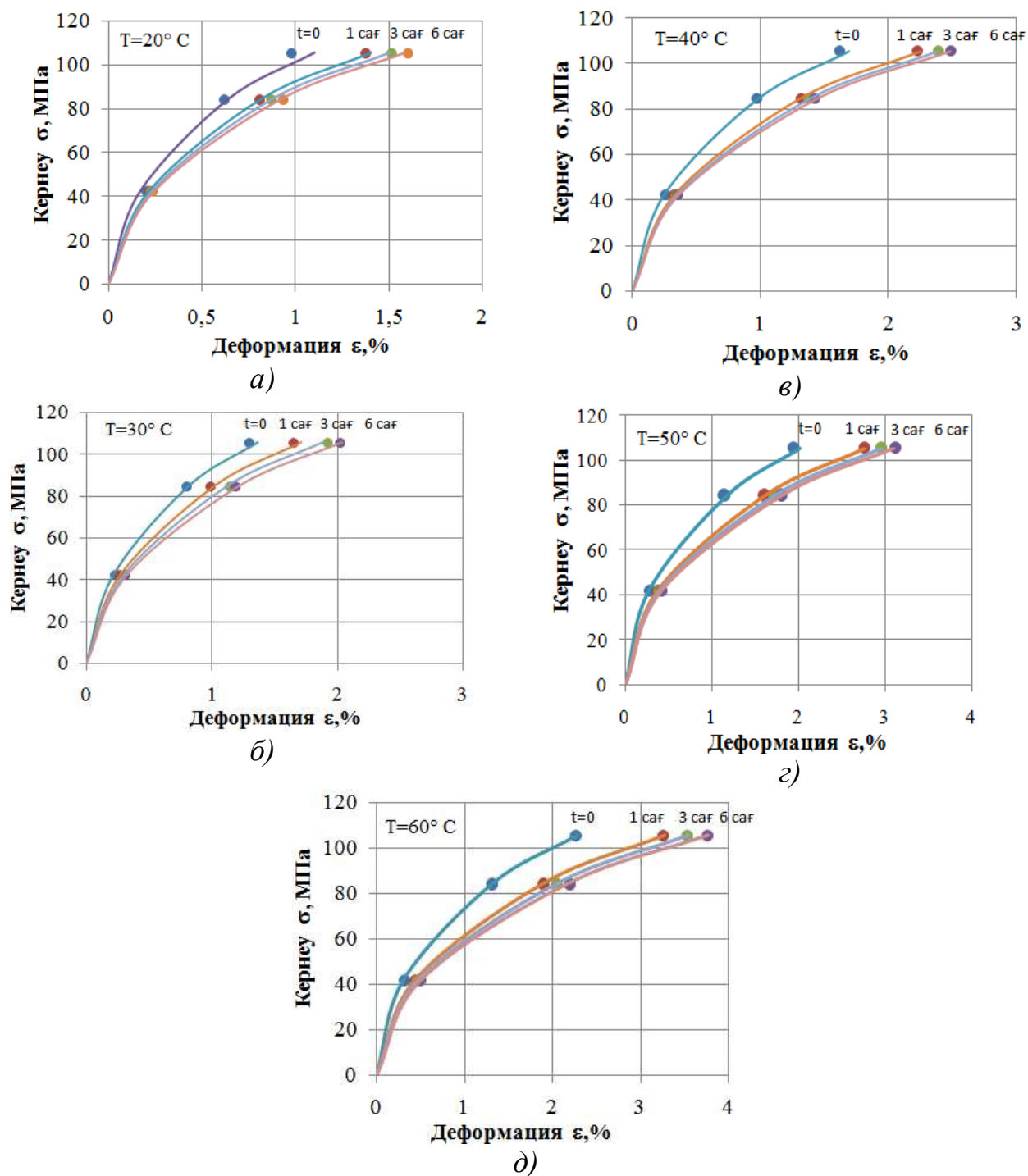
Эпоксифенолды шыныпластик материалының 20, 30, 40, 50, 60° С температураларындағы тұрақты кернеулерде жылжымалылық деформациясының тәжірибелік және есептелген мәндерінен тұрғызылған жылжымалылық қисықтары сәйкесті 1.33-суретте көрсетілген.



● – тәжірибелік нүктелер; – - есептелген нүктелер;
 T=20° C (a), T=30° C (б), T=40° C (в), T=50° C (з), T=60° C (д)

Сурет 1.33 - Эпоксифенолды шыныпластик материалының температураларындағы әр түрлі кернеулердегі жылжымалылық қисықтары: 1 – 42,2 МПа; 2 – 84,5 МПа; 3 – 105,6 МПа

Эпоксифенолды шыныпластик материалының бес температураларындағы изохронды жылжымалылық қисықтары 1.34-суретте көрсетілген.



● – тәжірибелік нүктелер; – - есептелген нүктелер;
 $T=20^{\circ}\text{C}$ (а), $T=30^{\circ}\text{C}$ (б), $T=40^{\circ}\text{C}$ (в), $T=50^{\circ}\text{C}$ (г), $T=60^{\circ}\text{C}$ (д)

Сурет 1.34 - Эпоксифенолды шыныпластик материалының температураларындағы изохронды жылжымалылық қисықтары

Көріп отырғанымыздай, барлық кернеулерде есептелген мәндері тәжірибелік мәндерімен сәйкес келеді.

1.5.7 Полиэфирлі полимербетон материалы

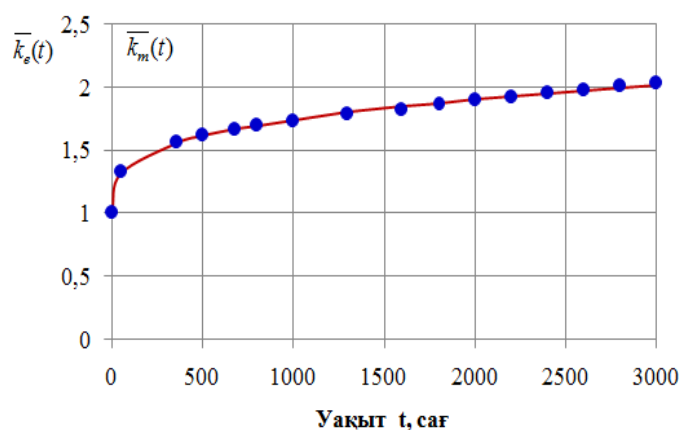
[21, p. 105-106] жұмысында полиэфирлі полимербетон материалына 10, 20, 30, 40 және 50 МПа кернеулерінде жылжымалылыққа сынақтар жүргізілген. Осы кернеулердегі полиэфирлі полимербетон материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері 1.27-кестеде келтірілген.

Кесте 1.27 - Полиэфирлі полимербетон материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері

Уақыт t, сағ	Кернеуіндегі σ , МПа, деформация $\varepsilon_c(t)$, %				
	10	20	30	40	50
0	0,032	0,0639	0,0964	0,1308	0,1614
50	0,0443	0,0859	0,1247	0,1676	0,2121
360	0,0524	0,1012	0,1493	0,1984	0,2472
500	0,0548	0,1045	0,1529	0,2032	0,2548
680	0,0564	0,1071	0,1578	0,2091	0,2650
800	0,0578	0,1088	0,1595	0,2145	0,2711
1000	0,0587	0,1105	0,1633	0,2197	0,2774
1300	0,0608	0,1125	0,1684	0,2256	0,2858
1600	0,0619	0,1157	0,1720	0,2299	0,2958
1800	0,0633	0,1189	0,1745	0,2342	0,3006
2000	0,0647	0,1208	0,1788	0,2381	0,3057
2200	0,0667	0,1214	0,1801	0,2410	0,3104
2400	0,0674	0,1233	0,1825	0,2440	0,3148
2600	0,0684	0,1260	0,1847	0,2470	0,3188
2800	0,0694	0,1276	0,1884	0,2501	0,3224
3000	0,0702	0,1304	0,1905	0,2535	0,3267

Бағдарлама көмегімен полиэфирлі полимербетон материалының Абель ядросының келесі мәндері анықталды: $\alpha = 0,7164$; $\delta = 0,0296$.

1.35-суретте тәжірибелік реологиялық параметрінің мәндері мен модельдік реологиялық параметрінің графигі көрсетілген. Ондағы ең үлкен ауытқу 1,20 %.



● – орташа тәжірибелік нүктелер, $\bar{k}_e(t)$; — - орташа есептелген нүктелер, $\bar{k}_m(t)$

Сурет 1.35 - Полиэфирлі полимербетон материалының тәжірибелік және модельдік реологиялық параметрі

Бағдарламаның орындалуынан, $\sigma=10, 20, 30, 40$ және 50 МПа кернеулеріндегі сәйкесті шартты лездік деформация мәндері мынаған тең: $\varepsilon_0^m = 0,0341 \%, 0,0639 \%, 0,0942 \%, 0,1258 \%$ және $0,1604 \%$.

Полиэфирлі полимербетон материалының шартты лездік деформация қисығы мына теңдеумен жуықталады:

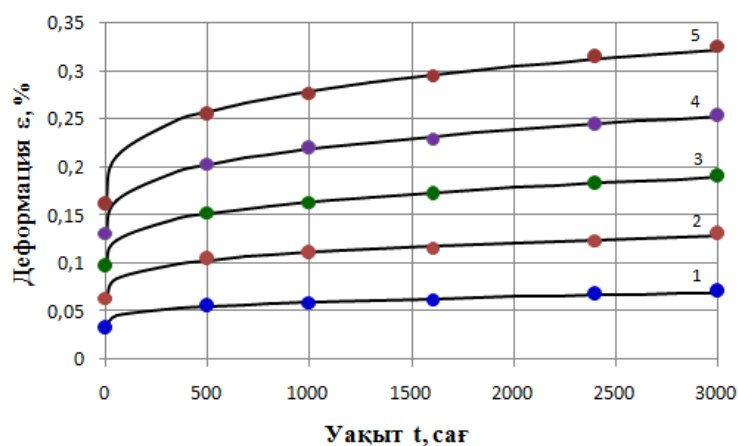
$$\psi(\sigma) = 3,7 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma. \quad (1.53)$$

Барлық бес кернеулеріндегі полиэфирлі полимербетон материалының жылжымалылық деформациясының есептелген мәндері 1.28-кестеде көрсетілген.

Кесте 1.28 - Полиэфирлі полимербетон материалының жылжымалылық деформациясының есептелген мәндері

Уақыт t, сағ	Кернеуіндегі σ , МПа, деформация $\varepsilon_m(t)$, %				
	10	20	30	40	50
0	0,0341	0,0639	0,0942	0,1258	0,1604
50	0,0449	0,0842	0,1240	0,1657	0,2112
360	0,0530	0,0993	0,1464	0,1955	0,2493
500	0,0549	0,1028	0,1515	0,2024	0,2580
680	0,0568	0,1063	0,1567	0,2093	0,2669
800	0,0579	0,1083	0,1596	0,2133	0,2719
1000	0,0594	0,1112	0,1639	0,2190	0,2792
1300	0,0614	0,1149	0,1693	0,2262	0,2884
1600	0,0630	0,1180	0,1739	0,2323	0,2961
1800	0,0640	0,1198	0,1766	0,2359	0,3007
2000	0,0649	0,1215	0,1791	0,2392	0,3050
2200	0,0657	0,1231	0,1814	0,2423	0,3090
2400	0,0665	0,1246	0,1836	0,2452	0,3127
2600	0,0673	0,1260	0,1856	0,2480	0,3162
2800	0,0680	0,1273	0,1876	0,2506	0,3195
3000	0,0686	0,1285	0,1894	0,2530	0,3226

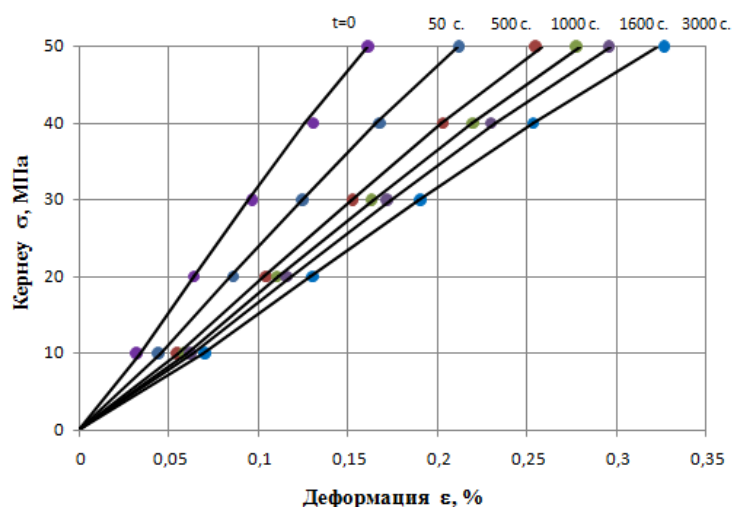
1.36-суретте полиэфирлі полимербетон материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік және есептелген мәндері көрсетілген.



● – тәжірибелік нүктелер; – - есептелген нүктелер;
 1 - 10 МПа; 2 - 20 МПа; 3 - 30 МПа; 4 - 40 МПа; 5 – 50 МПа.

Сурет 1.36 - Әр түрлі кернеулердегі полиэфирлі полимербетон материалының жылжымалылық қисықтары

Полиэфирлі полимербетон материалының жылжымалылық деформациясының 1.27-кестедегі тәжірибелік мәндері және 1.28-кестедегі есептелген мәндерінен изохронды жылжымалылық қисықтары тұрғызылды (сурет 1.37). Көріп отырғанымыздай, есептелген деформация мәндері тәжірибелік деформация мәндерімен сәйкес келеді.



● – тәжірибелік нүктелер; – - есептелген нүктелер

Сурет 1.37 - Полиэфирлі полимербетон материалының изохронды жылжымалылық қисықтары

Жоғарыда келтірілген мысалдардан көретініміз, ұсынылған әдістер мен бағдарлама көмегімен реономды материалдардың Абель ядросының параметрлерін, шартты лездік деформация және жылжымалылық деформация мәндерін жоғары дәлдікте анықтауға болады.

1.6 Әр түрлі жүктеу режимдерінде полиэфирлі полимербетон материалының жылжымалылығын зерттеу

[21, р. 106-107] жұмысында полиэфирлі полимербетон материалының беріктікке қасиеті әр түрлі жүктеу режимдерінде зерттелген. Онда материалға сатылы жүктемеде және «жүктеу-жүксіздеу» циклдік жүктемесінде сынақтар жүргізілген.

Полиэфирлі полимербетон материалының зерттеу нәтижелерінің жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндеріне модельдеу жүргізейік.

Кернеу мен деформация тәуелділігі мұралық жылжымалылық теориясының (Больцман-Вольтерра теориясы) (1.54) интегралдық теңдеуімен сипатталады, яғни мына түрде [21, р.106]:

$$\varphi[\varepsilon(t)] = \sigma(t) + \int_0^t K(t-\tau)\sigma(\tau)d\tau, \quad (1.54)$$

мұндағы

$$K(t-\tau) = \delta(t-\tau)^{-\alpha}, \quad (1.55)$$

$$\delta > 0, \quad \alpha \in (0,1) \quad (1.56)$$

(1.55) және (1.56) шарттарын ескере отырып, (1.54) теңдеудің интегралына Стильтес интегралын пайдаланып, (1.54) интегралдық теңдеуді бөлшектеп дифференциалдаудан мына түрдегі қатынасты аламыз [90, с. 99]:

$$\int_0^t \delta(t-\tau)^{-\alpha} \sigma(\tau)d\tau = \frac{\delta}{1-\alpha} \int_0^t (t-\tau)^{(1-\alpha)} d\sigma(\tau). \quad (1.57)$$

Онда (1.54) интегралдық теңдеу мына түрге түрленеді:

$$\varphi[\varepsilon(t)] = \frac{\delta}{1-\alpha} \int_0^t (t-\tau)^{(1-\alpha)} d\sigma(\tau). \quad (1.58)$$

Кернеудің уақыт t , бойынша сатылы жүктеуінде суперпозиция шарты келесі түрде сипатталады:

$$\sigma(t) = \sigma_1 h(t) + (\sigma_2 - \sigma_1) h(t-t_1) \quad (1.59)$$

мұндағы: $h(t)$ - Хевисайдтың бірлік функциясы:

$$h(t-\tau) = \begin{cases} 1, & t \geq \tau, \\ 0 & t < \tau. \end{cases} \quad (1.60)$$

(1.59) өрнекті (1.58) интегралдық теңдеуге қойғанда, $\varphi(\varepsilon) = E\varepsilon(t)$ ескерсек, келесіні аламыз:

$$E\varepsilon(t) = \frac{\delta}{1-\alpha} \sigma_1 t^{(1-\alpha)} + \frac{\delta}{1-\alpha} (\sigma_2 - \sigma_1) (t-t_1)^{(1-\alpha)}. \quad (1.61)$$

(1.61) теңдеуді алуда мына өрнек ескерілді:

$$\delta(t) = \frac{dh(t)}{dt}, \quad (1.62)$$

мұндағы: $\delta(t)$ - Дирактың дельта-функциясы және ол келесі қасиетке ие:

$$\int_0^t f(t-\tau) \delta(\tau) d\tau = \int_0^t \delta(t-\tau) f(\tau) d(\tau) = f(t). \quad (1.63)$$

Егер уақыт $t \leq t_1$ болғанда (сурет 2.1), онда (1.61) теңдеу мына түрде сипатталады:

$$E\varepsilon(t) = \sigma_1 + \frac{\delta}{1-\alpha} \sigma_1 t^{(1-\alpha)}, \quad (1.64)$$

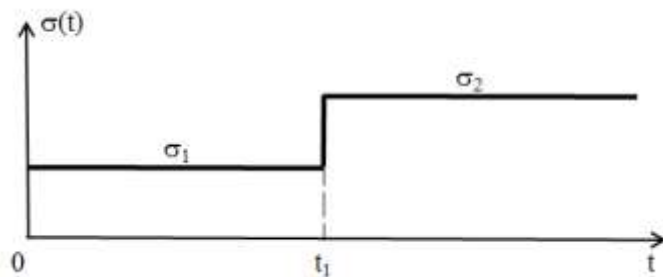
яғни жылжымалылық деформациясы келесі теңдеумен сипатталады:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \left(1 + \frac{\delta}{1-\alpha} t^{(1-\alpha)} \right). \quad (1.64')$$

Ал уақыт $t \geq t_1$ болғанда (сурет 2.1), онда (1.61) теңдеуі бойынша жылжымалылық деформациясы келесі түрде сипатталады:

$$E\varepsilon(t) = \sigma_2 + \sigma_1 \frac{\delta}{1-\alpha} t^{(1-\alpha)} + (\sigma_2 - \sigma_1) \frac{\delta}{1-\alpha} (t-t_1)^{(1-\alpha)}. \quad (1.65)$$

Полиэфирлі полимербетон материалы 1.38-суретте көрсетілген сатылы жүктеме схемасы бойынша жылжымалылыққа сыналған [21, р. 106-107].



Сурет 1.38 - Сатылы жүктеу сұлбасы

Полиэфирлі полимербетон материалына алдымен $\sigma_1=20$ МПа және содан кейін уақыт $t_1=1500$ сағатта $\sigma_2=40$ МПа жүктеме сатылы түсірілген. Сатылы жүктеме бойынша сынақ жүргізілген толық уақыты 3000 сағатқа тең. Полиэфирлі полимербетон материалының сатылы жүктемедегі жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері 1.29-кестеде келтірілген.

Кесте 1.29 - Полиэфирлі полимербетон материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері

Уақыт t, сағ	$\sigma=20$ МПа кернеуіндегі, деформация $\varepsilon_e(t)$, %	Уақыт t, сағ	$\sigma=40$ МПа кернеуіндегі, деформация $\varepsilon_e(t)$, %
0	0,0639	1500	0,1815
50	0,0859	1700	0,2100
360	0,1012	1800	0,2200
500	0,1045	2000	0,2330
680	0,1071	2200	0,2410
800	0,1088	2400	0,2440
1000	0,1105	2600	0,2470
1300	0,1125	2800	0,2501
1500	0,1140	3000	0,2535

Полиэфирлі полимербетон материалының жоғарыда анықталған Абель ядросының параметрлері мәндерін $\alpha=0,7164$; $\delta=0,0296$ және $\sigma_1=20$ МПа кернеуіндегі шартты лездік деформация $\varepsilon_0^m = 0,0639$ % мәнін ескере отырып, берілген мәндерге сәйкес (1.64) теңдеуінен материалдың жылжымалылық деформациясы келесі түрде сипатталады:

$$\varepsilon(t) = 0,0639 \cdot (1 + 0,1044 \cdot t^{0,2836}) \quad (1.66)$$

Әрі қарай, 1.38-суреттегі сұлба бойынша полиэфирлі полимербетон материалына $t_1=1500$ сағат уақытында $\sigma_2=40$ МПа жүктеме түсірілген. (1.65) теңдеуі бойынша, $\sigma_2=40$ МПа кернеуіндегі шартты лездік деформация мәнін $\varepsilon_0^m = 0,1258$ % ескере отырып, материалдың жылжымалылығы келесі теңдеумен сипатталады:

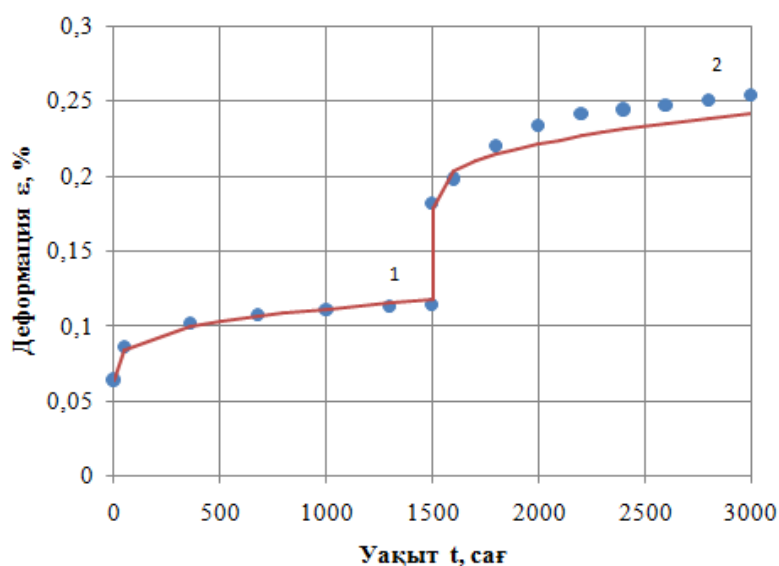
$$\varepsilon(t) = 0,1258 + 0,0067 \cdot t^{0,2836} + 0,0065 \cdot (t - t_1)^{0,2836}. \quad (1.67)$$

Полиэфирлі полимербетон материалының жылжымалылық деформациясының (1.66) және (1.67) формулалармен есептелген мәндері 1.30-кестеде келтірілген.

Кесте 1.30 - Полиэфирлі полимербетон материалының жылжымалылық деформациясының есептелген мәндері

Уақыт t, сағ	$\sigma=20$ МПа кернеуіндегі, деформация $\varepsilon_m(t)$, %	Уақыт t, сағ	$\sigma=40$ МПа кернеуіндегі, деформация $\varepsilon_m(t)$, %
0	0,0639	1500	0,1789
50	0,0841	1700	0,2098
360	0,0993	1800	0,2143
500	0,1028	2000	0,2210
680	0,1063	2200	0,2264
800	0,1083	2400	0,2309
1000	0,1112	2600	0,2349
1300	0,1148	2800	0,2385
1500	0,1170	3000	0,2418

Материалдың жылжымалылық деформациясының 1.29-кестедегі тәжірибелік мәндері мен 1.30-кестедегі есептелген мәндерінен тұрғызылған жылжымалылық қисығы 1.39-суретте көрсетілген.



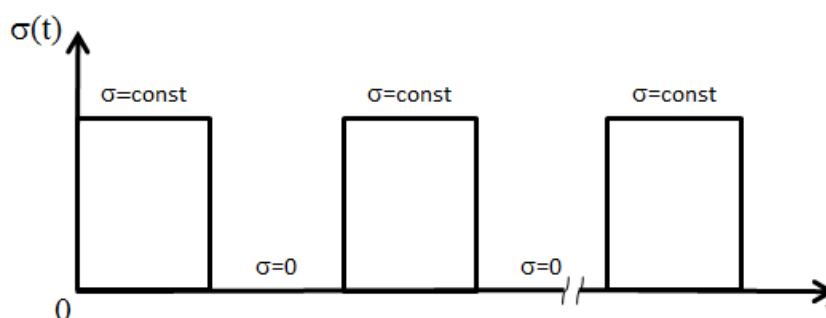
● – тәжірибелік нүктелер, — - есептелген нүктелер;
1 - 20 МПа; 2 - 40 МПа;

Сурет 1.39 - Полиэфирлі полимербетон материалының әр түрлі кернеулердегі жылжымалылық қисықтары

Көріп отырғанымыздай, полиэфирлі полимербетон материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері мен есептелген мәндері арасындағы сәйкестік жақсы.

Келесі полиэфирлі полимербетон материалына 1.40-суретте көрсетілген «жүктеу-жүксіздеу» циклдік жүктеме сұлбасы бойынша сынақтар жүргізілген

[21, p. 108]. Онда полиэфирлі полимербетон материалына жүктеме түсірілген, яғни жүктеме периоды $\sigma = \text{const}$ және жүктеме алынып тасталған, яғни жүксіздену периоды $\sigma = 0$.



Сурет 1.40 – Циклдік жүктеме сұлбасы

Полиэфирлі полимербетон материалына жүктеме жүктелгеннен кейін сынақ 0,5 сағат бойы бақыланған, одан кейін үлгіден жүктеме толық алынғаннан кейін материалдың жылжымалылығының қалпына келуі де 0,5 сағат бойы бақыланған. Зерттеу сынақтары 5 сағат бойы орындалған [21, p. 108]. Полиэфирлі полимербетон материалына сынама жүргізілгендегі жүктеме кернеу $\sigma = 30$ МПа-ға тең және кернеу әсер етпегендегі, яғни $\sigma = 0$ болғандағы тәжірибелік деформацияның мәндері 1.31-кестеде келтірілген.

Полиэфирлі полимербетон материалының Абель ядросының параметрлерінің мәндері $\alpha = 0,7164$; $\delta = 0,0296$ және $\sigma = 30$ МПа кернеуіндегі шартты лездік деформация мәні $\varepsilon_0^m = 0,0942$ бағдарламадан анықталды. Осы анықталған мәндерді пайдалана отырып, полиэфирлі полимербетон материалының жүктеу-жүксіздеу циклдік жүктемесі бойынша жылжымалылық деформациялары келесі өрнектермен сипатталады:

уақыт $t \in [0, 1]$ сағат аралығында материалдың жылжымалылығы келесі формуламен өрнектелсе,

$$\varepsilon_1(t) = \varepsilon_0 \left(1 + \frac{\delta}{1-\alpha} t^{1-\alpha} \right) h(0,5-t) + \varepsilon_0 \frac{\delta}{1-\alpha} (t^{1-\alpha} - (t-0,5)^{1-\alpha}) h(t-0,5); \quad (1.68)$$

уақыт $t \in [1, 2]$ сағат аралығы мына формуламен:

$$\varepsilon_2(t) = \varepsilon_0 \left(1 + \frac{\delta}{1-\alpha} (t-1)^{1-\alpha} \right) h(1,5-t) + \varepsilon_0 \frac{\delta}{1-\alpha} (t^{1-\alpha} - (t-1,5)^{1-\alpha}) h(t-1,5); \quad (1.69)$$

уақыт $t \in [2, 3]$ сағат аралығы мына формуламен:

$$\varepsilon_3(t) = \varepsilon_0 \left(1 + \frac{\delta}{1-\alpha} (t-2)^{1-\alpha} \right) h(2,5-t) + \varepsilon_0 \frac{\delta}{1-\alpha} (t^{1-\alpha} - (t-2,5)^{1-\alpha}) h(t-2,5); \quad (1.70)$$

уақыт $t \in [3, 4]$ сағат аралығы мына формуламен:

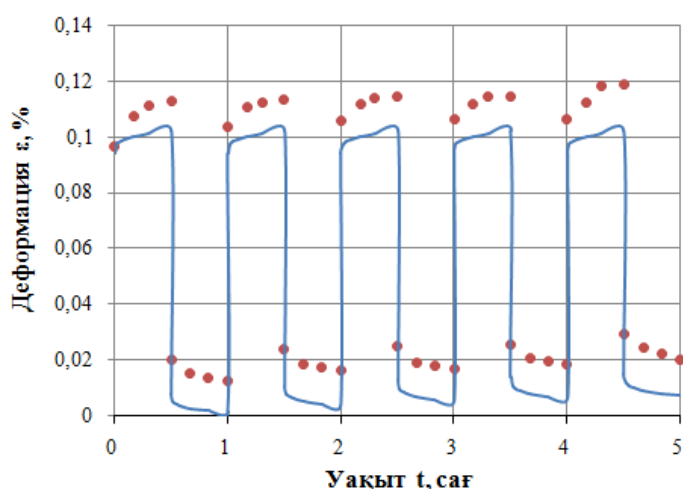
$$\varepsilon_4(t) = \varepsilon_0 \left(1 + \frac{\delta}{1-\alpha} (t-3)^{1-\alpha} \right) h(3,5-t) + \varepsilon_0 \frac{\delta}{1-\alpha} (t^{1-\alpha} - (t-3,5)^{1-\alpha}) h(t-3,5); \quad (1.71)$$

уақыт $t \in [4, 5]$ сағат аралығы мына формуламен анықталады:

$$\varepsilon_5(t) = \varepsilon_0 \left(1 + \frac{\delta}{1-\alpha} (t-4)^{1-\alpha} \right) h(4,5-t) + \varepsilon_0 \frac{\delta}{1-\alpha} (t^{1-\alpha} - (t-4,5)^{1-\alpha}) h(t-4,5). \quad (1.72)$$

Полиэфирлі полимербетон материалының жылжымалылық деформациясының (1.68-1.72) формулаларын ескеріп, есептелген мәндері 1.32-кестеде келтірілген.

Полиэфирлі полимербетон материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері (1.31-кесте) мен есептелген мәндерінен (1.32-кесте) тұрғызылған жылжымалылық қисығы 1.41-суретте көрсетілген.



● – тәжірибелік нүктелер, — - есептелген нүктелер.

Сурет 1.41 - Полиэфирлі полимербетон материалының $\sigma=30$ МПа және $\sigma=0$ кернеуіндегі жылжымалылық қисықтары

Зерттеу нәтижелерінен лездік деформацияның мәндері жүктеу-жүксіздеу периодының бірінші циклдік периодындағы мәндерінен 8-10% ерекшеленген. Алғашқы жүктеуден кейінгі периодында лездік деформацияның мәндері жүксіздену периодында аз бөлігі қайтымсыз болған [21, р. 108].

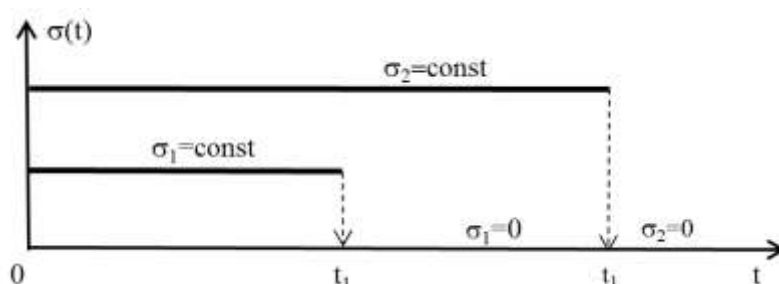
Кесте 1.31 - Полиэфирлі полимербетон материалының $\sigma=30$ МПа және $\sigma=0$ кернеуіндегі «жүктеу-жүксіздеу» циклдік жүктемедегі жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері

Уақыт t, сағ	Деформация $\varepsilon_e(t)$, %	Уақыт t, сағ	Деформация $\varepsilon_e(t)$, %	Уақыт t, сағ	Деформация $\varepsilon_e(t)$, %	Уақыт t, сағ	Деформация $\varepsilon_e(t)$, %	Уақыт t, сағ	Деформация $\varepsilon_e(t)$, %
0	0,0964	1	0,1036	2	0,106	3	0,1064	4	0,1089
0,17	0,1049	1,17	0,1108	2,17	0,1123	3,17	0,1118	4,17	0,1157
0,3	0,1093	1,3	0,1122	2,3	0,1140	3,3	0,1143	4,3	0,1182
0,5	0,1113	1,5	0,1135	2,5	0,1147	3,5	0,1144	4,5	0,1189
0,5	0,0207	1,5	0,0238	2,5	0,0252	3,5	0,0258	4,5	0,0284
0,67	0,0154	1,67	0,0184	2,67	0,0191	3,67	0,0210	4,67	0,0226
0,83	0,0146	1,83	0,0177	2,83	0,0180	3,83	0,0199	4,83	0,0210
1	0,0124	2	0,0165	3	0,0172	4	0,0188	5	0,0200

Кесте 1.32 - Полиэфирлі полимербетон материалының $\sigma=30$ МПа және $\sigma=0$ кернеуіндегі «жүктеу-жүксіздеу» циклдік жүктемедегі жылжымалылық деформациясының есептелген мәндері

Уақыт t, сағ	Деформация $\varepsilon_m(t)$, %	Уақыт t, сағ	Деформация $\varepsilon_m(t)$, %	Уақыт t, сағ	Деформация $\varepsilon_m(t)$, %	Уақыт t, сағ	Деформация $\varepsilon_m(t)$, %	Уақыт t, сағ	Деформация $\varepsilon_m(t)$, %
0	0,0942	1	0,0942	2	0,0942	3	0,0942	4	0,0942
0,17	0,1001	1,17	0,1001	2,17	0,1001	3,17	0,1001	4,17	0,1001
0,3	0,1012	1,3	0,1012	2,3	0,1012	3,3	0,1012	4,3	0,1012
0,5	0,1023	1,5	0,1023	2,5	0,1023	3,5	0,1023	4,5	0,1023
0,5	0,0081	1,5	0,0110	2,5	0,0127	3,5	0,014	4,5	0,0151
0,67	0,0028	1,67	0,0054	2,67	0,0070	3,67	0,0083	4,67	0,0093
0,83	0,0021	1,83	0,0045	2,83	0,0060	3,83	0,0072	4,83	0,0082
1	0,0018	2	0,0039	3	0,0053	4	0,0065	5	0,0074

Әрі қарай полиэфирлі полимербетон материалына ұзақ уақыт бойы жүктеме тиеліп, содан кейін алып тасталған [21, р. 108-109]. Сынақтар 1.42-суретте көрсетілгендей, жүктеу-жүксіздеу циклдік жүктеме сұлбасы бойынша жүргізілген.



Сурет 1.42 - «Жүктеу-жүксіздеу» циклдік жүктеме сұлбасы

1.42-суретте көрсетілген сұлба бойынша жасалған тәжірибелік сынақ нәтижелерінде, ең алдымен $\sigma_1=20$ МПа кернеуінде жүктелген үлгілер 500 сағатқа дейін, одан кейін $\sigma_2=40$ МПа кернеуінде 750 сағатқа дейін ұзақ уақытқа жүктелген. Жүктеме алынғаннан кейін өлшенген деформацияларының сәйкесті $t=1000$ сағ және $t=1500$ сағатқа дейін жылжымалылықтың қалпына келуі көрсетілген [21, р. 109]. Сынақ жүргізілген жүктемелердегі жылжымалылық деформацияларының тәжірибелік мәндері 1.33-кестеде келтірілген.

Кесте 1.33 - Полиэфирлі полимербетон материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері

Уақыт t , сағ	σ , МПа кернеуіндегі, деформация $\varepsilon_e(t)$, %		Уақыт t , сағ	σ , МПа кернеуіндегі, деформация $\varepsilon_e(t)$, %	
	$\sigma=20$	$\sigma=0$		$\sigma=40$	$\sigma=0$
0	0,0639	-	0	0,1308	-
50	0,0859	-	50	0,1676	-
360	0,1012	-	360	0,1984	-
500	0,1045	0,0515	500	0,2032	-
520	-	0,0371	750	0,2120	0,1019
550	-	0,0311	830	-	0,0598
600	-	0,0250	900	-	0,0500
700	-	0,0211	1000	-	0,0463
800	-	0,0180	1230	-	0,0432
900	-	0,0160	1430	-	0,0407
1000	-	0,0150	1500	-	0,0400

Жоғарыда сипатталған бойынша, $\sigma_0 = \sigma_1$, жүктемесіндегі жүктелу ұзақтығы $t_1=500$ сағат, ал $\sigma_0 = \sigma_2$, жүктемесіндегі жүктелу ұзақтығы $t_1=750$ сағатқа дейін екендігі белгілі.

Егер $t \leq t_1$ болғанда (сурет 1.42), (1.64) формуласы бойынша жылжымалылық деформациясы үшін келесі теңдеуді аламыз:

$$E\varepsilon(t) = \sigma_0 \left(1 + \frac{\delta}{1-\alpha} t^{1-\alpha} \right). \quad (1.73)$$

Егер $t \geq t_1$ болғанда (сурет 1.42), t_1 уақытында жүктемені үлгіден алып тастағаннан кейінгі жылжымалылықтың қалпына келуі (1.61) өрнекті ескеріп, келесі теңдеуді аламыз:

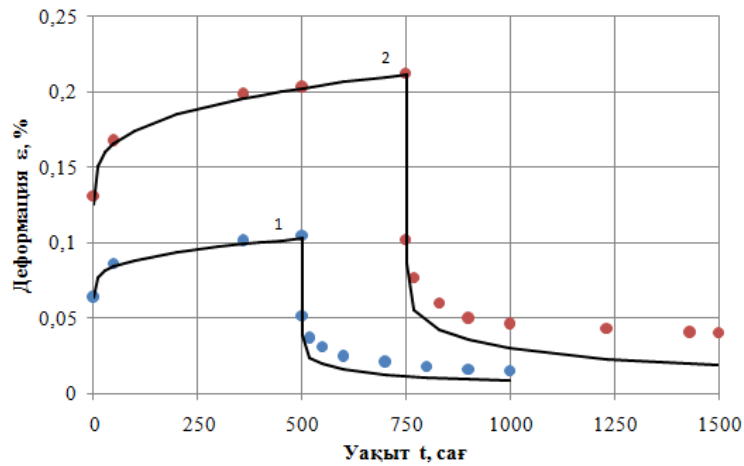
$$E\varepsilon(t) = \sigma_0 \frac{\delta}{1-\alpha} \left[t^{1-\alpha} - (t-t_1)^{1-\alpha} \right] \quad (1.74)$$

Бағдарлама бойынша анықталған полиэфирлі полимербетон материалының 10, 20, 30, 40 және 50 МПа кернеулеріндегі жылжымалылық параметрлері мынаған тең: $\alpha=0,7164$; $\delta=0,0296$. Сонымен бірге, 20 МПа және 40 МПа кернеулеріндегі шартты лездік деформация мәндері сәйкесінше 0,0639 % және 0,1258 % тең. Осы мәндерді ескере отырып, (1.73) және (1.74) теңдеулері бойынша жылжымалылық деформациясының мәндері есептелді (1.34-кесте).

Кесте 1.34 - Полиэфирлі полимербетон материалының жылжымалылық деформациясының есептелген мәндері

Уақыт t, сағ	σ, МПа кернеуіндегі, деформация $\varepsilon_m(t)$, %		Уақыт t, сағ	σ, МПа кернеуіндегі, деформация $\varepsilon_m(t)$, %	
	σ=20	σ=0		σ=40	σ=0
0	0,0639	-	0	0,1258	-
50	0,0841	-	50	0,1656	-
360	0,0993	-	360	0,1955	-
500	0,1028	0,0389	500	0,2023	-
520	-	0,0237	750	0,2116	0,0858
550	-	0,0197	830	-	0,0428
600	-	0,0163	900	-	0,036
700	-	0,0128	1000	-	0,0303
800	-	0,0108	1230	-	0,0231
900	-	0,0094	1430	-	0,0196
1000	-	0,0084	1500	-	0,0186

Полиэфирлі полимербетон материалының жылжымалылық деформациясының 1.33-кестедегі тәжірибелік мәндері мен 1.34-кестедегі есептелген мәндерінен жылжымалылық қисықтары тұрғызылды (сурет 1.43).



Сурет 1.43 - Полиэфирлі полимербетон материалының «жүктеу-жүксіздеу» периодындағы жылжымалылық қисықтары

Көріп отырғанымыздай, полиэфирлі полимербетон материалының жылжымалылық деформациясының есептелген мәндері тәжірибелік мәндерімен сәйкес келеді.

1.7 Тұрақты жүктеу жылдамдығы режимінде эпоксифенолды шыныпластик материалының жылжымалылығын зерттеу

Үлгілерді созуға сынауында жүктеу жылдамдығы тұрақты, $\dot{\sigma} = const$ және тұрақты температурада, $T = const$ кернеуді келесі түрде алайық:

$$\sigma(t) = \dot{\sigma}t, \quad (1.75)$$

$$\psi[\sigma(t)] = a\sigma^\gamma(t), \quad (1.76)$$

мұндағы a, γ – корреляция коэффициенттері, $a > 0; \gamma \geq 1$.

Жылжымалылық ядросы (1.3), (1.75) және (1.76) теңдеулерін ескере отырып, (1.2) интегралдық теңдеуден келесі жылжымалылық деформациясы мәндерін есептейтін теңдеуді аламыз:

$$\varepsilon_m(t, T) = a(\dot{\sigma}t)^\gamma \left[1 + \bar{\delta} \frac{\Gamma(1+\gamma)\Gamma(1-\bar{\alpha})}{\Gamma(2+\gamma-\bar{\alpha})} t^{(1-\bar{\alpha})} \right], \quad (1.77)$$

мұндағы жүктеу жылдамдығы $\dot{\sigma} > 0$; $\Gamma(\cdot)$ - гамма функция; $t \in [0, t_1]$; $\bar{\alpha} \in (0, 1)$.

Ең кіші квадраттар әдісін қолдана отырып, жылжымалылық параметрін $\bar{\delta} = \bar{\delta}(\bar{\alpha}, T)$ анықтаймыз:

$$\bar{\delta}(\bar{\alpha}, T) = \frac{\Gamma(2+\gamma-\bar{\alpha})}{\Gamma(1+\gamma)\Gamma(1-\bar{\alpha})} \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^m t_i^{2(\gamma+1-\bar{\alpha})}} \cdot \left[\frac{1}{a(\dot{\sigma})^\gamma} \sum_{i=1}^m \varepsilon_e(t_i, \dot{\sigma}) t_i^{(\gamma+1-\bar{\alpha})} - \sum_{i=1}^m t_i^{(2\gamma+1-\bar{\alpha})} \right], \quad (1.78)$$

мұндағы $\varepsilon_e(t, \dot{\sigma})$ - $\dot{\sigma} = const$ болғанда, тәжірибеліктен анықталған жылжымалылық деформациясының мәндері.

[15, с. 421-422] жұмысында эпоксифенолды шыныпластик материалына тұрақты жылдамдықтағы жүктемеде жылжымалылыққа тәжірибе жүргізілген. Сынақтар $T=30^\circ C$ температурада және $\dot{\sigma}=17,3$ МПа/сағ жүктеу жылдамдығында бірсыткік тікелей созуға сынау бойынша 6 сағат бойы орындалған.

Жүргізілген сынақ нәтижелеріндегі эпоксифенолды шыныпластик материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері, $\varepsilon_e(t)$ 1.35-кестеде келтірілген.

Кесте 1.35 - Эпоксифенолды шыныпластик материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері

Уақыт t, сағ	0	1	2	3	4	5	6
Деформация $\varepsilon_e(t)$, %	0	0,0420	0,1982	0,4061	0,6973	1,0969	1,7985

Осы $\dot{\sigma}=17,3$ МПа/сағ жүктеу жылдамдығында сыналған эпоксифенолды шыныпластик материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндеріне модельдеу жүргізейік.

Жоғарыда 1.32-суретте эпоксифенолды шыныпластик материалының 20, 30, 40, 50 және $60^\circ C$ температураларында сыналған 42,2; 84,5 және 105,6 МПа кернеулеріндегі жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндерінен «кернеу-деформация» тәуелділік графиктері тұрғызылды. Ондағы «кернеу-деформация» тәуелділігі дәрежелік функциямен жуықталады.

Эпоксифенолды шыныпластик материалының барлық температураларындағы 42,2; 84,5 және 105,6 МПа кернеулерінде тәжірибелік мәндерінің дәрежелік функцияның жуықталуынан алынған корреляция коэффициенттері 1.36-кестеде келтірілген.

Кесте 1.36 – Әрбір температуралардағы «кернеу-деформация» тәуелділік графиктерінің корреляция коэффициенттері

Уақыт t, сағ	0	1	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6	7	8
T=20° C температурада							
a	102,4	90,92	89,05	87,85	86,95	86,23	85,62
γ	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
T=30° C температурада							
a	91,74	81,94	79,65	78,12	76,95	76,0	75,19
γ	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
T=40° C температурада							

1.36 кестенің жалғасы

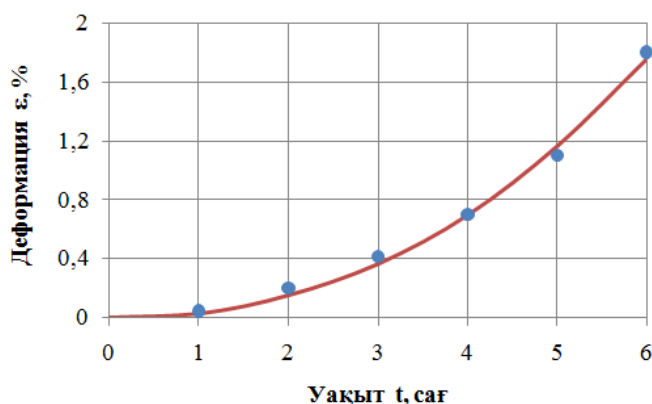
1	2	3	4	5	6	7	8
<i>a</i>	83,38	72,70	71,49	70,74	70,19	69,74	69,38
γ	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
T=50° C температурада							
<i>a</i>	77,35	66,77	65,53	64,76	64,19	63,74	63,36
γ	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
T=60° C температурада							
<i>a</i>	73,82	61,72	60,33	59,47	58,83	58,33	57,91
γ	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46

Эпоксифенолды шыныпластик материалының барлық температураларында сыналған 42,2; 84,5 және 105,6 МПа кернеулеріндегі жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндерінен «кернеу-деформация» тәуелділік графиктеріндегі жуықталудың барлық детерминация коэффициенттері 0,98 мәнінен кем емес болды. Бұл жуықталудың жоғары екендігін көрсетеді [91-92].

20, 30, 40, 50 және 60° C температураларындағы эпоксифенолды шыныпластик материалының (1.76) теңдеуі бойынша және 1.36-кестенің мәндері ескеріліп, орташа корреляция коэффициенттерінің мына мәндері алынды: $a=5,77 \cdot 10^{-5}$ және $\gamma=2,17$.

Әрі қарай $\dot{\sigma} = 17,3$ МПа/сағ жүктеу жылдамдығында T=30° C температурада эпоксифенолды шыныпластик материалының жоғарыда анықталған жылжымалылық ядросының ерекшелік параметрі $\alpha=0,6336$ мәнін және корреляция коэффициенттерін ескере отырып, (1.78) формуласы бойынша жылжымалылық параметрінің мәні мынаған тең: $\bar{\delta} = 0,0904$.

Эпоксифенолды шыныпластик материалының жылжымалылық деформациясының мәндері (1.77) формула бойынша есептелген қисығы мен тәжірибелік мәндерінен тұрғызылған қисығы 1.44-суретте көрсетілген.



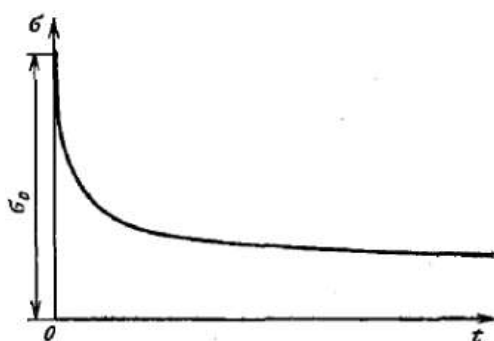
● – тәжірибелік нүктелер, — - есептелген нүктелер.

Сурет 1.44 - $\dot{\sigma} = 17,3$ МПа/сағ жүктеу жылдамдығындағы эпоксифенолды шыныпластик материалының жылжымалылық қисығы

Көріп отырғанымыздай, есептелген деформация мәндері мен тәжірибелік деформация мәндері арасындағы сәйкестік жақсы.

1.8 Реономды материалдардың жылжымалылық қисығынан кернеулердің релаксациясы қисықтарын салу

Жылжымалылық және кернеу релаксациясы өзара байланысты, сондықтан белгілі жылжымалылық қисығынан кернеу релаксациясы қисығын оңай құруға болады. Кернеу материалда уақыт бойынша өзгертін деформацияда тұрақты сақталса, уақыт өте келе ол азаяды. Бұл құбылыс кернеудің релаксациясы деп аталады [3, с. 625]. Бұл жағдайда кернеудің төмендеуі серпімді деформацияның біртіндеп төмендеуіне және тұтқырлысерпімді мен тұтқырлыпластикалық құраушы деформациялар шамаларының артуына алып келеді (сурет 1.45).



Сурет 1.45 – Кернеудің релаксациясы қисығы [3, с.625]

Материалдың изохронды жылжымалылық қисықтары түзу болса (1.19, 1.23, 1.26, 1.37-суреттерге қараңыз), онда тұтқырлысерпімділік теориясынан кернеу мен деформация арасындағы анықтауыш қатынастары келесі түрде жазылады [7, с.120-128, 8, с.29]:

$$\varepsilon(t, T) = \frac{1}{E} \left[\sigma(t, T) + \int_0^t K(t - \tau) \sigma(\tau, T) d\tau \right], \quad (1.79)$$

мұндағы E - материалдың серпімділік модулі;

T – сынау үлгілерінің температурасы, $T = \text{const}$.

(1.79) интегралдық теңдеудің шешімі, мына түрде болады:

$$\sigma(t, T) = E \left[\varepsilon(t, T) - \int_0^t R(t, \tau) \varepsilon(\tau, T) d\tau \right] \quad (1.80)$$

мұндағы $R(t - \tau)$ - релаксация ядросы.

Жылжымалылық теориясы негізінде кернеудің релаксациясы қисығының мәндерін есептеу қиын емес. Кернеудің релаксациясы қисығы сынақ нәтижелеріне байланысты емес, ол реономды материалдардың жылжымалылық параметріне тәуелді болады.

Енді ядроны мына түрде қарастырайық [3, с.628, 8, с. 22]:

$$I_\alpha(t-\tau) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)}(t-\tau)^{-\alpha} \quad (1.81)$$

мұндағы $\Gamma(1-\alpha)$ - гамма функция, $\alpha \in (0,1)$.

Тепе-теңдік қатынасында теңдеу келесі түрде сипатталады [8, с.28]:

$$\frac{1}{1+\beta I_\alpha^*} = 1 - \beta \mathfrak{E}_\alpha^*(-\beta), \quad (1.82)$$

мұндағы

$$\beta = \delta\Gamma(1-\alpha); \quad \beta > 0; \quad (1.83)$$

$$I_\alpha^* \cdot 1 = \int_0^t I_\alpha(t-\tau) d\tau; \quad (1.84)$$

$$\mathfrak{E}_\alpha^*(-\beta) \cdot 1 = \int_0^e \mathfrak{E}_\alpha(-\beta, t-\tau) d\tau. \quad (1.85)$$

мұндағы $I_\alpha(t-\tau)$ - (1.81) қатынаспен анықталады.

$\mathfrak{E}_\alpha(-\beta, t-\tau)$ - Работнов ядросы [8, с.29]:

$$\mathfrak{E}_\alpha(-\beta, t-\tau) = (t-\tau)^{-\alpha} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\beta)^n (t-\tau)^{n(1-\alpha)}}{\Gamma[(n+1)(1-\alpha)]}, \quad (1.86)$$

мұндағы $\Gamma(\cdot)$ - гамма функция;

τ - айнымалы интегралдау;

t - бақылау уақыты.

(1.82) теңдеуінен $\beta \mathfrak{E}_\alpha(-\beta, t-\tau)$ интегралдық оператордың $\beta \mathfrak{E}_\alpha^*(-\beta)$ релаксация ядросы жылжымалылық ядросына сәйкес келеді:

$$K(t-\tau) = \frac{\beta}{\Gamma(1-\alpha)}(t-\tau)^{-\alpha} \quad (1.87)$$

βI_α^* интегралдық оператор, ал β мәні – (1.83) қатынасынан анықталады.

Енді $\varepsilon(0) = \varepsilon_0 = const$ болсын. Сонда (1.80) өрнектен келесі кернеу релаксациясы теңдеуін аламыз [74, с. 184]:

$$\sigma(t, T) = \sigma_0 \left(1 - \beta \int_0^t \mathfrak{E}_\alpha(-\beta, t-\tau) d\tau \right) = \sigma_0 (1 - \beta t^{1-\alpha} F_2) \quad (1.88)$$

$$\text{мұндағы } \sigma_0 = E\varepsilon_0; \quad (1.89)$$

$$F_2(\alpha, x) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^n}{\Gamma[(1-\alpha)(n+1)+1]}, \quad (1.90)$$

мұндағы $x = \beta t^{1-\alpha}$ болса, $F_2(\alpha, x)$ мәні кестеден анықталады [78, с.11].

Сипатталған теңдеулерді тәжірибелікпен тексерейік.

ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta=90^\circ$) материалының кернеулердің релаксациясы.

[13, с. 392-393] жұмысындағы ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta = 90^\circ$) материалының 104,7; 209,4; 279,2 және 349,0 МПа кернеулеріндегі жылжымалылық ядросының параметрлерінің жоғарыда анықталған мәндері: $\alpha=0,8825$; $\delta=0,0048$. Осы анықталған параметрлерінің мәндерін ескере отырып, (1.83) теңдеуінен β параметрінің мәні мынаған тең: $\beta=0,0386$.

Шартты лездік деформацияның тұрақты 0,3478; 0,6957; 0,9276; 1,1595 % мәндерінде (1.88) теңдеуінен ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta = 90^\circ$) материалының кернеуінің релаксациясы келесі өрнекпен сипатталады:

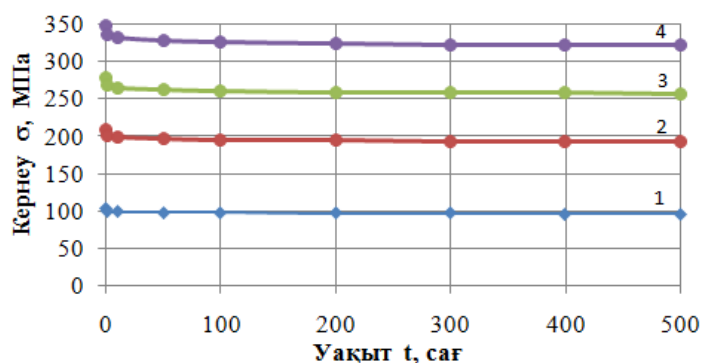
$$\sigma(t, T) = \sigma_0 \left(1 - 0,0386 \cdot t^{0,12} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-0,0386)^n \cdot t^{0,12n}}{\Gamma(0,12 \cdot (n+1) + 1)} \right). \quad (1.91)$$

(1.90) өрнегінің кестелік мәндерін ескере отырып, ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta=90^\circ$) материалының (1.91) теңдеуден кернеу релаксациясының есептелген мәндері 1.37-кестеде келтірілген.

Кесте 1.37 - ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta = 90^\circ$) материалының кернеулердің релаксациясының есептелген мәндері

Уақыт t, сағ	Кернеу σ , МПа			
	104,7	209,4	279,2	349,0
0	104,7	209,4	279,2	349,0
1	100,5853	201,1706	268,2274	335,2843
10	99,3708	198,7415	264,9887	331,2359
50	98,3342	196,6685	262,2246	327,7808
100	97,8212	195,6424	260,8566	326,0707
200	97,2872	194,5745	259,4326	324,2908
300	96,9522	193,9044	258,5392	323,1740
400	96,7009	193,4018	257,8691	322,3364
500	96,5020	193,0040	257,3386	321,6733

ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta = 90^\circ$) материалының 1.37-кестедегі мәндерінен кернеулердің релаксациясының қисықтары 1.46-суретте көрсетілді.



1- 0,3478 %; 2- 0,6957%; 3- 0,9276 %; 4- 1,1595 %

Сурет 1.46 – Әр түрлі деформациялардағы ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta = 90^\circ$) материалының кернеулердің релаксациясы қисықтары

СВМ арамидтік талшығы материалының кернеулердің релаксациясы.

[19, p. 274] жұмысында СВМ арамидтік талшығының 330, 1000 және 1650 МПа кернеулерінде жылжымалылық ядросының параметрлер мәндері жоғарыда ұсынылған әдіс бойынша анықталды: $\alpha=0,8745$; $\delta=0,0372$. Осы анықталған α және δ параметрлерінің мәндерін ескере отырып, (1.83) теңдеуден СВМ арамидтік талшығы материалының β параметрінің мәні табылды: $\beta=0,2791$.

Шартты лездік деформацияның тұрақты 0,2706 %; 0,7724 %; 1,2510 % мәндерінде (1.88) теңдеуінен СВМ арамидтік талшығы материалының кернеуінің релаксациясы келесі өрнекпен сипатталады:

$$\sigma(t, T) = \sigma_0 \left(1 - 0,2791 \cdot t^{0,13} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-0,2791)^n \cdot t^{0,13n}}{\Gamma(0,13 \cdot (n+1) + 1)} \right). \quad (1.92)$$

(1.90) өрнегінің кестелік мәндерін ескере отырып, СВМ арамидтік талшығы материалының, (1.92) теңдеуден кернеулердің релаксациясының есептелген мәндері 1.38-кестеде келтірілген.

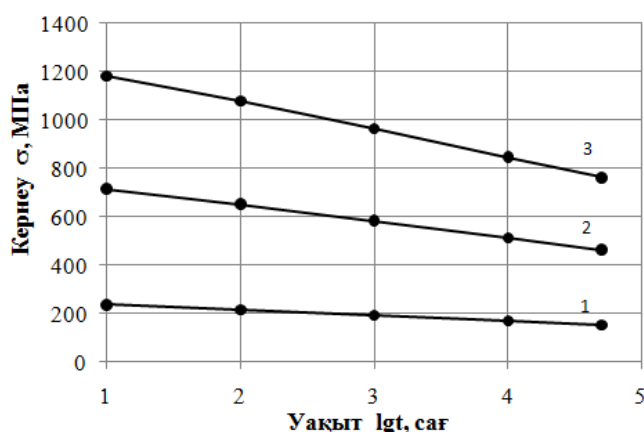
Кесте 1.38 - СВМ арамидтік талшығы материалының кернеу релаксациясының есептелген мәндері

Уақыт t, сағ	Кернеу σ , МПа			
	2	3	4	
1				
0	330	1000		1650
10	235,999	715,15		1179,998
100	215,325	652,5		1076,625
1000	192,72	584		963,6
2000	185,658	562,6		928,29
4000	178,53	541		892,65
6000	174,306	528,2		871,53

1.38 кестенің жалғасы

1	2	3	4
8000	171,336	519,2	856,68
10000	168,993	512,1	844,965
14000	165,495	501,5	827,475
16000	164,109	497,3	820,545
20000	161,799	490,3	808,995
26000	159,06	482	795,3
30000	157,575	477,5	787,875
36000	155,661	471,7	778,305
40000	154,572	468,4	772,86
46000	153,12	464	765,6
50000	152,262	461,4	761,31

СВМ арамидтік талшығы материалының 1.38-кестедегі мәндерінен кернеулердің релаксациясының қисықтары 1.47-суретте көрсетілген.



1- $\varepsilon_0 = 0,2706 \%$; 2- $\varepsilon_0 = 0,7724 \%$; 3- $\varepsilon_0 = 1,2510 \%$

Сурет 1.47 - Әр түрлі деформациялардағы СВМ арамидтік талшығы материалының кернеулердің релаксациясы қисықтары

EDT-10 шайыры материалының кернеулердің релаксациясы.

[19, р. 273] жұмысындағы EDT-10 шайырының 6,8; 13,6 және 20,4 МПа кернеулерінде жылжымалылық ядросының параметрлер мәндері жоғарыда ұсынылған әдіс бойынша анықталды: $\alpha = 0,6121$; $\delta = 0,0222$. Осы анықталған Абель ядросының (α , δ) параметрлерінің мәндерін ескере отырып, (1.83) теңдеуінен EDT-10 шайыры материалының β параметрінің мәні табылды: $\beta = 0,0508$.

Шартты лездік деформацияның тұрақты 0,2057 %; 0,4115 %; 0,6172 % мәндерінде (1.88) теңдеуінен EDT-10 шайыры материалының кернеуінің релаксациясы келесі өрнекпен сипатталады:

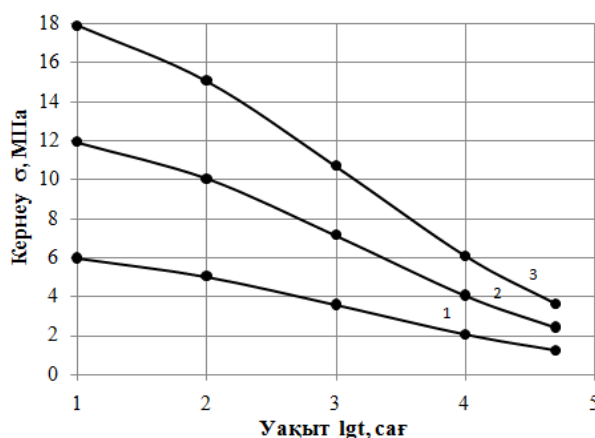
$$\sigma(t, T) = \sigma_0 \left(1 - 0,0508 \cdot t^{0,39} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-0,0508)^n \cdot t^{0,39n}}{\Gamma(0,39 \cdot (n+1) + 1)} \right). \quad (1.93)$$

(1.90) өрнегінің кестелік мәндерін ескере отырып, EDT-10 шайыры материалының, (1.93) теңдеуден кернеулердің релаксациясының есептелген мәндері 1.39-кестеде келтірілген.

Кесте 1.39 - EDT-10 шайыры материалының кернеулердің релаксациясының есептелген мәндері

Уақыт t, сағ	Кернеу σ , МПа		
0	6,8	13,6	20,4
10	5,9514	11,9027	17,8541
100	5,0123	10,0246	15,0368
500	4,0351	8,0702	12,1054
1000	3,5591	7,1182	10,6774
3000	2,7941	5,5882	8,3824
5000	2,4528	4,9055	7,3583
10000	2,0223	4,0446	6,0670
15000	1,7925	3,5850	5,3774
20000	1,6402	3,2803	4,9205
25000	1,5280	3,0559	4,5839
30000	1,4402	2,8805	4,3207
35000	1,3559	2,7118	4,0678
40000	1,2859	2,5718	3,8576
50000	1,2036	2,4072	3,6108

EDT-10 шайыры материалының 1.39-кестедегі мәндерінен кернеулердің релаксациясы қисықтары 1.48-суретте көрсетілген.



1- $\varepsilon_0 = 0,2057\%$; 2- $\varepsilon_0 = 0,4115\%$; 3- $\varepsilon_0 = 0,6172\%$

Сурет 1.48 - Әр түрлі деформациялардағы EDT-10 шайыры материалының кернеулердің релаксациясы қисықтары

Полиэфирлі полимербетон материалының кернеулердің релаксациясы.

[21, р. 105] жұмысында полиэфирлі полимербетон материалының 10, 20, 30, 40 және 50 МПа кернеулерінде жылжымалылық ядросының параметрлер мәндері жоғарыда ұсынылған әдіс бойынша анықталды: $\alpha=0,7164$; $\delta=0,0296$. Осы анықталған Абель ядросының параметрлерінің мәндерін ескере отырып, (1.83) теңдеуден полиэфирлі полимербетон материалының β параметрінің мәні табылды: $\beta=0,0939$.

Шартты лездік деформацияның тұрақты 0,0341; 0,0639; 0,0942; 0,1258; 0,1604 % мәндерінде (1.88) теңдеуінен полиэфирлі полимербетон материалының кернеуінің релаксациясы келесі түрде сипатталады:

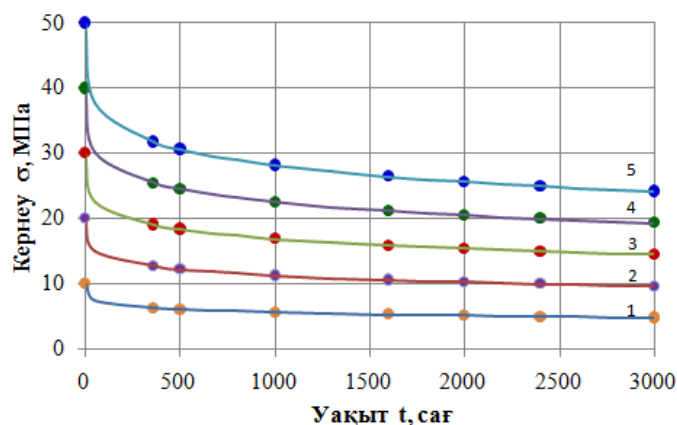
$$\sigma(t, T) = \sigma_0 \left(1 - 0,0939 \cdot t^{0,28} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-0,0939)^n \cdot t^{0,28n}}{\Gamma(0,28 \cdot (n+1) + 1)} \right) \quad (1.94)$$

(1.90) өрнегінің кестелік мәндерін ескере отырып, полиэфирлі полимербетон материалының (1.94) теңдеуден кернеулердің релаксациясының есептелген мәндері 1.40-кестеде келтірілген.

Кесте 1.40 - Полиэфирлі полимербетон материалының кернеулердің релаксациясының есептелген мәндері

Уақыт t, сағ	Кернеу σ , МПа				
	10	20	30	40	50
0					
50	7,552	15,104	22,656	30,208	37,760
360	6,349	12,698	19,047	25,396	31,745
500	6,124	12,248	18,372	24,496	30,620
680	5,909	11,818	17,727	23,636	29,545
800	5,794	11,588	17,382	23,176	28,970
1000	5,634	11,268	16,902	22,536	28,170
1300	5,444	10,888	16,332	21,776	27,220
1600	5,293	10,586	15,879	21,172	26,465
1800	5,207	10,414	15,621	20,828	26,035
2000	5,130	10,260	15,390	20,520	25,650
2200	5,060	10,120	15,180	20,240	25,300
2400	4,996	9,992	14,988	19,984	24,980
2600	4,938	9,876	14,814	19,752	24,690
2800	4,884	9,768	14,652	19,536	24,420
3000	4,833	9,666	14,499	19,332	24,165

Полиэфирлі полимербетон материалының 1.40-кестедегі мәндерінен кернеулердің релаксациясының қисықтары 1.49-суретте көрсетілді.



1- 0,0341 %; 2- 0,0639 %; 3- 0,0942 %; 4- 0,1258 %; 5- 0,1604 %

Сурет 1.49 – Әр түрлі деформациялардағы полиэфирлі полимербетон материалының кернеулердің релаксациясы қисықтары

1.9 Бөлім бойынша қысқаша қорытынды

1. Ю.Н. Работновтың изохронды жылжымалылық қисықтарының әдісі негізінде реономды материалдардың сызықты емес деформациялануын сипаттауда тиімді алгоритм ұсынылды. Ю.Н. Работнов ұсынған реономды материалдардың сызықты емес деформациялану процесіндегі сызықты емес интегралдық теңдеуіне математикалық сипаттамасы келтірілді. Тәжірибелік және модельдік реологиялық параметрлер және изохронды қисықтарының ұқсастық коэффициенттері туралы түсінік енгізілді.
2. Ю.Н. Работновтың сызықты емес интегралдық теңдеуіне бөлшек-экспоненциалды Работнов ядросы немесе Абель ядросын пайдалана отырып, сәйкесті жылжымалылығының параметрлерін α , ε_0 , δ , β және λ анықтаудың жақсартылған әдістері ұсынылды. Соның ішінде реономды материалдардың жылжымалылығын сипаттауда Ю.Н. Работновтың сызықтық емес интегралдық теңдеуінің Абель ядросының параметрлерін (α , δ) табудың жаңа тиімді әдістері жасалды. α параметрін табу үшін бисекция әдісі қолданылды.
3. Жылжымалылық параметрлерінің α және δ мәндерін жоғары дәлдікпен есептейтін алгоритм және сәйкесті компьютерлік бағдарлама әзірленді.
4. Реономды материалдар деформациясының физикалық сызықты (сызықты еместігін) бағалаудың тәжірибелік реологиялық параметр деп аталатын жаңа параметр енгізілді. Параметр көмегімен реономды процестер зерттелді.
5. Нейлон 6, ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) материалы, СВМ арамидтік талшығы, EDT-10 шайыры, $T=2000, 2200, 2400, 2600, 2800^\circ \text{C}$ температураларындағы поликристалды графит және $T=20, 30, 40, 50, 60^\circ \text{C}$ температураларындағы эпоксифенолды шыныпластик, полиэфирлі полимербетон материалдарының тәжірибелік сынақ нәтижелеріне ұсынылған әдістер мен сәйкесті әзірленген бағдарлама көмегімен жүзеге асыру процесі көрсетілді. Ұсынылған әдістеменің дәлдігі жоғары екендігі көрсетілді.
6. Сатылы және «жүктеу-жүксіздеу» циклдік жүктемелерде сыналған полиэфирлі полимербетон материалының зерттеу нәтижелерінен алынған

жылжымалылық деформациясының мәндеріне математикалық модельдеу жасалды. Әр түрлі деңгей кернеулеріндегі полиэфирлі полимербетон материалының деформациялану мәндері табылған математикалық теңдеулермен есептелді. Полиэфирлі полимербетон материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері мен есептелген мәндері арасындағы сәйкестік жақсы.

7. Тұрақты жүктеу жылдамдығындағы, яғни эпоксифенолды шыныпластик материалының $T=30^{\circ} \text{C}$ температурада және $\dot{\sigma}=17,3 \text{ МПа/сағ}$ жүктеу жылдамдығында бірсыткік тікелей созылу схемасы бойынша сыналған материалдың жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндеріне математикалық модельдеу жасалды. Материалдың жылжымалылық параметрі мен жылжымалылық деформациясы мәндері есептелді және анықталған мәндерінен жылжымалылық қисығы тұрғызылды. Есептелген деформация мәндері мен тәжірибелік деформация мәндері арасындағы сәйкестік жақсы екендігі көрсетілді.
8. Тұтқырлысерпімді материалдардың кернеулердің релаксациясы есептері шешілді. Реономды материалдардың жылжымалылық қисығынан кернеулердің релаксациясы қисықтары салынды.

2 АСФАЛЬТБЕТОН ҮЛГІЛЕРІНІҢ ЖЫЛЖЫМАЛЫЛЫҚ ПРОЦЕСІНЕ ЖҮКТЕУ РЕЖИМДЕРІНІҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

2.1 Асфальтбетон үлгілерін әзірлеу

Қазіргі уақытта асфальтбетонның механикалық қасиеттеріне әлемнің көптеген елдерінде әр түрлі деңгейдегі жүктеме жағдайлары мен температураларда күрделі (тәжірибелік және теориялық) зерттеулер жүргізілуде. Олардың ішінде, асфальтбетон материалының беріктігі мен шыдаммерзімі сипаттамаларын зерттеуде Қазақстандық ғалымдардың жұмысын жаңа бағытқа жатқызуға болады [35-38, 40, 48, 49, 52, 53, 67, 69, 70, 93-98].

Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институтында 5 жыл ішінде (2015-2020 жж.) асфальтбетон үлгілеріне әр түрлі жүктеу режимдері мен температураларда жүйелі түрде сынамалар жүргізілді. Тұрақты кернеулерде (0,0081 -ден 3,0 МПа –ға дейін) тікелей созылу схемасы бойынша асфальтбетон үлгілері 8 температурада сыналды: +60, +48, +36, +24, +12, 0, -12, -24 °С. Жалпы сыналған үлгілер саны 356 [70, с.376]. Алынған асфальтбетон үлгілері Қазақстан Республикасының сапа талаптарына сай әзірленген.

Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институтында сынауға алынған ұсақ түйіршікті ыстық тығыз асфальтбетон үлгілеріне Қазақстан стандарты ҚР СТ 1225-2013 [99] талаптарына сәйкес келетін 5-10 мм (20%), 10-15 мм (13%), 15-20 мм (10%) Жаңа-Алексеевқадан алынған (Алматы облысы) фракциялар, «Асфальтбетон-1» зауытынан алынған (Алматы қаласы) 0-5 мм (50%) құм мен Қордай тау жынысының (Жамбыл облысы) белсенді минералды ұнтағы (7%) қолданылады.

Сонымен бірге, асфальтбетон үлгілеріне Қазақстанның сапа талаптарын қанағаттандыратын ҚР СТ 1373-2013 БНД 100/130 маркалы битум қолданылады. Ал битум Павлодар өңдеу зауыты Батыс Сібірдің (Ресей) шикі мұнайынан тікелей тотығу әдісімен өндіріледі [100]. Superpave-тегі битум деңгейі PG 64-40 [101]. Битумның негізгі сапалық көрсеткіштері 2.1-кестеде келтірілген.

Кесте 2.1 - Битумның негізгі сапалық көрсеткіштері

Көрсеткіш атауы	Өлшем бірлігі	ҚР СТ 1373-2013 талаптары [100]	Мәндері
1	2	3	4
Пенетрация, 25°С, 100 гр., 5 с	0,1 мм	101-130	104
Пенетрация индексі	-	-1,0 ... +1,0	-0,34
Созылуы 25°С 0°С	см	≥90	140
		≥4,0	5,7

2.1 кестенің жалғасы

1	2	3	4
Жұмсарту температурасы	°С	≥43	46,0
Сыңғыштық температурасы	°С	≤-22	-25,9
Динамикалық тұтқырлығы 60°С	Па·с	≥120	175,0
Кинетикалық тұтқырлығы	мм ² /с	≥180	398,0

БНД 100/130 маркалы битумның асфальтбетондағы құрамы құрғақ минералды материал салмағымен есептегенде 4,8 % құрайды. Асфальтбетон үлгісінде пайдаланылған қиыршықтас Қазақстан стандартының ҚР СТ 1284-2004 талаптарына сәйкес келеді [102]. Қиыршықтастың сапалық көрсеткіштері 2.2-кестеде келтірілген.

Кесте 2.2 - Қиыршықтастың негізгі сапалық көрсеткіштері

Көрсеткіш атауы	Өлшем бірлігі	ҚР СТ 1284-2004 талаптары [102]	Мөлшері	
			Фракция 5-10 мм	Фракция 10-20 мм
Орташа тығыздық	г/см ³	-	2,55	2,62
Инелік және пластинкалы қиыршықтардың үлесі	%	≤25	13	9
Шаң түріндегі және балшық түріндегі бөлшектердің құрамы	%	≤1,0	0,3	0,2
Битуммен қосылуы	-	-	Қанағаттанарлық	Қанағаттанарлық

Асфальтбетон материалының Қазақстан стандарты ҚР СТ 1225-2013 талаптарының негізгі сапалық көрсеткіштері 2.3-кестеде көрсетілген.

Кесте 2.3 - Асфальтбетонның негізгі сапалық көрсеткіштері

Көрсеткіш атауы	Өлшем бірлігі	ҚР СТ 1225-2013 талаптары [99]	Мәндері
Орташа тығыздық	г/см ³	-	2,39
Сумен қанықтыру	%	1,5-4,0	2,3
Минералды бөліктің кеуектілігі	%	≤19	14
Асфальтбетонның кеуектілігі	%	2,5-5,0	3,8
Сығылу кезіндегі беріктік:	МПа		
0°С		≤13,0	7,0
20°С		≥2,5	3,4
50°С		≥1,3	1,4
Суға төзімділік	-	≥0,85	0,92
Жылжуға төзімділігі	МПа	≥0,38	0,39
Жарылуға төзімділігі	МПа	4,0-6,5	4,1

Үлгілерді даярлау. Ұзындығы 150 мм, ені 50 мм және биіктігі 50 мм болатын тікбұрышты призма түріндегі ұсақ түйіршікті ыстық тығыз асфальтбетон үлгілері келесі ретпен дайындалады. Алдымен асфальтбетон қоспалары көлемі 30 литр болатын зертханалық асфальтбетон араластырғышта дайындалады (сурет 2.1). Ашылып жабылатын араластырғыш электродвигательмен жүргізіледі. Онда қоспаларды көруге арналған арнайы терезе орнатылған. Араластырғыш қоспаларды бір қалыпты жылдамдықта барабан айналдырғышпен араластырады. Ол қалыпты тұрақты температурада жұмыс жасайды.



Сурет 2.1 - Араластырғыш барабан

Асфальтбетон үлгілерін әзірлеуге қосылатын қоспалар алдын ала белгіленген температурада қыздырылып, содан кейін араластырғыш барабанға кезекпен салынып отырады. Олардан кейін минералды ұнтақ пен битум

салынады. Әрі қарай, дайын болған асфальтбетон қоспасын тікбұрышты үлгідегі қалыпқа салады (сурет 2.2). 2.2-суретте екі түрлі қалып көрсетілген. Олардың сәйкесті стандартты өлшемдері мыналарға тең: 30,5 x 30,5 x 10,0 см. және 50,0 x 30,5 x 40,5 см.



Сурет 2.2 - Үлгіге арналған қалыптар

Қалыпқа салынған асфальтбетонды қоспаны Cooper (United Kingdom) компаниясының CRT-RC2S моделіндегі EN 12697-33 стандарты [103] бойынша 2.3-суретте көрсетілген роллерлі компактор көмегімен тығыздайды. Ол үлгілерді жүктеу көмегімен қажетті тығыздыққа дейін сығады. Құрылғы басқару панелімен логикалық бақылаушы (контроллер) бағдарлама көмегімен жүзеге асырылады. Бағдарламаны орындауда арнайы маман (оператор) жайма санын және жүктеме шамасын өзі тағайындайды.



Сурет 2.3 - Роллерлі компактор

Келесі қадамда, дайын болған асфальтбетонның тақта үлгілері 20° C температурада 24 сағат бойы салқындатылады. Қатайған тақта үлгілерінен арнайы кескіш арқылы тік бұрышты призма түріндегі асфальтбетон үлгілері кесіліп алынады (сурет 2.4). Ондағы арқалық өлшеміндегі ауытқу 2 мм аспайды.



Сурет 2.4 - Асфальтбетонды кесу құрылғысы

Тік бұрышты призма түріндегі асфальтбетон үлгілерінің өлшемі 50 x 50 x 150 мм тең (сурет 2.5).



Сурет 2.5 - Асфальтбетон үлгілері: квадрат плитка формасындағы 305x305x50 мм өлшемімен (сол жақ); тік бұрышты призма формасындағы 50x50x150 мм өлшемімен (оң жақ)

2.2 Асфальтбетонның тұрақты кернеудегі жылжымалылығы

Реономды материалдың (асфальтбетон) күйін анықтаудың негізгі әдістерінің бірі, ол үлгіге белгілі бір шамадағы жүкті жүктеу арқылы сынау болып табылады. Жүктемнің мұндай әдісі тәжірибе барысында үлгіге тұрақты кернеуді ұстап тұруымен орындалады.

Осындай әдіспен Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институтында 2.6-суретте көрсетілген арнайы әзірленген қондырғыда [104] асфальтбетон үлгілері тікелей созуға сынау тәжірибесінде үлгіге бір шамадағы жүкті жүктеу арқылы сыналды [36, 38].



Сурет 2.6 – Материалдың механикалық сипаттамаларын анықтауға арналған қондырғылар

Сынақ жүргізуге жоғарыда сипатталған ҚР стандартына сәйкес келетін өлшемі 50x50x150 мм болатын тік бұрышты призма түріндегі асфальтбетон үлгілері алынды (сурет 2.7).



Сурет 2.7 - Сынаққа арналған үлгілер

2.7-суретте көрсетілген асфальтбетон үлгілерінің үстіңгі және астыңғы бөлігіне желімделген пластина жапсырылады. Пластина жапсырылған тікбұрышты призма түріндегі асфальтбетон үлгілері әрі қарай сынақ жүргізуге қондырғының ішіне бекітіледі.

Үлгінің созылуындағы өзгерісі сағат түріндегі оң жақты және сол жақты индикаторлармен өлшенеді (сурет 2.8). Олардың көрсеткіштерін бейне камера бақылап тұрады. Үлгі тығыздығына, беріктігіне байланысты үлгілер әр түрлі уақытта қирайды. Нақты қираған уақытын, қалай қирағанын бейне камерадан білуге болады. Сондай-ақ, бейне камерадан асфальтбетон материалының қирау уақытына дейінгі жылжымалылық мәндерін, ұзақ беріктігін ала аламыз.



Сурет 2.8 - Сынаққа арналып орнатылған үлгі

Тұрақты жүктемеде сынауға жалпы саны 148 асфальтбетон үлгілері қолданылды. Асфальтбетон үлгілеріне түсірілген жүктемелер 0,036; 0,055; 0,084; 0,117; 0,135; 0,157; 0,185; 0,232; 0,260; 0,307; 0,457; 0,545; 0,638; 0,695 және 0,763 МПа-ға өзгеріп отырды. Тәжірибені зерттеу температурасы 22-24°C. Бірсыткік тікелей созуға сынауда асфальтбетон үлгілері толық қирау жүйесіне дейін жүзеге асырылды.

Сынау нәтижелерінен көретініміз, барлық кернеулерде үлгілер қирайды (сурет 2.9).



Сурет 2.9 - Сынақтан кейінгі үлгілер

Сонымен бірге, әрбір үлгінің қирау уақыты мен жылжымалылық деформациясының шекті мәндері әр түрлі болатынын көруге болады. Мысалы, 0,307 МПа кернеуіндегі 13 асфальтбетон үлгілерінің механикалық сипаттамалары 2.4-кестеде келтірілген.

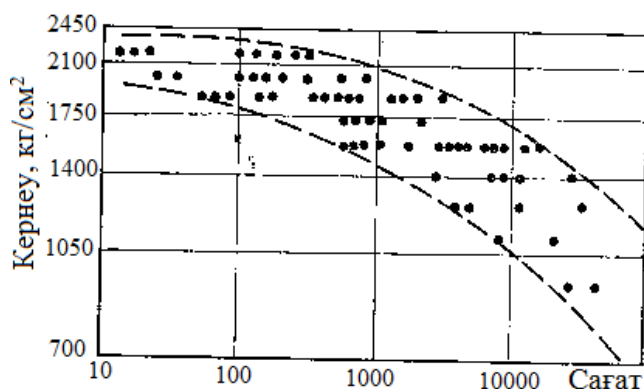
Кесте 2.4 - Асфальтбетон үлгілерінің 0,307 МПа кернеуіндегі механикалық сипаттамалары

Үлгілер саны	Үлгі нөмірі, №	Қирау уақыты t^* , с	Деформацияның қирау мезетіндегі мәні ε^* , %
1	2	3	4

2.4 кестенің жалғасы

1	2	3	4
13	155	265,4	2,3482
	156	222,9	1,6957
	157	95,5	1,0831
	158	99,4	1,0898
	159	78,1	1,2321
	295	194,6	1,2585
	296	74	1,4960
	297	149,4	1,2362
	298	154,2	1,9184
	299	58	1,0491
	300	95	1,9382
	301	130	1,4263
	302	42,4	1,8451

2.4-кестеден әрбір асфальтбетон үлгілерінің қирау уақыты және қирау мезетіндегі деформациялануы әр түрлі өзгертінін байқауға болады. Л.М. Качановтың «Қирау механикасының негіздері» (Основы механики разрушения) оқулығында [60, с. 11] «бірдей» үлгілерді сынауда тәжірибелік берілгендердің шашыраңқылығы табиғи қирауды болдырады деген. Үлгілер бірдей типті болаттан жасалған, бірақ әр түрлі құймалардан болса, онда шашыраңқылық көп болады. 2.10-суретте болаттың ұзақ мерзімді беріктігін анықтауда Гленнің тәжірибелік нүктелері логарифмдік тордағы 455° С температурада көрсетілген (0,1% С, 0,5%Mn). Үлгілер көрсетілген болат типінің 15 түрлі құймасынан жасалады. Шашыраңқылық нүктелі сызықпен шектелген. Қирау уақыты аз болғанда, шашыраңқылық кернеу бойынша $\pm 10\%$ құрайды, ал уақыт 100000 сағат үшін $\pm 30\%$ болады. Бірдей кернеуге таралу уақыты өте үлкен.

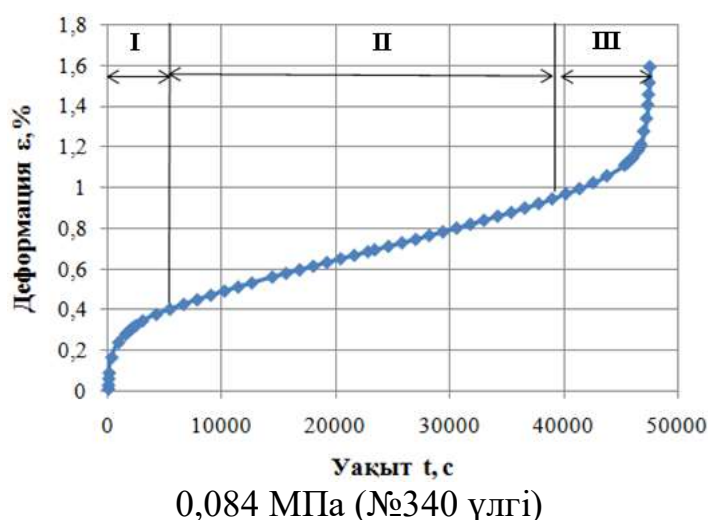


Сурет 2.10 - Гленнің тәжірибелік нүктелері [60, с. 12]

Осыны ескере отырып, асфальтбетон біртекті болғанымен, ондағы қолданылатын материалдар қоспасы жоғарыдағы зерттеуден көріп

отырғанымыздай әр түрлі болып келетіні асфальтбетон материалының беріктігіне әсер етеді.

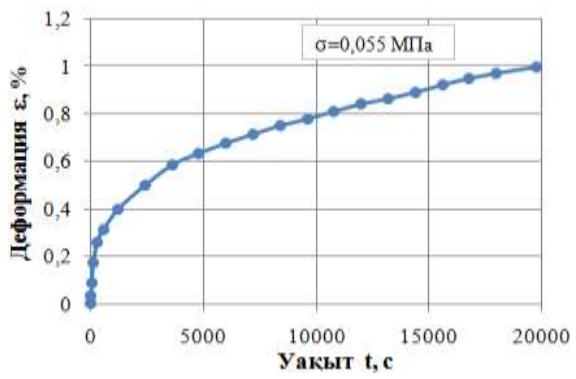
Асфальтбетон үлгілерінің 22-24° С температурада сыналған 0,036 МПа-дан 0,763 МПа кернеулеріндегі зерттеу нәтижесінен көретініміз, асфальтбетонның жылжымалылық қисығы үш сипаттамалық бөліктерге бөлінеді: I– жылдамдығы кемитін орнықтаған жылжымалылық бөлік, II– жылдамдығы тұрақты орныққан жылжымалылық бөлік және III– жылдамдығы өспелі қираудың алдындағы үдемелі жылжымалылық бөлік (сурет 2.11) [37, p.172, 105, с.129]. Осы бөліктердің салыстырмалы орташа ұзақтығы сәйкесінше 13%, 63% және 24% құрайды.



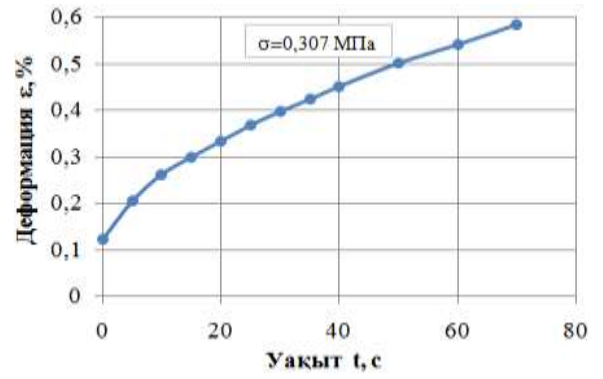
Сурет 2.11- Асфальтбетонның жылжымалылық қисығы

Практикалық есептерді шешуде материалдың сынақтар нәтижесіндегі жылжымалылық қисығын математикалық түрде сипаттау маңызды болып табылады. Материалдың жылжымалылық қисығының үшінші бөлігін инженерлік есептеулерде қарастырмайды. Себебі, оның төңірегінде материалдың қирауына әсер ететін зақымдардың жинақталу қарқыны байқалады [3, с.614-615, 61, с.28-29]. Материалдың жылжымалылық қисығының I және II бөліктеріне математикалық модельдеуді алу ең маңызды болып табылады.

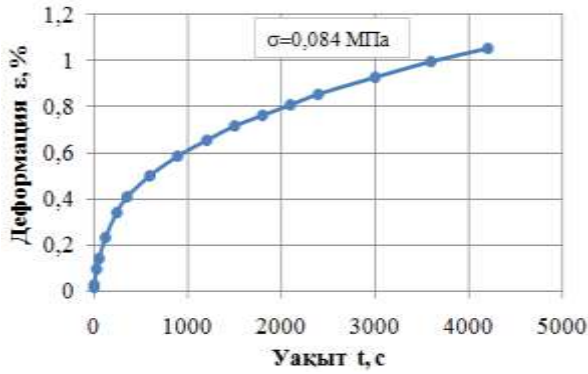
Асфальтбетон үлгілерінің 0,055; 0,084; 0,185; 0,307; 0,457; 0,545; 0,695 МПа кернеулеріндегі жылжымалылық қисығының I бөліктері 2.12-суретте көрсетілген.



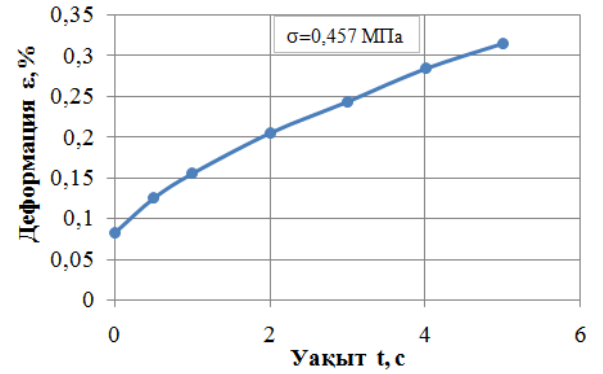
a)



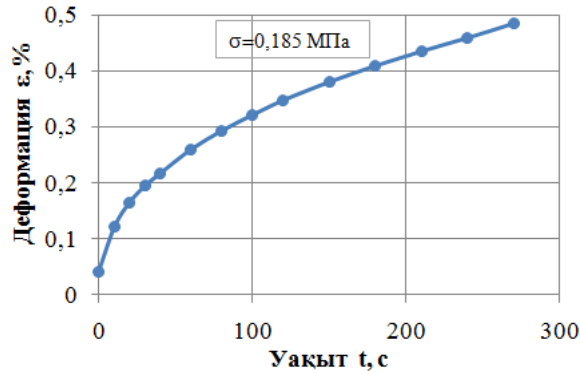
г)



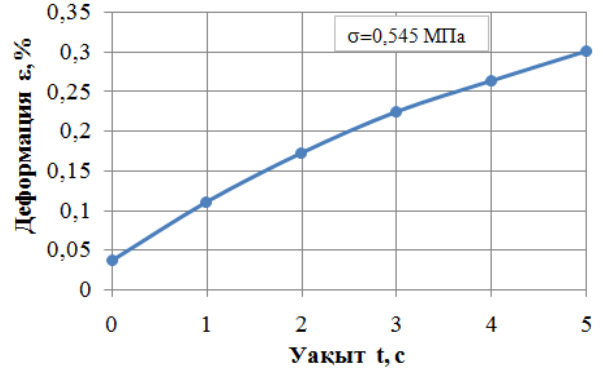
а)



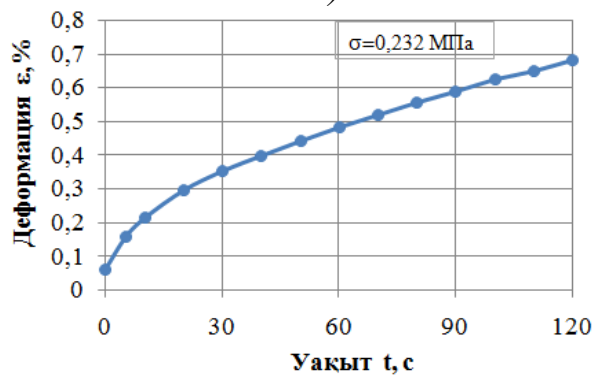
ж)



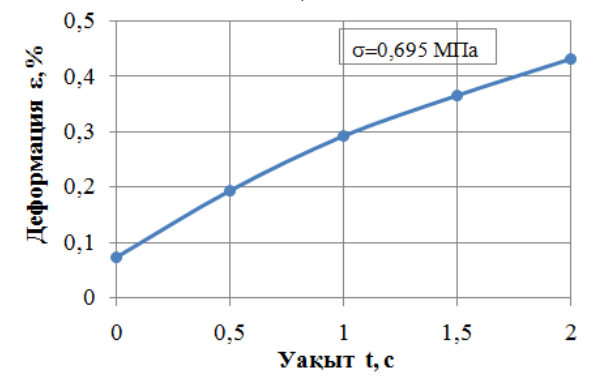
б)



д)



в)

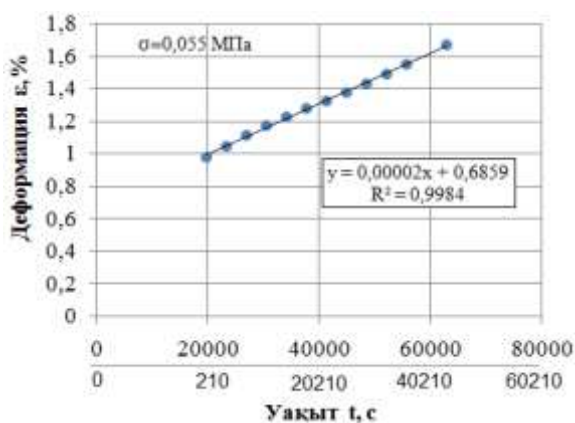


е)

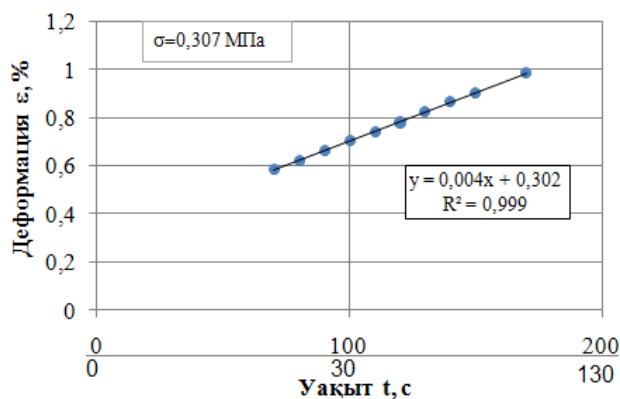
а) 0,055 МПа (№109 үлгі); ә) 0,084 МПа (№104 үлгі); б) 0,185 МПа (№314 үлгі);
 в) 0,232 МПа (№305 үлгі); г) 0,307 МПа (№155 үлгі); ғ) 0,457 МПа (№519 үлгі);
 д) 0,545 МПа (№521 үлгі); е) 0,695 МПа (№525 үлгі)

Сурет 2.12 – Әр түрлі деңгей кернеулеріндегі асфальтбетонның жылжымалылық қисықтары

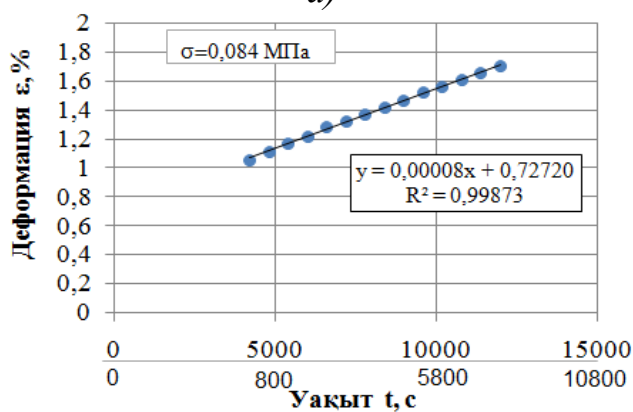
Асфальтбетон материалының жылжымалылық қисығының екінші бөлігі (II) түзу сызықты теңдеуімен және деформацияның тұрақты жылдамдығымен сипатталады [36, р. 6]. Тұрақты кернеудің әсерінен II бөлікте асфальтбетонның деформациясы тұрақты жылдамдықпен ε_2 жүреді. Төменде 0,055; 0,084; 0,185; 0,307; 0,457; 0,545; 0,695 МПа кернеулеріндегі асфальтбетон үлгілерінің жылжымалылық қисығының II бөліктері 2.13-суретте көрсетілген.



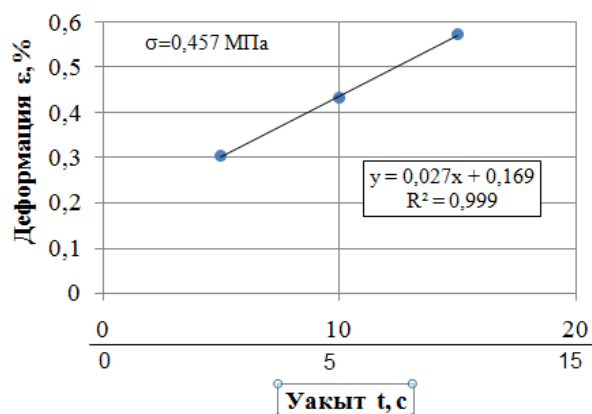
а)



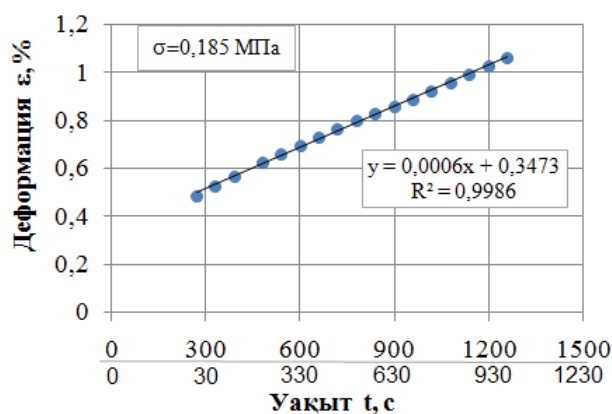
г)



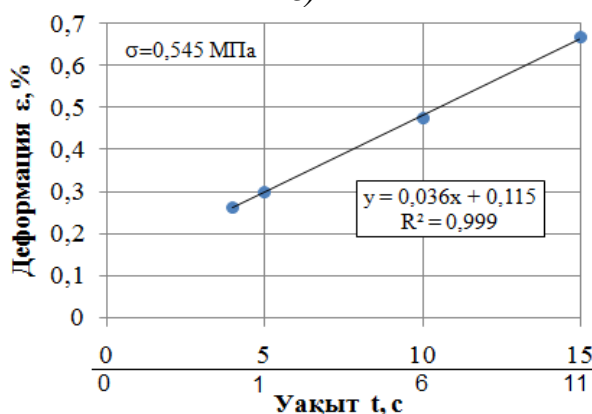
а)



е)



б)

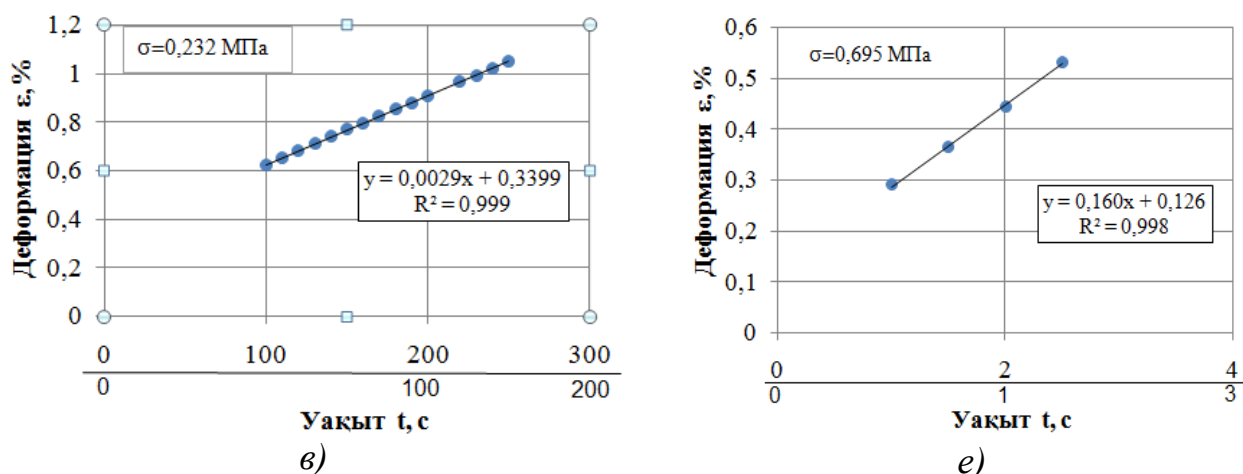


д)

а) 0,055 МПа (№109 үлгі); ә) 0,084 МПа (№104 үлгі); б) 0,185 МПа (№314 үлгі);
г) 0,307 МПа (№155 үлгі); е) 0,457 МПа (№519 үлгі); д) 0,545 МПа (№521 үлгі);

Сурет 2.13 – Әр түрлі деңгей кернеулеріндегі асфальтбетонның II бөлігінің жылжымалылық қисықтары, бет 1

Сурет 2.13, бет 2



в) 0,232 МПа (№305 үлгі); е) 0,695 МПа (№525 үлгі)

Асфальтбетонның жылжымалылық қисығының II бөлігінің басына дейінгі деформацияны ε_1 арқылы белгілесек, онда жылжымалылық деформациясының II бөлігінде кез-келген уақытындағы t толық деформациясы мына түрде сипатталады [36, p. 7-8]:

$$\varepsilon_2(t) = \varepsilon_1 + \dot{\varepsilon}_2 \cdot t, \quad (t_1 < t \leq t_2), \quad (2.1)$$

мұндағы $\varepsilon_2(t)$ – уақыт t мезетіндегі жылжымалылық деформация, %;

ε_1 – жылжымалылық қисығының II бөлігіне дейінгі деформация, %;

$\dot{\varepsilon}_2$ – орныққан жылжымалылық жылдамдығы, %/с;

t – уақыт, с.

2.3 Сатылы жүктемеде асфальтбетон үлгілерін тәжірибелік зерттеу

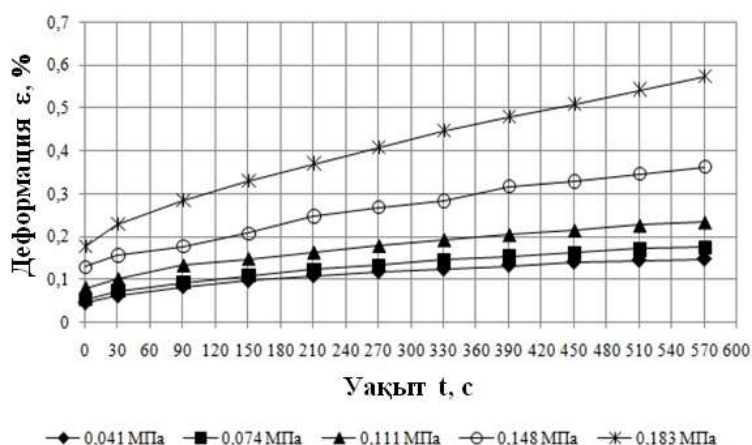
Күнделікті өмірде әр түрлі салмақтағы автокөліктер жол бойымен қозғалады. Олардың осьтік жүктемелері мен жол бойына күш түсу қарқыны да кезекпен өзгеріп отырады. Кезекпен түсетін жүктемелер мен олардың мөлшері асфальтбетон материалының бұзылуына әсер етеді. Оларды бағалауда Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институтында асфальтбетон үлгілеріне сынақтар жүргізілді [38, p.12-15]. Сынақ жүргізуге жоғарыда сипатталған әдіспен әзірленген тікбұрышты призма түріндегі, өлшемі 50x50x150 мм болатын асфальтбетон үлгілері пайдаланылды. Сынақтар тікелей созылу сұлбасы бойынша арнайы әзірленген қондырғыда [104] сатылы жүктеме бойынша жүргізілді.

Жүргізілген сынақтарда кернеулер тұрақты және олар 0,041; 0,074; 0,111; 0,148 және 0,183 МПа-ға тең. Сынақ жүргізу ұзақтығы бірдей және ол 570 секундқа тең. Әрбір тұрақты жүктемеде асфальтбетонның параллель 10 үлгісі $T=22-24^{\circ} C$ температурада сыналды. Асфальтбетон үлгілеріне жүргізілген сынақ нәтижелерінің жылжымалылық деформациясының мәндері 2.5-кестеде келтірілген.

Кесте 2.5 - Асфальтбетонның жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері

Уақыт t, с	Кернеуіндегі σ , МПа, деформация $\epsilon_c(t)$, %				
	0,041	0,074	0,111	0,148	0,183
0	0,0475	0,0543	0,0805	0,1313	0,1782
30	0,0633	0,0728	0,1018	0,1584	0,2305
90	0,0849	0,0932	0,1338	0,1782	0,2855
150	0,0988	0,1102	0,1491	0,2084	0,3310
210	0,1099	0,1232	0,1643	0,2484	0,3710
270	0,1194	0,1346	0,1795	0,2696	0,4081
330	0,1255	0,1457	0,1937	0,2839	0,4482
390	0,1339	0,1546	0,2055	0,3184	0,4812
450	0,1415	0,1627	0,2158	0,3293	0,5105
510	0,1460	0,1713	0,2273	0,3478	0,5433
570	0,1488	0,1759	0,2349	0,3632	0,5741

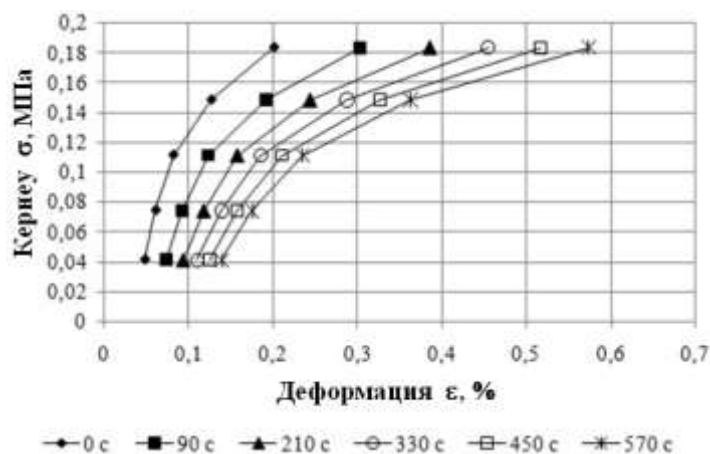
Асфальтбетонның әр түрлі кернеулердегі 2.5-кесте бойынша тұрғызылған жылжымалылық қисықтары 2.14-суретте көрсетілген.



Сурет 2.14 - Асфальтбетонның әр түрлі кернеулеріндегі жылжымалылық қисықтары [38, р.13]

Көріп отырғанымыздай, бұл жылжымалылық қисықтары - кернеудің өсуімен бірқалыпты өзгеріп отырады. Кернеудің өсуімен шартты лездік деформация шамасы да ($t=0$ болғанда) өседі және жылжымалылық қисықтарының көлбеуі де артады.

Әрі қарай, әр түрлі жүктеменің ұзақтық әрекетіне сәйкес келетін кернеу мен деформация мәндерін қолдана отырып, изохронды жылжымалылық қисықтарын тұрғызуға болады (сурет 2.15).

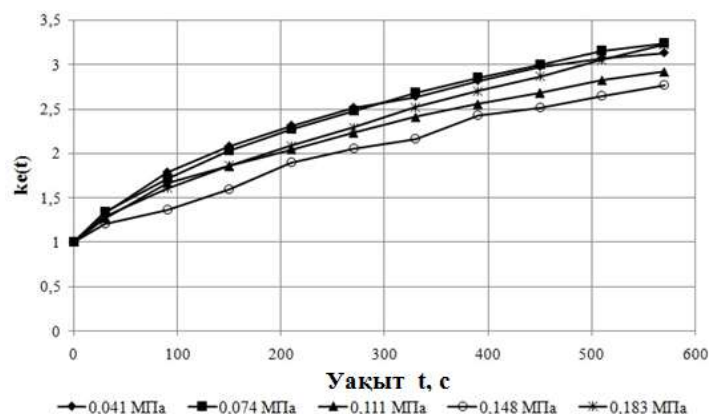


Сурет 2.15 -Асфальтбетонның изохронды жылжымалылық қисықтары [38, р.13]

Көріп отырғанымыздай, $T=22-24^{\circ} \text{C}$ температурада асфальтбетон сызықты емес деформацияланады және кернеу-деформация арасындағы байланыстың сызықты емес дәрежесі кернеу мен деформация ұзақтығына байланысты артады. Асфальтбетон материалының деформациясының сызықты еместігі басқа зерттеушілермен де ескерілген [106-107]. Сондай-ақ, изохронды жылжымалылық қисықтары ұқсас екендігін атап өткен жөн (сурет 2.15). Ұқсастық қасиеті бойынша, жылжымалылық қисығының біреуі белгілі болса, онда қалған басқа изохронды жылжымалылық қисықтарын алуға болады.

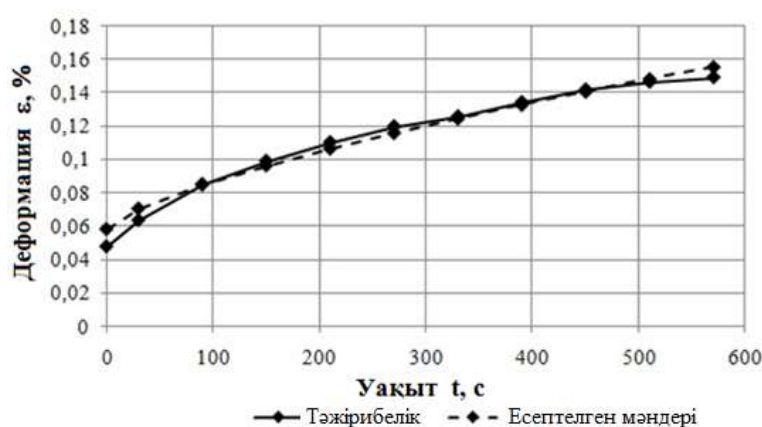
Қазіргі уақытта жол ғылымында және тәжірибеде асфальтбетонның механикалық қасиеттері қолданылатын жүктеме мөлшері мен оның әрекет ету ұзақтығына, температураға тәуелді екендігі белгілі және бұл тәуелділікті сызықты тұтқырлысерпімділік теориясын қолдана отырып нақты сипаттауға болады [108-111]. Жүргізілген сынақ нәтижесінен асфальтбетонның жылжымалылық деформациясының сызықты еместігіне сызықты емес тұтқырлысерпімділік теориясын қолдану қажет екенін көрсетеді.

2.5-кестедегі берілгендерді қолдана отырып, (1.23) формуласымен есептелген нәтижелері бойынша тұрғызылған әр түрлі кернеулердегі тәжірибелік реологиялық параметрінің графигі 2.16-суретте көрсетілген.



Сурет 2.16 - Әр түрлі кернеулердегі асфальтбетонның тәжірибелік реологиялық параметрінің графиктері [38, р.14]

Асфальтбетонның әр түрлі кернеулердегі тәжірибелік реологиялық параметрлері бір қисыққа біріктірілмейтіні анық көрінеді, олардың көпшілігі бір-бірінен айтарлықтай ерекшеленеді. Сонымен қатар, бұл қарастырылған температура мен кернеулерде асфальтбетонның деформациясының айтарлықтай сызықты еместігін көрсетеді. Біздің жағдайымызда, кернеу 0,041 МПа болатын асфальтбетонның жылжымалылық қисығы (1.4) тендеуімен Абель ядросын қолдана отырып жуықталған. Жылжымалылық параметрлерінің мәндері (1.12) және (1.10) өрнектерін және шартты лездік деформацияның мәнін анықтайтын (1.33) формуласын ескере отырып, бағдарламадан жылжымалылық параметрлерінің келесі мәндері табылды: $\alpha=0,3$; $\delta=0,0138$; $\varepsilon_0^m=0,058$. Асфальтбетонның 0,041 МПа кернеуіндегі тәжірибелік және есептелген жылжымалылық қисықтарының графигі 2.17-суретте көрсетілген.



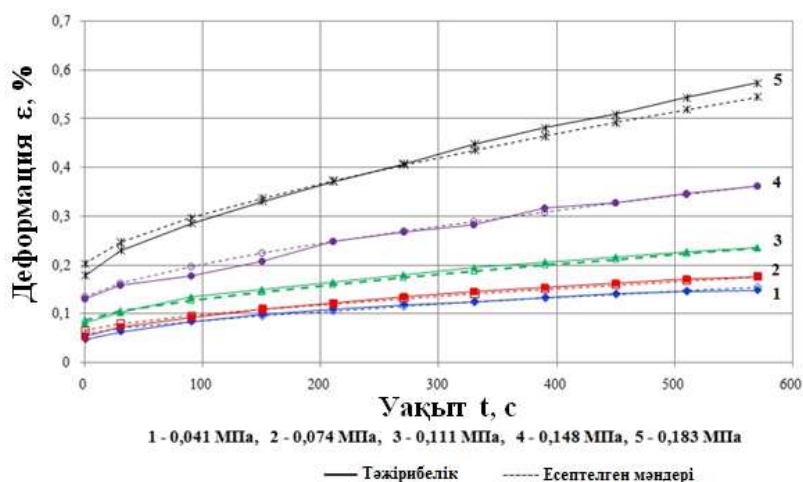
Сурет 2.17 - Асфальтбетонның 0,041 МПа кернеуіндегі тәжірибелік және есептелген жылжымалылық қисығы [38, р.14]

Әрі қарай, қалған басқа кернеулердегі шартты лездік деформацияның ε_0^m мәндерін (1.33) формула бойынша есептеу қажет. Ол үшін жүктеме ұзақтығының бір мәнін таңдаймыз, мысалы 570 секунд. Таңдалған жүктеме ұзақтығы мен жылжымалылық параметрлерінің α және δ белгілі мәндерінде (1.29) өрнегі бойынша $k_m(570) = 2,6745$ екені табылды. 2.5-кестеден, $t = 570$ секунд болғанда, 0,074 МПа, 0,111 МПа, 0,148 МПа және 0,183 МПа кернеулердегі жылжымалылық деформациясының сәйкесті мәндері мыналарға тең: 0,1759 %, 0,2349 %, 0,3632 % және 0,5741 %. (1.33) тендеуінен барлық кернеулердегі асфальтбетонның шартты лездік деформациясының мәндері табылды: 0,0658 %, 0,0878 %, 0,1358 % және 0,2037 %.

Ең кіші кернеуден басқа әр түрлі кернеулердегі асфальтбетонның жылжымалылық деформациясының есептелген мәндері (1.34) формуламен анықталды. Уақыттың алғашқы сәттеріндегі ең жоғары кернеу 0,183 МПа жылжымалылық деформациясының есептелген мәндері тәжірибелік мәндерге дәл сәйкес келмейтіні белгілі болды. Сондықтан, әр түрлі кернеулердегі асфальтбетон материалының жылжымалылық деформациясының (1.27) өрнегін ескере отырып, орташа тәжірибелік реологиялық параметрінің, $\bar{k}_e(t, T)$

мәндерінен қайта анықталды. Сонда шартты лездік деформацияның 0,183 МПа кернеуіндегі жаңа мәні 0,2037 % тең болды.

Асфальтбетонның барлық кернеулердегі есептелген және тәжірибелік жылжымалылық қисығының салыстырмалы мәндері 2.18-суретте көрсетілген.



Сурет 2.18 - Асфальтбетонның әр түрлі кернеулердегі тәжірибелік және есептелген жылжымалылық қисықтары [38, р.15]

Көріп отырғанымыздай, барлық кернеулерде есептелген қисықтар тәжірибелік қисықтармен сәйкес келеді.

Асфальтбетон үлгілерін сатылы жүктеме сұлбасы бойынша сынауда [40, р.6-7] еңбегінде тәжірибелік зерттеулер жүргізілген. Зерттеу нәтижелерінен үлкен және кіші жүктемелерді кезекпен салу асфальтбетонның қирау уақытына әсер ететіні анықталған. Онда үлкен кернеудің әсер ету әрекеті жүктеудің кіші кернеуіне қарағанда едәуір аз болуымен түсіндіріледі. Алдымен кіші жүктемеден үлкен жүктемені жүктегенде асфальтбетон үлгілерінің тез қирауы байқалған.

2.4 Асфальтбетон үлгілерін тұрақты жүктеу жылдамдығы режимінде зерттеу

Автокөлік жолдары мен топырақтардың деформациясы және беріктік сипаттамалары жүктеме мөлшері мен ұзақтығына айтарлықтай тәуелді екені белгілі. Әр түрлі осьтік жүктемелері бар (13 тоннаға дейін және одан да көп) көліктер заманауи автокөлік жолдары бойымен қозғалады және олардың жылдамдықтары жол жағдайына байланысты әр түрлі болады [51, с.153-155, 58, с.65-66, 59, с.269-271]: аялдамаларда, қиылыстарда, шлагбаум алдында және т.б. қозғалыс жылдамдығы 0-ге тең, ал автокөлікті жүргізу аумақтарында 200-220 км/сағ және одан да көп болуы мүмкін.

Жоғарыда келтірілген ережелерге сәйкес жүктеу жылдамдығының жол материалдарына, оның ішінде асфальтбетон мен топырақтың деформациясы мен беріктік қасиеттеріне әсерін зерттеудің маңызды екенін көрсетеді.

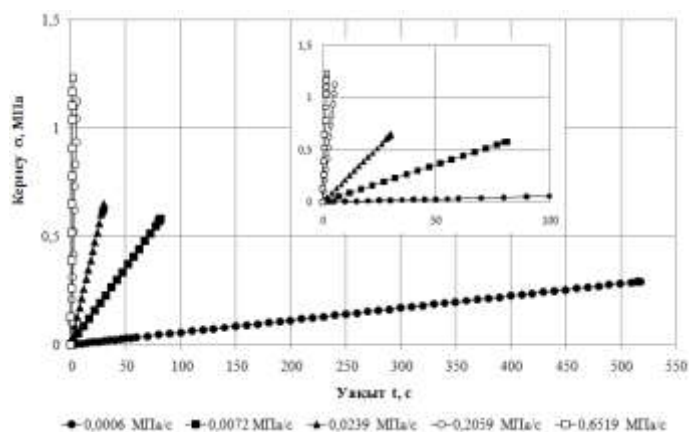
Осы мақсатта Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институтында арнайы құрастырылған қондырғыда [104] (сурет 2.19) тұрақты жүктеу жылдамдығы режимінде ұсақ түйіршікті ыстық тығыз асфальтбетон үлгілеріне (өлшемі 50x50x150 мм) тікелей созылу схемасы бойынша сынақтар жүргізілді [53, 69]. Мұндай жүктемеде майда шойын ұсақтамалары және өлшемі бірдей құрғақ құмдар жүктеме сауыттарының саңылауы арқылы өткізілді. Берілген жүктеме жылдамдығына сәйкес келетін сауыттың саңылауының өлшемі (диаметр) алдын-ала орнатылды. Сынақ жүргізу температурасы 22-24° С тең. Осы әдіс бойынша жалпы саны 57 асфальтбетон үлгілері қирауға дейін сыналды.



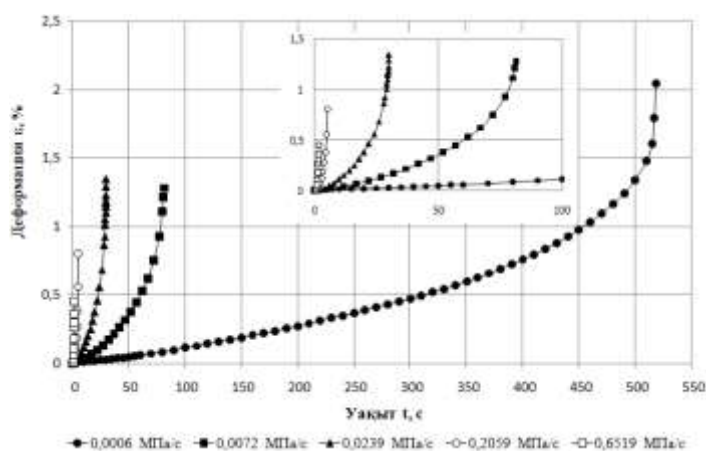
Сурет 2.19 - Материалдардың механикалық сипаттамаларын анықтауға арналған қондырғы

Зерттеудегі жүктеу жылдамдықтары мыналарға тең (МПа/с): 1 - 0,000563; 2 - 0,001698; 3 - 0,005507; 4 - 0,007244; 5 - 0,015137; 6 - 0,023918; 7 - 0,048869; 8 - 0,058036; 9 - 0,205869; 10 - 0,467757; 11 - 0,651864. Көріп отырғанымыздай, жүктеу жылдамдығы әр түрлі ауқымда өзгереді – 1158 (шамамен 1200) есе.

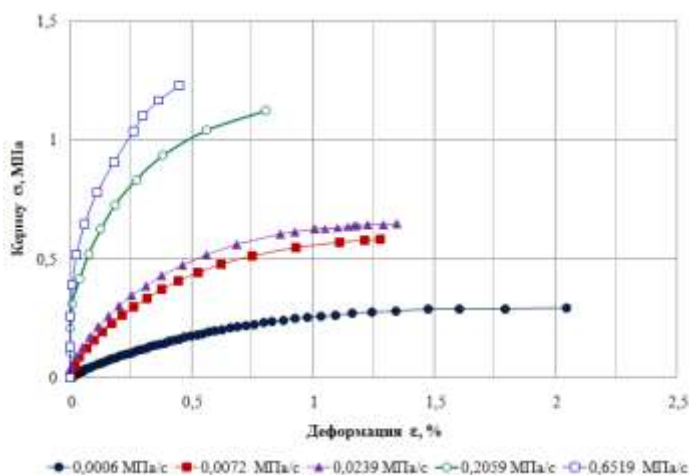
Жоғарыда сипатталған әдіспен жүргізілген сынақтардың нәтижелері бойынша кернеудің, деформацияның уақыт бойынша өзгерісінің графиктері және «кернеу-деформация» тәуелділік графиктері салынды. Түсінікті болу үшін 5 жүктеу жылдамдығындағы тұрғызылған графиктер 2.20-2.22 суреттерде көрсетілген. Көріп отырғанымыздай, кернеудің уақыт бойынша сызықты өзгерісінен (сурет 2.20) деформация сызықты емес өзгереді (сурет 2.21). Асфальтбетонның сызықты емес деформациялануы кернеудің артуымен өседі. 2.22-суреттен деформацияның сызықты екенін қабылдауға және серпімділік модулін енгізуге болатын бастапқы бөлікті ерекшелеп алу өте қиын.



Сурет 2.20 - Әр түрлі жүктеу жылдамдықтарындағы кернеудің уақыт бойынша өзгеріс графиктері



Сурет 2.21 - Әр түрлі жүктеу жылдамдықтарындағы деформацияның уақыт бойынша өзгеріс графиктері



Сурет 2.22 - Әр түрлі жүктеу жылдамдықтарындағы «кернеу-деформация» тәуелділігінің графиктері

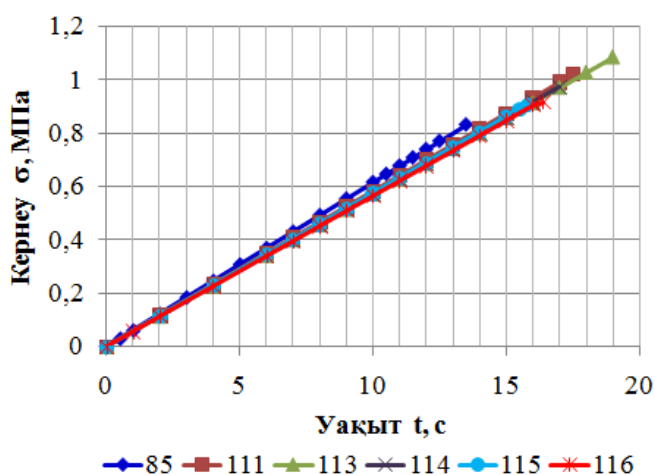
$\dot{\sigma} = 0,058$ МПа/с жүктеу жылдамдығындағы жүктемеде асфальтбетон материалының әрбір үлгілеріндегі (2.6-кесте) сынақ нәтижелерінен кернеудің,

деформацияның және «кернеу-деформация» тәуелділік графиктері тұрғызылды [53, р. 67].

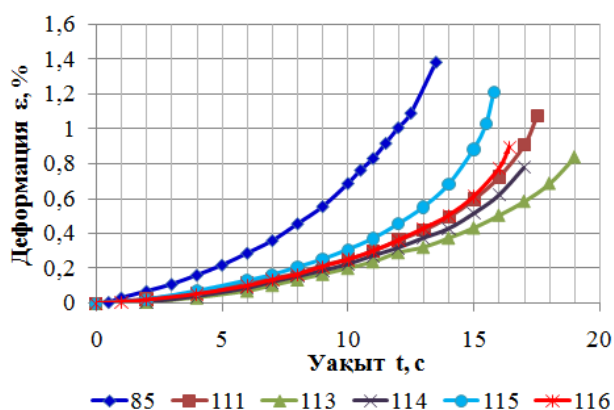
Кесте 2.6 - Асфальтбетон үлгілерін сынау кезіндегі орташа және жеке жүктеу жылдамдықтары

Орташа жүктеу жылдамдығы, МПа/с	Жүктеу жылдамдығы, МПа/с	Асфальтбетон үлгілерінің жеке нөмірлері
0,058	0,062	85
	0,058	111
	0,057	113
	0,057	114
	0,057	115
	0,057	116

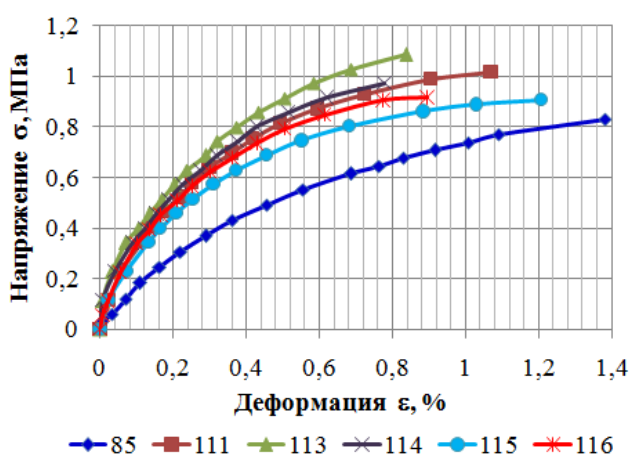
$\dot{\sigma}=0,058$ МПа/с жүктеу жылдамдығындағы графиктер 2.23-2.25 суреттерде көрсетілген [53, р. 66]. Көріп отырғанымыздай, кернеудің сызықты өзгерісінде (сурет 2.23) деформацияның уақыт бойынша өзгерісі сызықты емес болады (сурет 2.24) және «кернеу-деформация» тәуелділігінен тұрақты жүктеу жылдамдығында әрбір асфальтбетон үлгілерінің жылжымалылық деформациясының сызықты емес өзгеретінін көруге болады. 2.25-суретте $\dot{\sigma} = 0,058$ МПа/с жүктеу жылдамдығы асфальтбетонның әрбір үлгісі бойынша көрсетілген. Асфальтбетонның сызықты емес деформациялануы кернеудің артуымен өседі.



Сурет 2.23 - Кернеудің уақыт бойынша өзгеріс графиктері (орташа жүктеу жылдамдығы $\dot{\sigma} = 0,058$ МПа/с)



Сурет 2.24 - Деформацияның уақыт бойынша өзгеріс графиктері (орташа жүктеу жылдамдығы $\dot{\sigma} = 0,058$ МПа/с)



Сурет 2.25 - «кернеу-деформация» тәуелділік графиктері (орташа жүктеу жылдамдығы $\dot{\sigma} = 0,058$ МПа/с)

Әрі қарай, асфальтбетон үлгілерінің 11 жүктеу жылдамдығындағы жүргізілген сынақ нәтижелеріндегі жылжымалылық қисығына модельдеу жүргізейік.

$\dot{\sigma} = 0,651864$ МПа/с жүктеу жылдамдығындағы асфальтбетонның жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндерін қарастырайық (2.7-кесте).

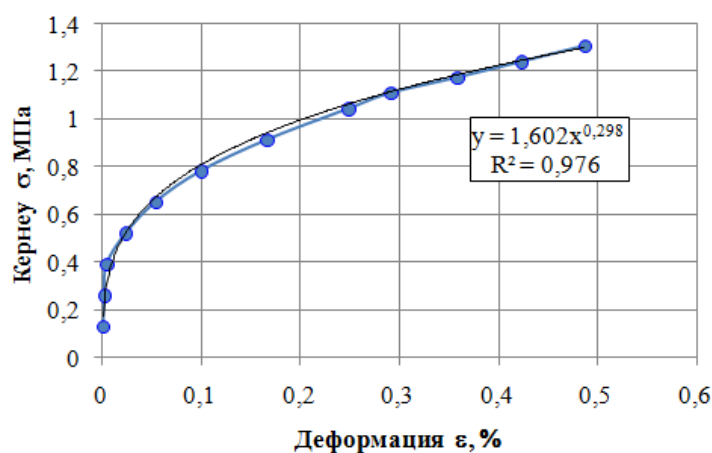
Кесте 2.7 - Асфальтбетонның тұрақты жүктеу жылдамдығындағы 0,651864 МПа/с жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері

Уақыт t, с	$\dot{\sigma} = 0,651864$ МПа/с жүктеу жылдамдығындағы	
	деформация $\varepsilon_e(t)$, %	кернеу $\sigma(t)$, МПа
1	2	3
0	0	0
0,2	0,0006	0,1304
0,4	0,0014	0,2607

2.7 кестенің жалғасы

1	2	3
0,6	0,0040	0,3911
0,8	0,0234	0,5215
1	0,0534	0,6519
1,2	0,0993	0,7822
1,4	0,1658	0,9126
1,6	0,2484	1,0430
1,7	0,2908	1,1088
1,8	0,3582	1,1733
1,9	0,4225	1,2392
2	0,4866	1,3058

2.7-кестедегі тәжірибелік мәндерінен «кернеу-деформация» тәуелділігі тұрғызылды және ол дәрежелік функциямен сипатталады (сурет 2.26).



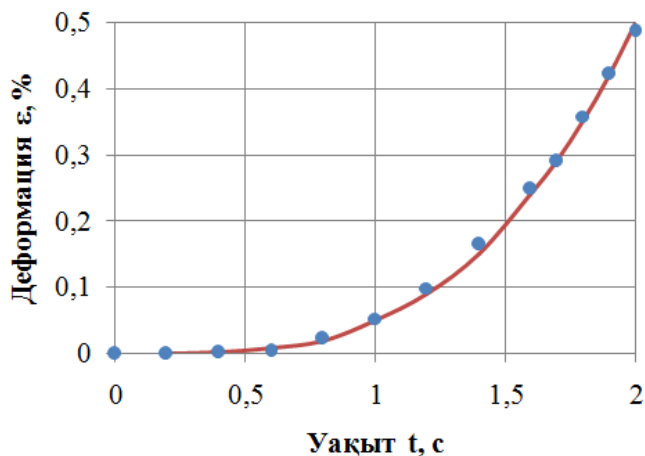
Сурет 2.26 - Асфальтбетонның $\dot{\sigma} = 0,651864$ МПа/с жүктеу жылдамдығындағы «кернеу-деформация» тәуелділік графигі

$\dot{\sigma} = const$ және $T = const$ болғанда, үлгілерді созуға сынауда (1.75) және (1.76) теңдеулерін ескере отырып, $0,651864$ МПа/с жүктеу жылдамдығындағы асфальтбетон үлгілерінің жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндерінің жуықтауынан алынған корреляция коэффициенттері мыналарға тең: $a=0,196$ және $\gamma=3,3$.

Асфальтбетон үлгісінің жылжымалылығын сипаттайтын Абель ядросының ерекшелік параметрі $\bar{\alpha} = 0,9$ болғанда, (1.78) формуласы бойынша $\bar{\delta}$ параметрінің мәні мынаған тең: $\bar{\delta} = 0,0073$. Осы анықталған Абель ядросының $\bar{\alpha}$ және $\bar{\delta}$ параметрлерін пайдалана отырып, (1.77) теңдеуінен асфальтбетон үлгілерінің $\dot{\sigma} = 0,651864$ МПа/с жүктеу жылдамдығындағы жылжымалылық деформациясының мәндері уақытқа байланысты есептелді. Сонымен, асфальтбетон үлгілерінің жылжымалылық деформациясының тәжірибелік

мәндері мен есептелген мәндерінен жылжымалылық қисығы тұрғызылды (сурет 2.27).

Көріп отырғанымыздай, $\dot{\sigma} = 0,651864$ МПа/с жүктеу жылдамдығындағы асфальтбетон үлгілерінің есептелген деформация мәндері мен тәжірибелік деформация мәндері арасындағы сәйкестік жақсы.



● – тәжірибелік нүктелер; – - есептелген нүктелер

Сурет 2.27 - Асфальтбетонның $\dot{\sigma} = 0,651864$ МПа/с жүктеу жылдамдығындағы жылжымалылық қисығы

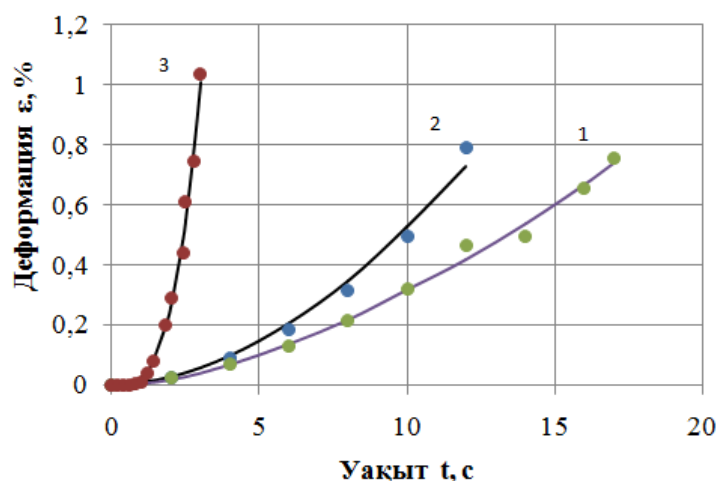
Осындай әдіспен есептелген басқа жүктеу жылдамдықтарындағы асфальтбетон материалының жылжымалылық параметрлері $(\bar{\alpha}, \bar{\delta})$ мен корреляция коэффициенттері 2.8-кестеде келтірілген.

Кесте 2.8 - Әр түрлі тұрақты жүктеу жылдамдығындағы асфальтбетон материалының жылжымалылық параметрлері мен корреляция коэффициенттері

$\dot{\sigma}$, МПа/с	0,000563	0,001698	0,005507	0,048869	0,058036	0,467757
$\bar{\alpha}$	0,8	0,9	0,6	0,9	0,9	0,9
$\bar{\delta}$	0,0158	0,0133	0,1517	0,0032	0,0004	0,0124
a	6,791	3,3	1,069	1,851	0,754	0,297
γ	1,4	1,3	1,01	1,8	1,6	3,3

Асфальтбетон үлгілерінің 0,048869; 0,058036 және 0,467757 МПа/с жүктеу жылдамдықтарындағы деформацияның уақыт бойынша өзгеріс графиктері 2.28-суретте көрсетілген.

Құрылған графиктерді талдаудан, жүктеу жылдамдықтарындағы асфальтбетон үлгілерінің жылжымалылығының есептелген қисықтары сәйкесті тәжірибелік мәндерімен жоғары деңгейде сәйкес келетінін көруге болады.



1 – 0,058036 МПа/с; 2 – 0,048869 МПа/с; 3 – 0,467757 МПа/с

Сурет 2.28 – Әр түрлі жүктеу жылдамдықтарындағы асфальтбетонның жылжымалылық қисықтары

2.5 Бөлім бойынша қысқаша қорытынды

1. Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институтында асфальтбетон үлгілеріне 22-24°C температурада тікелей созылу схемасында деформациясы мен қирау сипаттамаларын тәжірибелік түрде анықтау нәтижелері қарастырылды. Асфальтбетон үлгілеріне тұрақты кернеуде, сатылы және тұрақты жүктеу жылдамдығындағы жүктемеде жүргізілген тәжірибелік сынақтары зерттелді. Тұрақты кернеуде асфальтбетон үлгілерінің жылжымалылық қисығының I және II бөліктері айқын көрсетілді.

2. Сатылы жүктеме бойынша тәжірибелік зерттеулер нәтижесінен, ұсақ түйіршікті ыстық тығыз асфальтбетон 22-24°C температурада және 0,041 –ден 0,183 МПа-ға дейінгі кернеулерінде сызықты емес деформацияланады. Ол әр түрлі жүктеу деңгейлері мен кернеулердегі тәжірибелік реологиялық параметр қисықтарынан изохронды жылжымалылық қисықтарын құру жолымен көрнекі көрсетілді. Асфальтбетон үлгілерінің жылжымалылығының сызықты емес деформациялануы ұсынылған әдіспен және компьютерлік бағдарламалау көмегімен жақсы сипатталды.

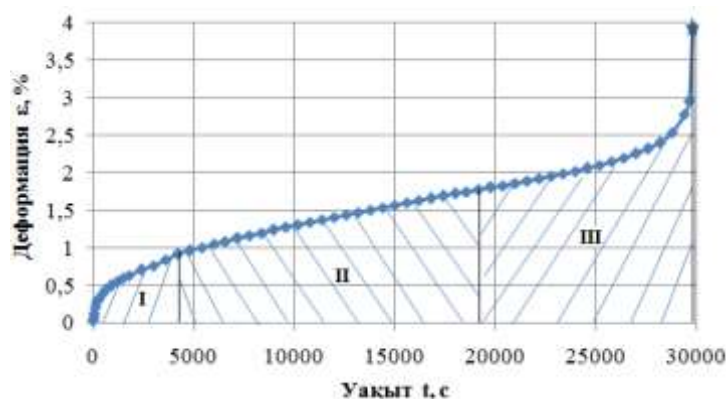
3. 0,000563; 0,001698; 0,005507; 0,007244; 0,015137; 0,023918; 0,048869; 0,058036; 0,205869; 0,467757; 0,651864 МПа/с жүктеу жылдамдықтарындағы жүктемелерде сыналған асфальтбетон үлгілерінің жылжымалылық процесі зерттелді. Асфальтбетон үлгілерінің жылжымалылығына математикалық модельдеу жасалды. $\dot{\sigma} = 0,651864$ МПа/с жүктеу жылдамдығындағы асфальтбетон үлгілерінің жылжымалылық қисығының тәжірибелік мәндерін қолдана отырып, жылжымалылығы ұсынылған математикалық теңдеулермен есептелді. 0,651864; 0,058036; 0,048869 және 0,467757 МПа/с жүктеу жылдамдықтарындағы асфальтбетон үлгілерінің жылжымалылық қисығының тәжірибелік мәндері есептелген мәндерімен сәйкес келетіні көрсетілді.

3 АСФАЛЬТБЕТОН ҮЛГІЛЕРІНІҢ ҚИРАУ ПРОЦЕСІНЕ ЖҮКТЕУ РЕЖИМІНІҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

3.1 Асфальтбетон үлгілерінің тұрақты кернеуіндегі беріктігі

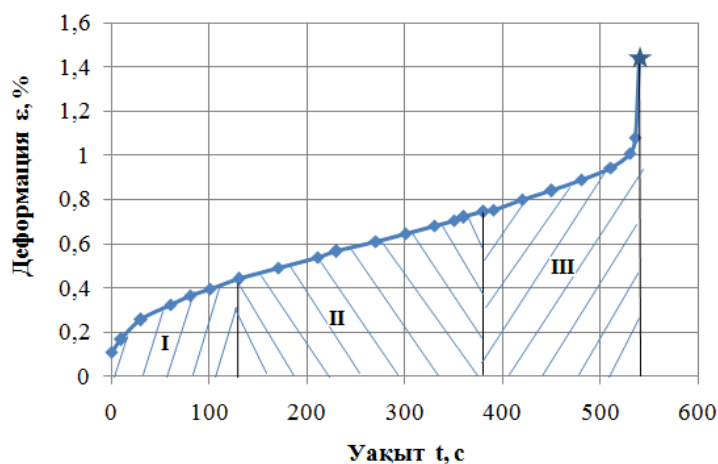
Асфальтбетон үлгілеріне кез келген жағдайда жүктеме тиелгенде жылжымалылық қисығының үш бөлігі ерекшеленетіні жоғарыда айтылды: I-бөлік серпімді деформация (орнықтаған жылжымалылық); II-бөлік тұрақты жылдамдықтағы жылжымалылық (орныққан жылжымалылық) және III-бөлікте жылжымалылық жылдамдығы артады және ол қираумен аяқталады. Материалдың тұтқырлы қирауында үлгінің созылуында мойын (шейка) пайда болса, ал морт қирауында ішкі жарықтар пайда болады [118, с.20].

Жоғарыда 0,036 МПа-дан 0,763 МПа-ға дейінгі жүктемеде сыналған асфальтбетонның 148 үлгілерінің нәтижелерін қарастырайық. 0,084; 0,260; 0,545 және 0,135 МПа кернеулеріндегі асфальтбетонның әрбір үлгілерінің қирауға дейінгі жылжымалылық қисықтары сәйкесті 3.1-3.4 суреттерде көрсетілген.



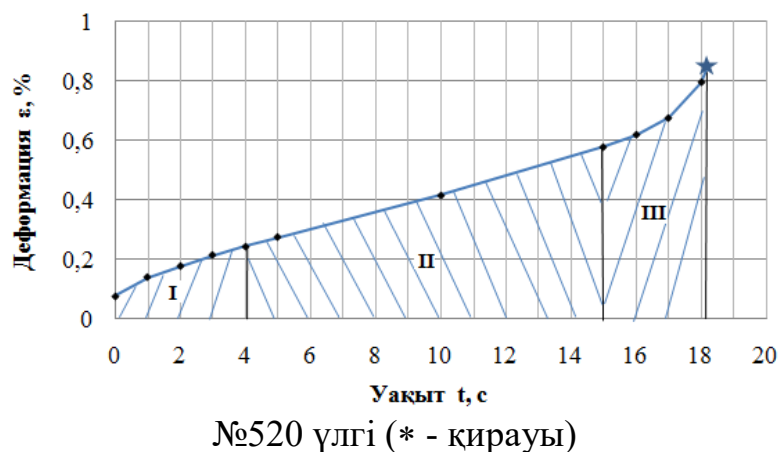
№105 үлгі (* - қирауы)

Сурет 3.1 - Асфальтбетонның 0,084 МПа кернеуіндегі жылжымалылық қисығы

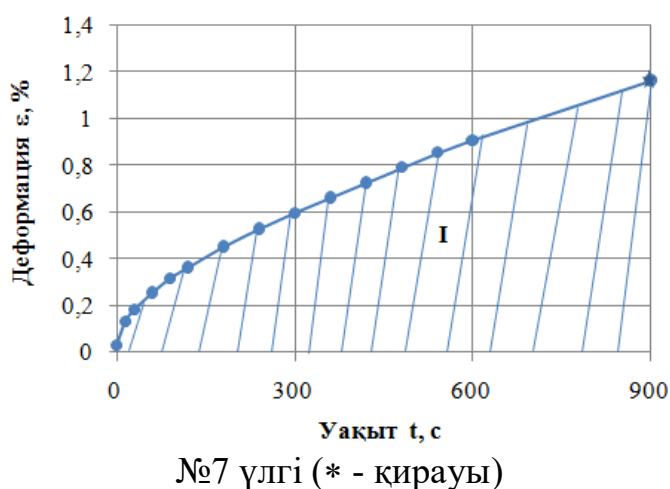


№151 үлгі (* - қирауы)

Сурет 3.2 - Асфальтбетонның 0,260 МПа кернеуіндегі жылжымалылық қисығы



Сурет 3.3 - Асфальтбетонның 0,545 МПа кернеуіндегі жылжымалылық қисығы



Сурет 3.4 - Асфальтбетонның 0,135 МПа кернеуіндегі жылжымалылық қисығы

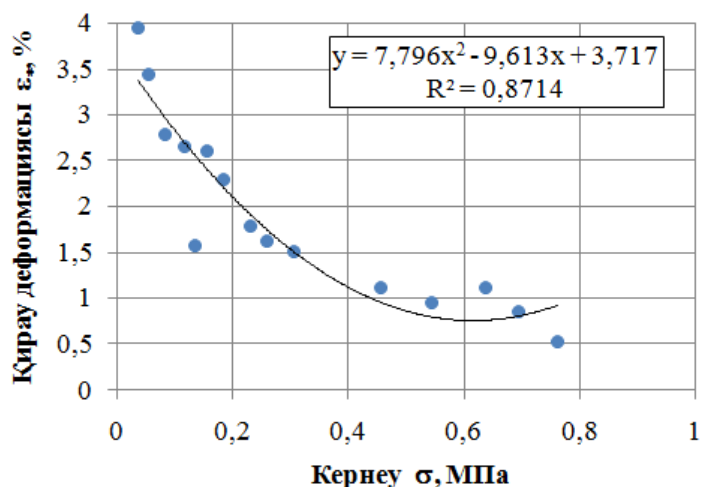
Сынақ нәтижелерінен көретіміз, асфальтбетонның әрбір үлгісіндегі жылжымалылық қисығының үш бөлігі де ерекшеленетінін айқын көруге болады. Кей жағдайларда, үлгілерде жылжымалылық қисығының тек I (сурет 3.4) немесе II бөліктерінің болатыны да ескеріледі.

Сонымен, қираудың маңызды сипаттамалары ол, асфальтбетонның қирау мезетіндегі қирау уақыты, деформациясы, кернеу (беріктігі) және меншікті деформациялану жұмысы. Қарастырылған әр түрлі деңгей кернеулеріндегі сыналған асфальтбетон үлгілерінің механикалық сипаттамалары 3.1-кестеде келтірілген. Көріп отырғанымыздай, 0,036 МПа-дан 0,763 МПа-ға дейін жүктеменің өсуімен жылжымалылық деформациясы 7,5 есе және қирау уақыты 525826 есе кемиді.

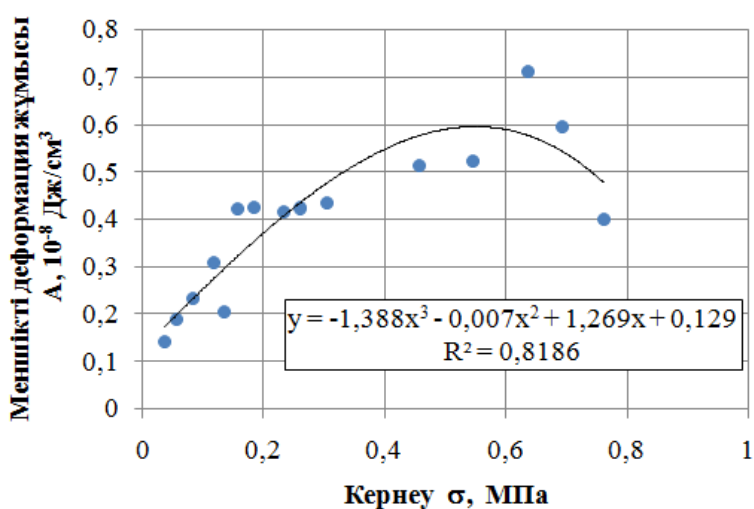
Кесте 3.1 – Әр түрлі деңгей кернеулеріндегі асфальтбетон үлгілерінің механикалық сипаттамалары

р/с	Кернеу σ , МПа	Әрбір кернеудегі σ , үлгілер саны N	Орныққан жылжымалылық жылдамдығының әрбір кернеудегі (σ) орташа мәні $\dot{\varepsilon}_{*opt}$, %/с	Орташа қирау уақыты t_{*opt} , с	Жылжымалылық деформациясының қирау мезетіндегі орташа мәні ε_{*opt} , %	Үлгілердің қирау мезетіндегі меншікті деформация жұмысының орташа мәні A_{*opt} , 10^{-8} Дж/см ³
1	0,036	1	0,000012	106615	3,9531	0,1435
2	0,055	4	0,000006	1051652	3,4368	0,1894
3	0,084	15	0,000082	23118	2,7933	0,2346
4	0,117	24	0,000457	6062	2,6577	0,3088
5	0,135	3	0,000470	1597	1,5715	0,2065
6	0,157	26	0,002060	1594	2,6024	0,4213
7	0,185	17	0,002172	1628	2,2916	0,4242
8	0,232	26	0,003283	536	1,7883	0,4156
9	0,260	10	0,001870	524	1,6310	0,4237
10	0,305	13	0,007983	127	1,5090	0,4335
11	0,457	1	0,025883	20	1,1190	0,5114
12	0,545	2	0,033610	19	0,9584	0,5223
13	0,638	2	0,119095	8	1,1122	0,7101
14	0,695	2	0,165740	4	0,8556	0,5952
15	0,763	2	0,190275	2	0,5254	0,3993

3.1-кестедегі мәндерінен асфальтбетон үлгілерінің деформациясының қирауының кернеуге тәуелділігі (сурет 3.5) және меншікті деформациялану жұмысының кернеуге тәуелділік графиктері (сурет 3.6) құрылды.



Сурет 3.5 – Асфальтбетон үлгілерінің қирау деформациясына тәуелділігі

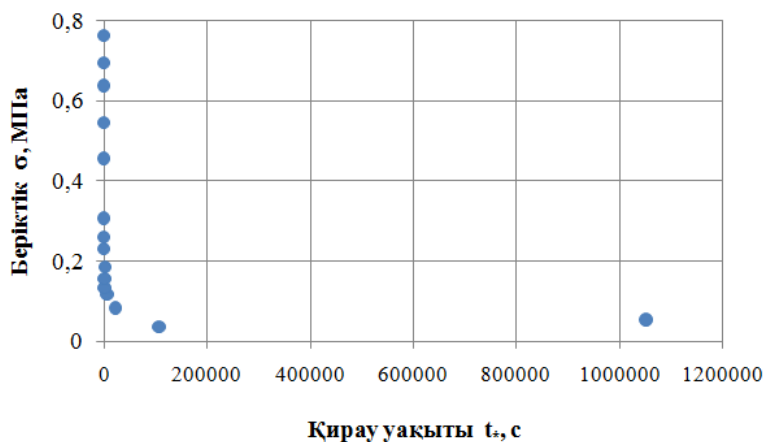


Сурет 3.6 – Асфальтбетон үлгілерінің меншікті деформация жұмысы

3.5-суретте көріп отырғанымыздай, берілген температурада сыналған асфальтбетон үлгілерінің деформациясы сызықты емес өзгереді және қирауы аз болып табылады: ең үлкен деформация 0,036 МПа кернеуінде 4 % құрайды, ал 3.6-суретте ең үлкен меншікті деформация жұмысы 0,638 МПа кернеуінде $0,7101 \cdot 10^{-8}$ Дж/см 3 тең.

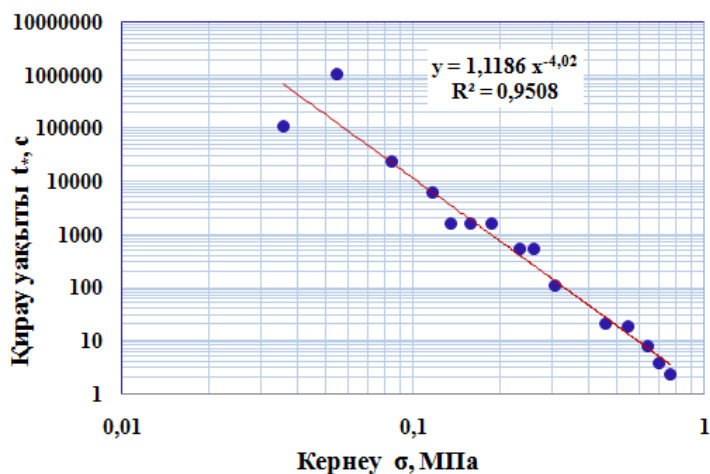
Асфальтбетонның беріктігін анықтауда әр түрлі жүктеу шарттарында қолдануға болатын ұзақ беріктік қасиеті қаралады. Ұзақ беріктік қасиеті, ол жүктемені лезде салу мен тұрақты ұстап тұру әрекетінен материалдың қирауындағы уақыт [61, с.32, 119]. Ол материалды жылжымалылыққа сынау нәтижелерінен анықталады.

3.1-кестедегі асфальтбетон үлгілерінің механикалық сипаттамасынан 22-24° С температурасындағы асфальтбетонның ұзақ беріктікке құрылған қисығы 3.7-суретте көрсетілген.



Сурет 3.7 - Асфальтбетонның 22-24° С температурадағы ұзақ беріктік қисығы

Осы асфальтбетонның ұзақ беріктікке құрылған қисығының логарифмдік координаталар бойынша графигі 3.8-суретте көрсетілген.



Сурет 3.8 - Асфальтбетонның ұзақ беріктік графигі [73, с.148]

3.8-суреттен көріп отырғанымыздай, асфальтбетон үлгілерінің ұзақ беріктігі дәрежелік функциямен жуықталады. Сондықтан жуықталған функцияны келесі түрде сипаттауға болады [7, с.354]:

$$t_* = \frac{1}{A(n+1)\sigma^n}, \quad (3.1)$$

мұндағы: t_* - қирау уақыты, с;

σ - кернеу, МПа;

A – өлшемі бар тұрақты, $\text{МПа}^{-n} \cdot \text{с}^{-1}$;
 n – өлшемсіз көрсеткіш.

3.2 Тұрақты жүктеме жылдамдығындағы асфальтбетонның беріктігі

[56, 57, 107, 111, 116-117, 120-121] әдебиеттерге шолуынан жол құрылысы материалтануында мұндай жағдай бұрыннан қалыптасқанын көрсетеді: асфальтбетонды сынаудың барлық түрі берілген деформация жылдамдығында жүргізіледі. Мысалы, цилиндрлік үлгідегі асфальтбетонды сығуға сынауда деформациясы 3 мм/мин жылдамдығында орындалады [99]. Бірсытлік созуға сынауда асфальтбетонның беріктігі 2 мм/мин деформация жылдамдығында анықталады. Асфальтбетонның қажу сипаттамалары иілу кезіндегі деформация өзгерісі гармоникалық заңға сәйкес (деформация амплитудасы қирауға дейін өзгеріссіз қалады) орындалады [120]. Сонымен бірге, көрсетілген деформация жылдамдығының нормалары (2 және 3 мм/мин) кәдімгі жағдайларға қарағанда салыстырмалы түрде жоғары.

Асфальтбетонның жүктеу жылдамдығының деформациясы мен қирау сипаттамаларының айтарлықтай әсері басқа зерттеушілердің еңбектерінде де қарастырылған. Fakhri M. және басқалары [122, p.114-115] деформация жылдамдығы аралық температурада (5°C , 15°C және 25°C) асфальтбетонның қирау энергиясына (fracture energy) қатты әсер ететінін айтады. Золотарев В.А. және басқалары [115, с.42-43] және Islam M.D.R. және басқалары [57, p.553] асфальтбетонның үш нүктелі және төрт нүктелі иілуде, сығылуда, созылуда және үш нүктелік иілуде бастапқы қатаю кезінде асфальтбетонның беріктігі деформация жылдамдығынан тәуелділігі дәрежелік функциямен қанағаттанарлық түрде сипатталады деп тапты.

Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институтында тікелей созылу сұлбасы бойынша жоғарыда 11 жүктеу жылдамдығында сыналған асфальтбетон үлгілерін қарастырайық. Тәжірибелік түрде сыналған жүктеу жылдамдықтары мыналарға тең ($\text{МПа}/\text{с}$): 1 - 0,000563; 2 - 0,001698; 3 - 0,005507; 4 - 0,007244; 5 - 0,015137; 6 - 0,023918; 7 - 0,048869; 8 - 0,058036; 9 - 0,205869; 10 - 0,467757; 11 - 0,651864. Материалдың қирауының маңызды сипаттамалары ол қирау уақыты, деформациясы, кернеу (беріктік) және меншікті деформациялану жұмысы болғандықтан, 3.2-кестеде асфальтбетон үлгілерінің осы жүктеу жылдамдықтарындағы механикалық сипаттамалары келтірілген.

Көріп отырғанымыздай, жүктеу жылдамдығы асфальтбетон үлгілерінің қирау сипаттамаларына қатты әсер етеді. Сонымен бірге, жүктеу жылдамдығының $0,000563 \text{ МПа}/\text{с}$ -тан $0,651864 \text{ МПа}/\text{с}$ -қа дейін 1158 (шамамен 1200) есе артуымен қирау уақыты, қираудың меншікті жұмысы мен қираудың деформациясы сәйкесінше 242, 160 және 3 есе азаяды, ал беріктігі 5 есе артады.

Кесте 3.2 – Тұрақты жылдамдықтағы жүктемеде асфальтбетон үлгілерінің механикалық сипаттамалары

р/с	Жүктеу жылдамдығы $\dot{\sigma}$, МПа/с	Сыналған үлгілер саны N	Орташа қирау уақыты $t^*_{\text{орт}}(\dot{\sigma})$, с	Жылжымалылық деформациясының қирау мезетіндегі орташа мәні $\varepsilon^*_{\text{орт}}(\dot{\sigma})$, %	Қирау мезетіндегі орташа кернеу мәні $\sigma^*_{\text{орт}}(\dot{\sigma})$, МПа	Үлгілердің қирау мезетіндегі меншікті деформация жұмысының орташа мәні $A^*_{\text{орт}}(\dot{\sigma})$, 10^{-8} Дж/см ³
1	0,000563	1	518	2,0476	0,2914	309,0056
2	0,001698	1	251,9	1,6200	0,4278	174,3911
3	0,005507	8	81,5	1,6687	0,4468	66,4982
4	0,007244	2	66,5	1,2102	0,4798	41,0138
5	0,015137	10	29,0	1,3988	0,4190	20,2902
6	0,023918	8	25,4	1,2271	0,5899	19,3196
7	0,048869	6	12,95	1,1078	0,6336	9,3986
8	0,058036	6	16,5	1,0408	0,9555	15,7990
9	0,205869	5	5,34	0,7518	1,0995	4,1998
10	0,467757	5	2,9	1,0002	1,3549	3,7853
11	0,651864	5	2,14	0,6856	1,3952	1,9300

Асфальтбетон материалының зақымдануы деформацияланудың меншікті энергиясымен бағаланады [123]. Сондықтан тұрақты жүктеме жылдамдығындағы, $\dot{\sigma} = const$ деформацияның меншікті энергиясы уақыт өзгерісіне байланысты келесі түрде сипатталады [123, с.42]:

$$A(t) = \dot{\sigma} \cdot t \cdot \varepsilon(t) - \dot{\sigma} \int_0^t \varepsilon(t) dt, \quad (3.2)$$

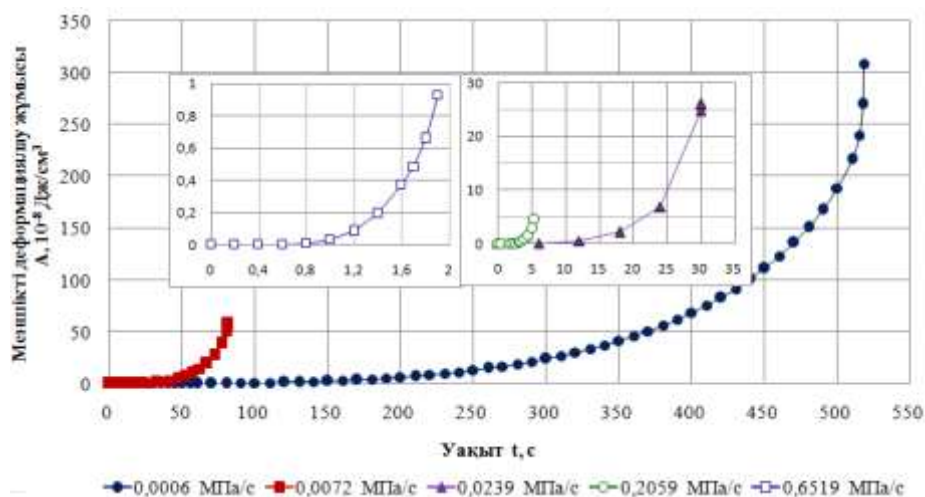
мұндағы $\dot{\sigma}$ - жүктеме жылдамдығы, МПа/с;

t – уақыт, с;

$\varepsilon(t)$ – деформацияның уақыт бойынша өзгерісі, %.

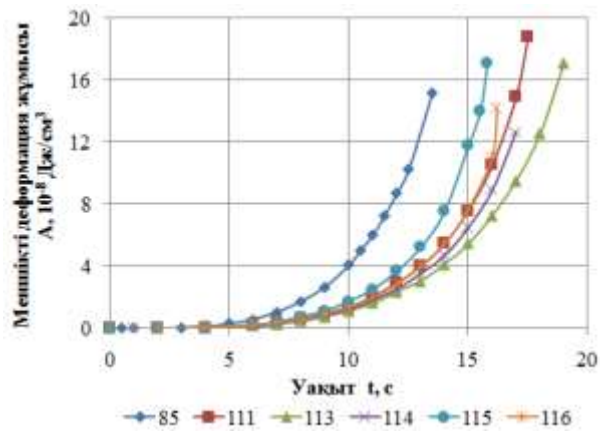
Асфальтбетонның 11 жүктеу жылдамдығындағы уақыт бойынша өзгеретін меншікті деформациялану жұмысының (3.2) формуламен есептелген мәндері 3.2-кестеде келтірілген.

Түсінікті болу үшін (3.2) формула бойынша табылған 5 жүктеме жылдамдықтарындағы меншікті деформациялану жұмысының өзгеріс графиктері 3.9-суретте көрсетілген. Мұнда деформацияның сызықты еместігінен асфальтбетонның меншікті деформациялану жұмысы да уақыт бойынша сызықты емес өзгереді. Бұл жағдайда меншікті деформациялану энергиясының үлкен мәні қирау кезінде пайда болады. Сондай-ақ, барлық жүктеме жылдамдықтарында жүктеменің бірінші жартысында меншікті деформациялану энергиясы салыстырмалы түрде аз болатындығын; ол жүктеу процесінің соңында ең жоғары мәнге ие болатынын ескеруге болады.



Сурет 3.9 - Әр түрлі жүктеу жылдамдықтарындағы меншікті деформациялану жұмысының өзгеріс графиктері [69, р. 5]

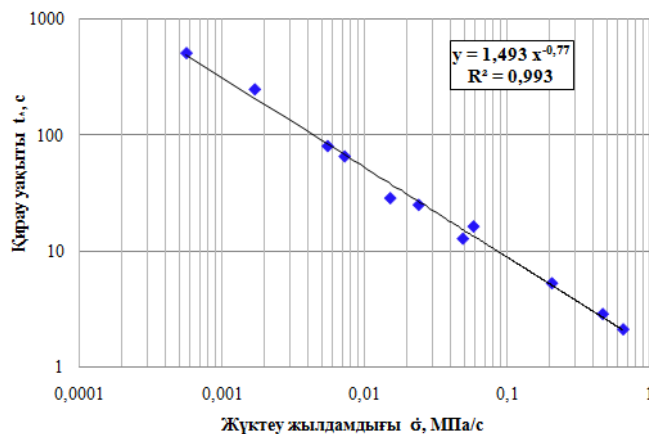
0,058 МПа/с орташа жүктеу жылдамдығындағы әрбір асфальтбетон үлгілерінің сызықты емес деформациялану нәтижесінде асфальтбетон деформациясының меншікті жұмысы уақыт бойынша да сызықты емес өзгереді (сурет 3.10).



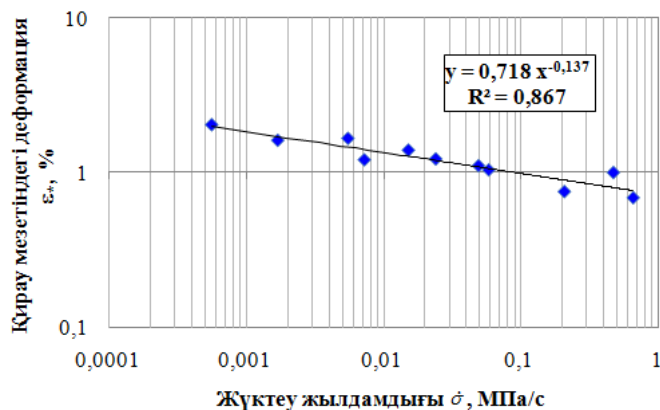
Сурет 3.10 - Деформацияның меншікті жұмысының уақыт бойынша өзгеріс графиктері (орташа жүктеу жылдамдығы $\dot{\sigma} = 0,058 \text{ МПа/с}$) [53]

Көріп отырғанымыздай, бұл жағдайда да деформацияның меншікті энергиясының ең жоғары мәні қирау кезінде пайда болады.

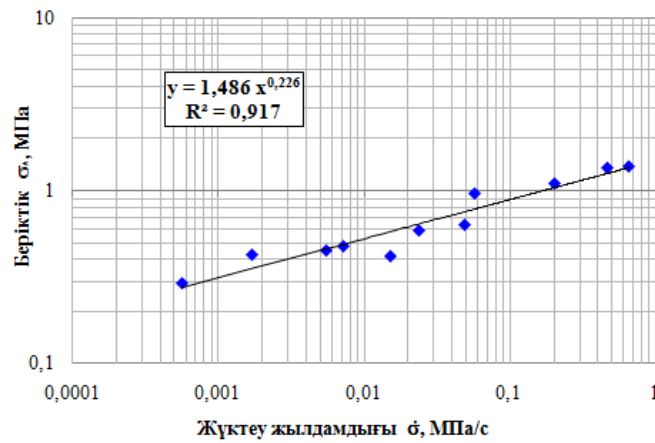
Әрі қарай асфальтбетонның 3.2-кестедегі механикалық сипаттамаларының жүктеу жылдамдығына тәуелділігі 3.11-3.14 суреттерде көрсетілген [69, p. 6-7].



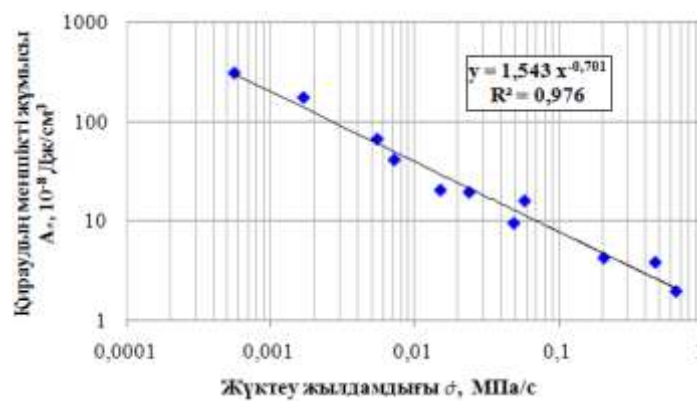
Сурет 3.11 - Асфальтбетонның қирау уақытының жүктеу жылдамдығынан тәуелділігі



Сурет 3.12 - Асфальтбетонның қирау деформациясының жүктеу жылдамдығынан тәуелділігі



Сурет 3.13 - Асфальтбетонның беріктігі жүктеу жылдамдығынан тәуелділігі



Сурет 3.14 - Асфальтбетонның қирауының меншікті жұмысының жүктеу жылдамдығынан тәуелділігі

Асфальтбетонның ұзақ беріктіктігі (қирау уақыты) және жылжымалылықта орныққан деформация жылдамдығының кернеуден тәуелділігі дәрежелік функциямен жоғары дәлдікте жуықталатыны тәжірибе жүзінде анықталды. 3.9-суреттен және 3.11-3.14 суреттерінен көріп отырғанымыздай, тұрақты жылдамдықпен жүктеу кезінде асфальтбетонның қирау сипаттамалары дәрежелік функциямен жоғары дәлдікте сипатталады. Сонымен, жүктеу жылдамдығы артқан сайын (кернеу әрекетінің уақыт бойынша өсуімен) асфальтбетонның қирау уақыты қысқарады. Жүктеу жылдамдығының артуымен асфальтбетонның қирау деформациясы және меншікті қирау жұмысы төмендейді. Ал асфальтбетон беріктігі, керісінше, жүктеу жылдамдығымен артады. Асфальтбетонның қирау сипаттамаларының қарастырылғандарының ішінде жүктеу жылдамдығының өзгеруіне неғұрлым сезімтал болғаны қирау уақыты және меншікті деформациялану жұмысы болды: жүктеу жылдамдығы бір ретті өзгергенде, бұл сипаттамалар сәйкесінше 0,77 және 0,70 рет бойынша өзгереді. Жүктеу жылдамдығының өзгеруіне аз әсер еткені ол қирау деформациясы болды: дәрежелік көрсеткіш $n=0,14$ тең. Аралық сезімталдығын асфальтбетон беріктігі көрсетеді: $n=0,23$. [69, p.5-6]

Жүктелген дененің шыдаммерзімін сипаттауда жүктеу жылдамдығының уақыт бойынша өзгерісінен жүктелген денеде қираудың алдында зақымдардың жинақталатыны анық [124, 125]. Егер жүктеу жылдамдығы уақыт бойынша өзгертін болса, онда зақымдардың жинақталуы қосындылау принципі Бейли шартына келеді [126, р.96].

Аз деформацияда, яғни

$$\sigma \approx \sigma_0, \quad (3.3)$$

мұндағы $\sigma_0 = \text{const}$ – тұрақты кернеу.

Тұрақты жылдамдықтағы жүктемеде, $\dot{\sigma}$ кернеудің уақыт бойынша өзгерісі $\sigma(t)$ мына тәуелділікпен сипатталады [127, р. 8]:

$$\sigma_0(t) = \dot{\sigma}_0 \cdot \tau \quad (3.4)$$

Бұл жағдайда Бейли интегралы мына түрде жазылады [127, р. 4]:

$$A(n+1) \int_0^{t_*} \sigma_0^n(\tau) d\tau = 1, \quad (3.5)$$

мұндағы: A, n – асфальтбетон материалының ұзақ беріктігінің параметрлері.

A және n параметрлері физикалық мағынасы бар. A коэффициенті қирау уақытының секунд бойынша кернеудегі санына 1 МПа-ға тең. Ал n коэффициенті кернеудің өзгерісіндегі қирау уақытының өзгеріс жылдамдығын сипаттайды, нақты кернеудің өзгерісі қирау уақытының өзгерісінің реттілігін көрсетеді [127, р. 4].

(3.4) өрнекті ескере отырып, (3.5) интегралдық теңдеуді орындағаннан және қирау уақытына t_* қатысты келесі теңдеуді аламыз:

$$t_* = \frac{1}{(A \dot{\sigma}_0^n)^{\frac{1}{n+1}}}. \quad (3.6)$$

Бұл (3.6) өрнек Бейли формуласы.

Реономды типті материалдардың зақымдануының жинақталуы қосындылау принципімен мына түрде сипатталады [127, р. 8]:

$$\frac{C}{n} \int_0^{t_*} (t_* - \tau)^{\frac{1}{n}-1} \sigma_0(\tau) d\tau = 1, \quad (3.7)$$

мұндағы $C = [A(n+1)]^{\frac{1}{n}}, \quad (3.8)$

(3.4) өрнекті (3.7) интегралдық теңдеуге қойып, интегралды орындайық. Сонда қирау уақыты t_* , үшін келесі өрнек табылады:

$$t_* = \frac{1}{D^{\frac{n}{n+1}} \dot{\sigma}_0^{\frac{n}{n+1}}}, \quad (3.9)$$

мұндағы: $D = \frac{n}{1+n} C.$ (3.10)

Бұл (3.9) қатынасының Бейли формуласынан (3.6) өзгешелігі, материалдың қирау процесінде жүктеу тарихының әсері ескеріледі.

Осы анықталған теңдеулерді тексерейік. Ол үшін (3.8) өрнектен алдымен белгісіз A және n параметрлер мәндерін анықтап алу қажет. Олар жоғарыда сипатталған асфальтбетон үлгілерінің ұзақ беріктік графигінен (сурет 3.8) регрессия теңдеуі арқылы және (3.1) жуықтау функциясынан анықталады. A және n параметрлер мәндері мынаған тең: $n=4,02$; $A=0,1781 \text{ МПа}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.

Әрі қарай A және n параметрлер мәндерін ескере отырып, жоғарыда асфальтбетон үлгілерінің 11 жүктеу жылдамдықтарында қирау процесіндегі зақымдануы (3.9) өрнегімен есептелді. Осы 11 жүктеу жылдамдықтарындағы (МПа/с): 1 - 0,000563; 2 - 0,001698; 3 - 0,005507; 4 - 0,007244; 5 - 0,015137; 6 - 0,023918; 7 - 0,048869; 8 - 0,058036; 9 - 0,205869; 10 - 0,467757; 11 - 0,651864 сәйкесті асфальтбетон үлгілерінің қирау уақыты (секунд) мыналарға тең: 1 - 476; 2 - 200; 3 - 78,7; 4 - 62,9; 5 - 34,97; 6 - 24,2; 7 - 13,7; 8 - 11,9; 9 - 4,3; 10 - 2,2; 11 - 1,7.

Осылайша зақымдардың жинақталуы және жүктеу тарихын ескеретін (3.9) қатынасынан асфальтбетон үлгілерінің тұрақты жылдамдығындағы жүктемеде қирау уақыты қанағаттанарлық түрде сипатталатынын көруге болады.

Кез келген жағдайларға және қозғалыс режимдеріне сәйкес көлік құралдары автокөлік жолдарымен (автокөлік жолдарының әр бөліктерінде) әр түрлі жылдамдықпен жүретіні белгілі. Мұнда жүргізілген тәжірибелік зерттеу нәтижелерінен асфальтбетонның деформациясы мен қирау сипаттамалары жүктеу жылдамдығына тәуелді екенін көрсетеді. Бұл нәтижелерден көлік жылдамдығы ескерілетін белгіленген жолдардың болуы қажет деген ойды тудырады, ал асфальтбетон құрылымдарын жобалау кезінде осы жылдамдыққа сәйкес асфальтбетон қабаттарының механикалық сипаттамалары ескерілуі тиіс.

3.3 Асфальтбетонның циклдік жүктемедегі беріктігі

Автокөлік жолдарын пайдалануда асфальтбетон қабаттары жүк көліктерінің дөңгелектерінен күрделі механикалық әсерлерге ұшырайды. Көлік қозғалысының қарқындылығынан автокөлік жолдарына түсірілген жүктемеден, сәйкесті циклдерінің ұлғаюы, көлік құралдары жүктемесінің жоғарылауымен тез қажулық зақымның жинақталуы орын алады [44, с.36]. Материалда қажып қираудың даму сипаттамасы циклдік жүктеменің шамасына әсер етеді. Сондықтан автокөлік жолдарына қатысты, циклдік жүктемеде асфальтбетонның деформациясы мен қирауын тәжірибелік түрде зерттеу өте маңызды болып табылады.

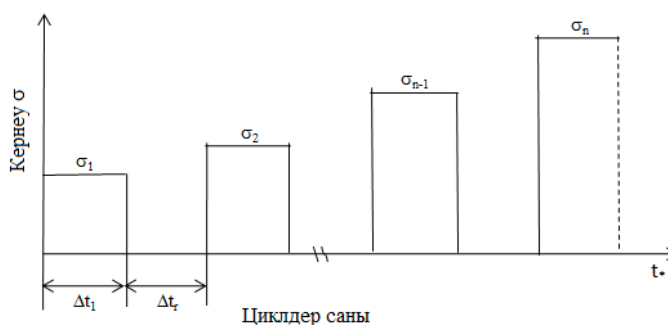
R.A. Schapery [129] ұсынған кеңейтілген серпімді-тұтқырлысерпімді сәйкестік принципіне (the extended elastic-viscoelastic correspondence principle)

негізделген the viscoelastic continuum damage mechanics approach (VECD) сөзі асфальтбетонды зерттеуші мамандардың көбісіне жақсы таныс. Бұл тәсілді ең алғаш Little D.N. және Kim Y.R. [130-133] пайдаланған және де басқа зерттеушілер сызықты емес деформациялану мен жазылуын (healing) ескере отырып, асфальтбетонның қажу сипаттамасында жиі қолданған [134-135]. Тұтқырлысерпімді материалдың (асфальтбетонның) VECD-тәсіліндегі физикалық деформация мен физикалық қаттылық, циклден циклдік жүктемеге өтетін олардың жалған (псевдо) ұқсастығына, яғни жалған деформация мен жалған қаттылыққа өзгереді. Ал жалған деформацияны есептеу өз кезегінде тәжірибелік түрде, сәйкесті аппарат көмегімен анықталатын динамикалық модуль мен фазалық бұрышты білуді талап етеді.

Автокөлік дөңгелектерінің әрбір қозғалысында асфальтбетон қабатында зақымдардың (damage) бар болатыны және олардың жинақталатыны айтылған [99]. Сонымен бірге, циклдік жүктемедегі жүктеу тарихын ескеруімен болатын зақымдардың болуы қосындылау принципі Бейли интегралымен зерттелген [48, p. 4].

Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институтында асфальтбетон үлгілеріне циклдік жүктемеде сынақтар біросьтік тікелей созуға сынау бойынша жүргізілді [49, 71]. Сынақ жүргізуге жоғарыда сипатталған өлшемі 50x50x150 мм тікбұрышты призма түріндегі асфальтбетон үлгілері қолданылды. Асфальтбетон үлгілеріне тәжірибелік сынақтар 3.15-суретте көрсетілгендей, циклдік жүктеме сұлбасы бойынша жүргізілді.

Автокөлік жолдарында кезекті жүктемелер арасында түрлі ұзақтықтағы «Демалу» болады. Әрбір цикл екі периодтан тұрады. Бірінші периодта (Δt_1) σ кернеу салынған (жүктеме периоды), ал екінші периодта (Δt_2) кернеу әсер етпейді, яғни $\sigma=0$ (жүксіздену периоды). Бір толық циклдік жүктеме белгілі бір ұзақтыққа ие. «Жүксіздеу» әсерін бағалау үшін асфальтбетон үлгісі осы сұлба бойынша сыналады.

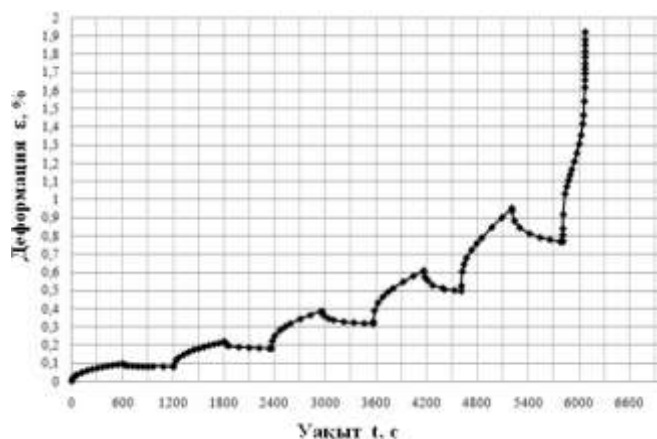


Сурет 3.15 - Циклдік жүктеме сұлбасы [49, p.106]

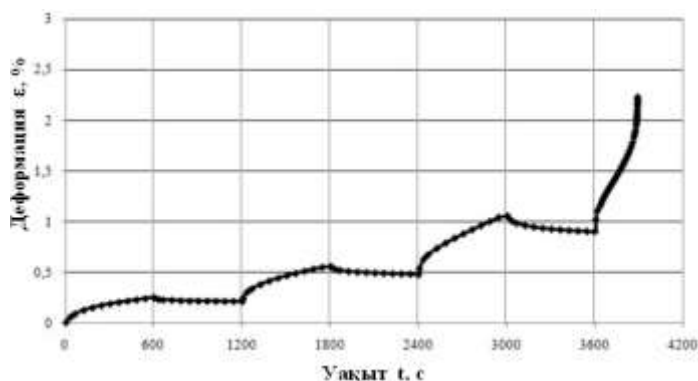
Циклдік жүктеме сұлбасы бойынша асфальтбетон үлгілеріне сынамалар екі бөлімде жүргізілді. Бірінші бөлімде 10 асфальтбетон үлгілері сыналды. Бірінші бөлімдегі циклдік жүктемеге қолданылған кернеулер, сәйкесінше 0,041; 0,111; 0,148; 0,183 және 0,219 МПа тең. Мұндағы асфальтбетон үлгілеріне 3.15-суреттегі сұлба бойынша кернеу жылдам қолданылды және 600 секунд бойы

тұрақты ұсталып отырды. Одан кейін кернеу тез алынып тасталып, 600 секунд бойы үлгіде кернеу болмады. Екінші бөлімде 12 асфальтбетон үлгілері сыналды. Сынау жағдайында алдыңғы шарт сақталды. Ал қолданылған кернеулер 0,744; 1,448; 2,232 және 2,976 МПа тең болды. Сынақтар 22-24°С-қа тең температурада жүргізілді. Сынамалар арнайы әзірленген қондырғыда [104] жасалғандықтан, ол үлгіге 1 секундта жүктеме беруге мүмкіндік болды. Асфальтбетон үлгісіндегі деформацияның өзгеруі сағат түріндегі екі индикаторлармен бақыланып және бейне камераға жазылып алынды.

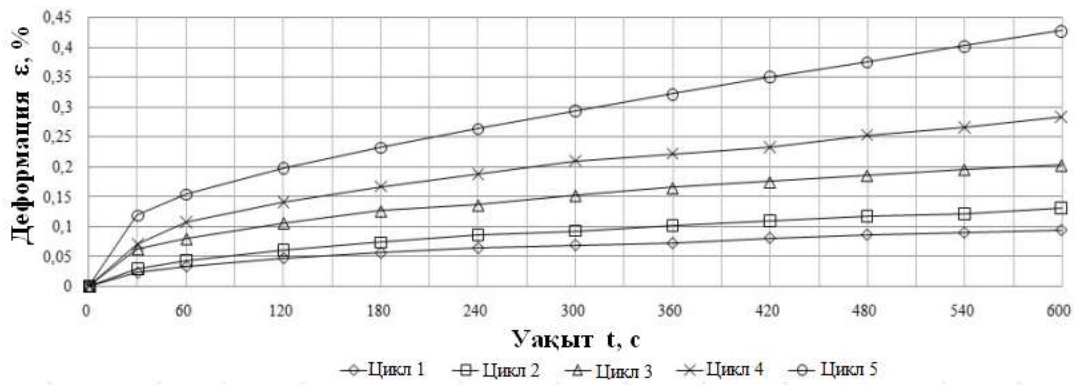
Аталған сұлба бойынша сыналған зерттеу нәтижелерінен, асфальтбетон үлгілеріне жасалған екі үлгідегі сынақтың циклдік жүктемедегі деформациясының графиктері суреттерде 3.16 және 3.17 көрсетілген. Бірінші үлгіде «жүктеу-жүксіздеу» толық 5 циклге дейін болса, ал 6-шы циклде ол қирайды. Екінші үлгіде қарсылық толық 3 циклге дейін жетсе, ал 4-ші циклде ол қирайды. Үлгілердің қирау уақыты сәйкесінше 6067 және 3892 секунд. Әрбір цикл жүктелу және жүксіздену кезеңінен тұрады. 3.18-3.21 суреттерінде циклдік жүктемедегі асфальтбетонның деформациясының кернеуден өсуі және жүксіздену периодында оның қалпына келу графиктері келтірілген. Кернеуден жылжымалылық деформация жылдамдығының өсуі, сондай-ақ оның қалпына келу жылдамдығы жүксіздену кезеңінде циклдер санының өсуімен артып отырады.



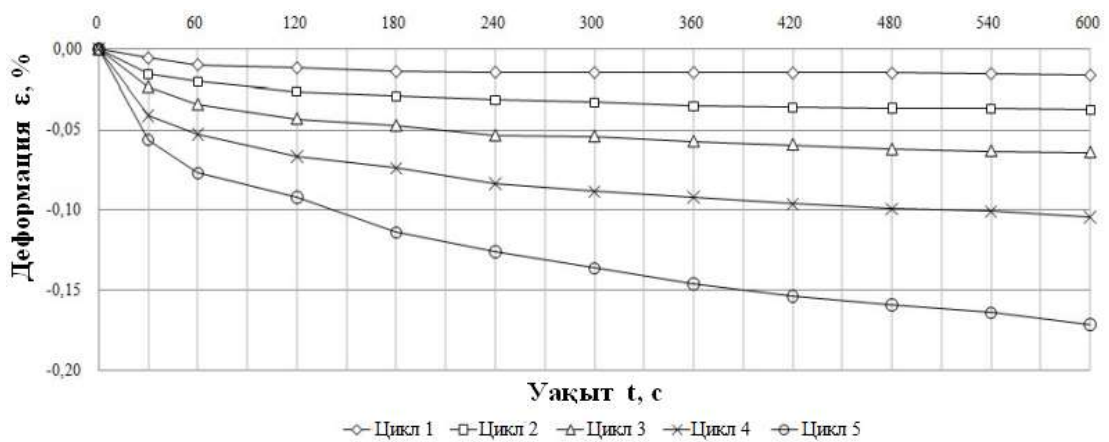
Сурет 3.16 - Асфальтбетонның циклдік деформациясы (№ 258 үлгі)



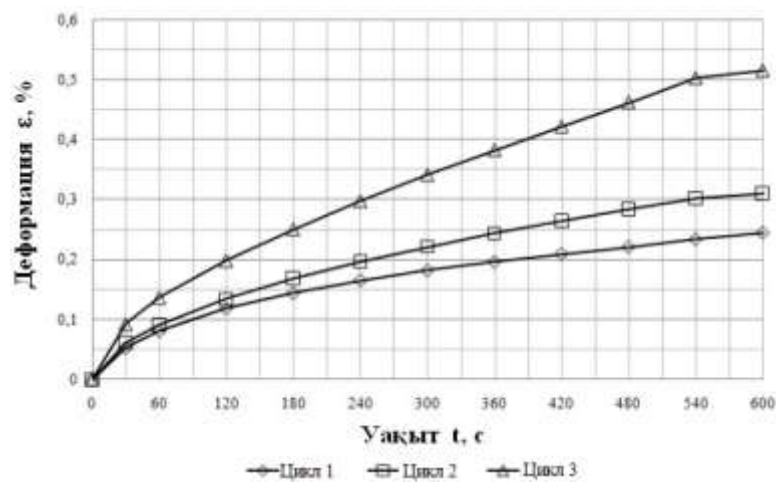
Сурет 3.17 - Асфальтбетонның циклдік деформациясы (№76 үлгі)



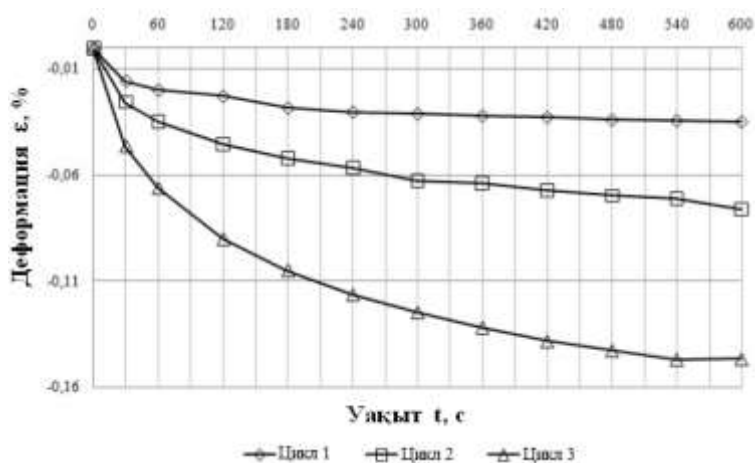
Сурет 3.18 - Әр түрлі циклдерде асфальтбетонның кернеуден деформациялануы (№ 258 үлгі)



Сурет 3.19 - Әр түрлі циклдерде кернеуді алып тастағаннан кейін асфальтбетон деформациясының қалпына келуі (№ 258 үлгі)



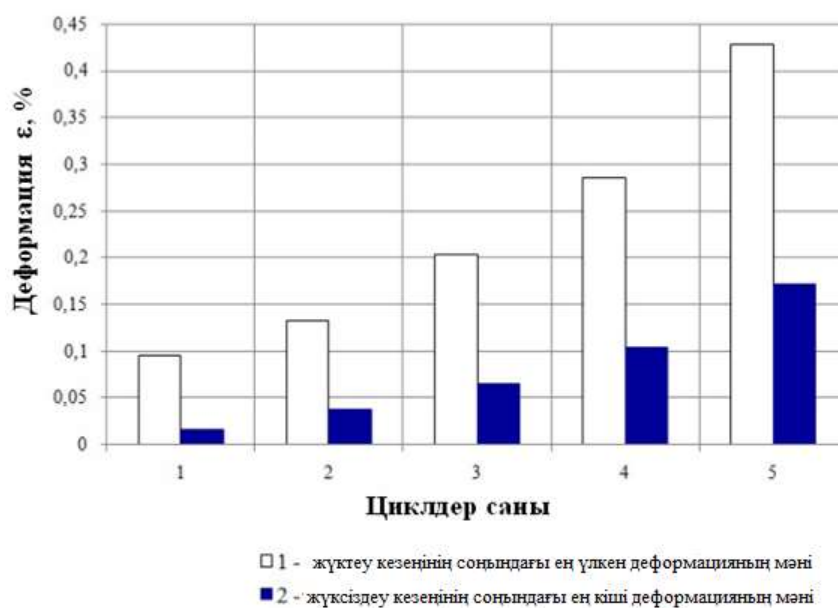
Сурет 3.20 - Әр түрлі циклдерде асфальтбетонның кернеуден деформациялануы (№ 76 үлгі)



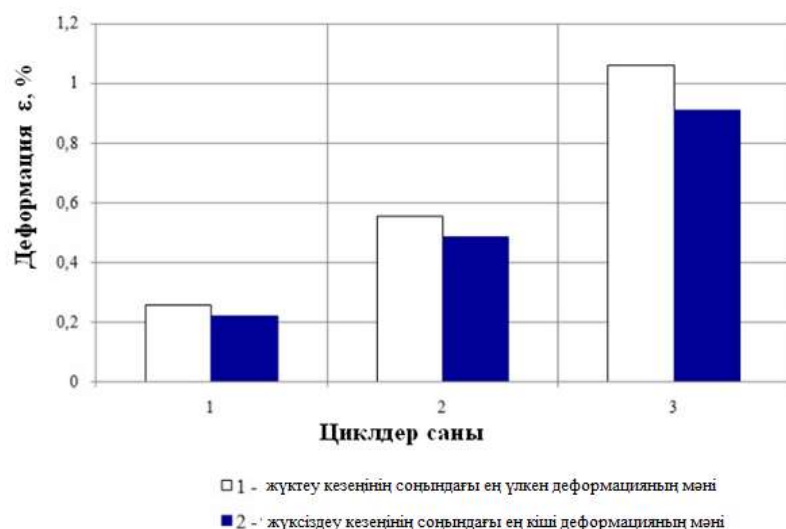
Сурет 3.21 - Әр түрлі циклдерде кернеуді алғаннан кейінгі асфальтбетон деформациясының қалпына келуі (№ 76 үлгі)

Сынақ нәтижелері әрбір циклде асфальтбетонның ең үлкен деформациясы жүктеу периодының соңында, ал ең үлкен қайту деформациясы жүксіздену периодының соңында болатынын көрсетті.

3.22-3.23 суреттерінен көретіміз, бұл екі үлгідегі деформация цикл санының өсуімен арта түседі, бірақ бірінші біреуінің өсу жылдамдығы екіншісінен жоғары болады.



Сурет 3.22 - Жүктеу кезеңінің соңындағы ең үлкен деформацияның мәні және жүксіздеу кезеңінің соңындағы ең кіші деформацияның мәні (№258 үлгі)



Сурет 3.23 - Жүктеу кезеңінің соңындағы ең үлкен деформацияның мәні және жүксіздеу кезеңінің соңындағы ең кіші деформацияның мәні (№76 үлгі)

Қарастырылған жағдайда (жүктеу және жүксіздеу кезеңдерінің ұзақтығы, жүктелген кернеулер мәні, температура) асфальтбетон өте пластикалық дене болып табылады: пластикалық деформация шамасы жүктеу периодының соңындағы жалпы деформацияның 80-87%-ын құрайды (кестелер 3.3 және 3.4).

Кесте 3.3 - Циклдік жүктемедегі тұтқырлысерпімді және пластикалық деформация мәндері (№ 258 үлгі)

Циклдер саны	Деформация ϵ , %	
	тұтқырлысерпімді	пластикалық
1	17,8	82,2
2	17,3	82,7
3	18,0	82,0
4	18,2	81,8
5	19,6	80,4

Ескерту: жүктеу кезеңінің соңында қол жеткізілген ең үлкен деформация ϵ , %

Кесте 3.4 - Циклдік жүктемедегі тұтқырлысерпімді және пластикалық деформация мәндері (№ 76 үлгі)

Циклдер саны	Деформация ϵ , %	
	тұтқырлысерпімді	пластикалық
1	15,0	85,0
2	13,0	87,0
3	14,2	85,8

Бұл екі үлгіде деформация цикл санының өсуімен арта түседі, бірақ бірінші біреуінің өсу жылдамдығы екіншісінен жоғары болады.

Бұл жұмыста зерттелген сынақ нәтижелері әр циклда асфальтбетонның ең үлкен деформациясы жүктеу периодының соңында, ал ең үлкен қайту деформациясы жүксіздену периодының соңында болатынын көрсетті. Қарастырылған жағдайда (жүктеу және жүксіздеу периодтарының ұзақтығы 600 секунд, кернеулер мәні 0,041-3,0 МПа аралығында, температура $T=22-24^{\circ}\text{C}$) асфальтбетон өте пластикалық дене болып табылғандықтан, пластикалық деформация мөлшері жүктеу периодының соңындағы жалпы деформацияның 80-87%-ын құрайды.

Тығыз көлік қозғалысының ағынында, асфальтбетон қабатының төменгі бөлігінің кернеуленген күйлері келесі көліктің өтуіне дейін толығымен демалып үлгіре алмайды. Нәтижесінде кернеулі күйдегі автокөлік жолдарындағы орнының жылжымалылығы ұлғайып, ол жарамдылық мерзімінің қысқаруына алып келеді.

3.4 Бөлім бойынша қысқаша қорытынды

Тәжірибелік, теориялық және сандық зерттеу нәтижелерінен, осы бөлімде орындалған жұмыстардан келесі қорытындылар жасалды:

1. 0,036 МПа-дан 0,763 МПа-ға дейінгі жүктемеде асфальтбетонның 148 үлгілерінің қирауына дейін жүргізілген сынақ нәтижелерінің механикалық сипаттамалары жасалды. Осы берілгендерден $22-24^{\circ}\text{C}$ температурасында асфальтбетонның ұзақ беріктік қисығы тұрғызылды және ол дәрежелік функциямен жуықталды;

2. сынақ нәтижелерінен асфальтбетонның деформациясының қирауы аз болып табылады: ең үлкен деформация 0,036 МПа кернеуінде 4 % құрайды, ал ең үлкен меншікті деформация жұмысы 0,638 МПа кернеуінде $0,7101 \cdot 10^{-8}$ Дж/см³ тең;

3. асфальтбетон үлгілерінің қирау сипаттамалары (қирау уақыты, қирау деформациясы, қираудың меншікті жұмысы және беріктігі) жүктеу жылдамдығынан тәуелділігі дәрежелік функциямен жоғары дәлдікте сипатталады;

4. тұрақты жүктеу жылдамдығындағы жүктемесі асфальтбетон үлгілерінің деформациясы мен қирау сипаттамаларына қатты әсер етеді: жүктеу жылдамдығының 0,000563 МПа/с -тан 0,651864 МПа/с-қа дейін 1158 (шамамен 1200) есе артуымен қирау уақыты, қираудың меншікті жұмысы мен қираудың деформациясы сәйкесінше 242, 160 және 3 есе азаяды, ал беріктігі 5 есе артады;

5. тұрақты жүктеу жылдамдығы режимінде асфальтбетонның үлгілерінің қирау процесіндегі зақымдануының жинақталуы Бейли интегралымен сипатталды және ол жүктеу тарихы ескерілуіндегі қирау уақыты есептелді.

6. асфальтбетон үлгілерінің циклдік жүктемеде зерттелген сынақ нәтижелерінен әр циклда асфальтбетонның ең үлкен деформациясы жүктеу периодының соңында, ал ең үлкен қайту деформациясы жүксіздену периодының соңында болатынын көрсетті. Қарастырылған жағдайда (жүктеу

және жүксіздеу периодтарының ұзақтығы 600 секунд, кернеулер мәні 0,041-3,0 МПа аралығында, $T=22-24^{\circ}\text{C}$ температура) асфальтбетон өте пластикалық дене болып табылады: пластикалық деформация мөлшері жүктеу периодының соңындағы жалпы деформацияның 80-87%- ын құрайды.

ҚОРЫТЫНДЫ

Диссертациялық жұмыста, реономды материалдар деформациясының физикалық сызықты (сызықты еместігін) бағалаудың тәжірибелік реологиялық параметр деп аталатын жаңа параметрі енгізілді. Бұл параметр көмегімен реономдық үдерістер зерттелді. Ю.Н. Работновтың мұралық сызықты емес теңдеуінің параметрлерін анықтайтын жаңа тиімді әдісі табылды. Реономды материалдардың жылжымалылық қисығын есептеу әдістері мен алгоритмдері жасалды және компьютерлік бағдарлама әзірленді. Материалдардың жылжымалылығының сызықтық емес деформациясының есептеулер нәтижелері әдебиеттерден алынған тәжірибелік мәліметтермен тексерілді. Және тұтқырлысерпимді материалдардың кернеулі релаксациясы есептері шешілді. Реономды материалдардың бірі, асфальтбетон материалы Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институтында тәжірибелік түрде зерттелді және әр түрлі жүктеу режимдерінде материалдың жылжымалылығына әсері зерттелді. Материалдардың беріктігі мен шыдаммерзімін бағалауда, реономды материалдардың жылжымалылығы мен зақымданғандығына жүктеу режимінің әсерін модельдеу және зерттеу жүргізілді.

Диссертациялық жұмыстың нәтижелері бойынша қорытынды:

1. Ю.Н. Работновтың сызықтық емес интегралдық теңдеуіне бөлшек-экспоненциалды Работнов ядросы немесе Абель ядросын пайдалана отырып, реономды материалдардың жылжымалылығының сызықтық емес деформациясына сәйкесті теңдеулер алынды. Жылжымалылық параметрлерін α , ε_0 , δ , β және λ анықтаудың жақсартылған әдістері ұсынылды. Соның ішінде реономды материалдардың жылжымалылығын сипаттауда Ю.Н. Работновтың сызықтық емес интегралдық теңдеуінің Абель ядросының параметрлерін (α , δ) табудың жаңа тиімді әдістері жасалды. α параметрін табу үшін бисекция әдісі қолданылды;

2. жылжымалылық параметрлерінің α және δ мәндерін жоғары дәлдікпен есептейтін алгоритм және сәйкесті компьютерлік бағдарлама әзірленді;

3. Реономды материалдардың сызықтық емес деформациялану процесін сипаттайтын толық әдістемесі жасалды. Тәжірибелік және модельдік реологиялық параметрлер және изохронды қисықтарының ұқсастық коэффициенттері туралы түсінік енгізілді. Реономды материалдардың жылжымалылығында сызықтық емес деформациялануын сипаттау үшін олардың көмегімен әр түрлі деңгейдегі кернеулерде шартты лездік деформацияларды қалай табуға болатындығы көрсетілді;

4. нейлон 6, ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) материалы, СВМ арамидтік талшығы, EDT-10 шайыры, $T=2000, 2200, 2400, 2600, 2800^\circ C$ температураларындағы поликристалды графит және $T=20, 30, 40, 50, 60^\circ C$ температураларындағы эпоксифенолды шыныпластик, полиэфирлі полимербетон материалдарының тәжірибелік сынақ нәтижелеріне ұсынылған әдістер мен сәйкесті әзірленген бағдарлама көмегімен жүзеге асыру процесі көрсетілді. Ұсынылған әдістеменің дәлдігі жоғары екендігі айқын көрсетілді.

Реономды материалдардың жылжымалылық қисығынан кернеу релаксациясының қисықтары салынды;

5. сатылы және «жүктеу-жүксіздеу» циклдік жүктемелерде сыналған полиэфирлі полимербетон материалының зерттеу нәтижелерінен алынған жылжымалылық деформациясының мәндеріне математикалық модельдеу жасалды. Әр түрлі деңгей кернеулеріндегі полиэфирлі полимербетон материалының деформациялану мәндері ұсынылған математикалық теңдеулермен есептелді. Полиэфирлі полимербетон материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері мен есептелген мәндері арасындағы сәйкестік жақсы екендігі көрсетілді;

6. тұрақты жүктеу жылдамдығындағы, яғни эпоксифенолды шыныпластик материалының $T=30^{\circ}C$ температурада және $\dot{\sigma} = 17,3$ МПа/с жүктеу жылдамдығында бірсыткік тікелей созуға сыналғандағы материалдың жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндеріне математикалық сипаттама жасалды. Материалдың жылжымалылық параметрі мен жылжымалылық деформациясы мәндері есептелді және анықталған мәндерден жылжымалылық қисығы тұрғызылды. Есептелген деформация мәндері мен тәжірибелік деформация мәндері арасындағы сәйкестік жақсы екендігі көрсетілді;

7. Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институтында асфальтбетон үлгілерінің $22-24^{\circ}C$ температурада тікелей созуға сыналғандағы материалдың деформациясы мен қирау сипаттамаларының тәжірибелік нәтижелері мәндері алынды. Асфальтбетон үлгілеріне тұрақты кернеуде, сатылы және тұрақты жүктеу жылдамдығындағы жүктемеде жүргізілген тәжірибелік сынақтары зерттелді.

8. сатылы жүктеме бойынша тәжірибелік зерттеулер нәтижесінен, ұсақ түйіршікті ыстық тығыз асфальтбетон $22-24^{\circ}C$ температурада және $0,041$ –ден $0,183$ МПа-ға дейінгі кернеулерде сызықты емес деформацияланады. Ол әр түрлі жүктеу деңгейлері мен кернеулердегі тәжірибелік реологиялық параметр қисықтарынан изохронды жылжымалылық қисықтарын құру жолынан көрнекі көрсетілді. Асфальтбетон үлгілерінің жылжымалылығының сызықты емес деформациялануы ұсынылған әдіспен және компьютерлік бағдарламалау көмегімен жақсы сипатталды;

9. $0,000563$; $0,001698$; $0,005507$; $0,007244$; $0,015137$; $0,023918$; $0,048869$; $0,058036$; $0,205869$; $0,467757$; $0,651864$ МПа/с жүктеу жылдамдықтарындағы жүктемелерде сыналған асфальтбетон үлгілерінің жылжымалылығына математикалық модельдеу жасалды. $\dot{\sigma} = 0,651864$ МПа/с жүктеу жылдамдығындағы асфальтбетон материалының жылжымалылық қисығының тәжірибелік мәндері есептелген мәндерімен сәйкес келетіні көрсетілді;

10. $0,036$ МПа-дан $0,763$ МПа-ға дейінгі жүктемеде асфальтбетонның 148 үлгілерінің қирауына дейін жүргізілген сынақ нәтижелерінің механикалық сипаттамалары жасалды. Осы берілгендерден $22-24^{\circ}C$ температурасында асфальтбетонның ұзақ беріктік қисығы тұрғызылды және ол дәрежелік функциямен жуықталатыны көрсетілді.

11. асфальтбетонның қирау сипаттамалары (қирау уақыты, қирау деформациясы, қираудың меншікті жұмысы және беріктігі) жүктеу жылдамдығынан тәуелділігі дәрежелік функциямен жоғары дәлдікте сипатталды. Сынақ нәтижелерінен, тұрақты жүктеме жылдамдығында асфальтбетон материалының деформациясы мен қирау сипаттамаларына қатты әсер ететіні көрсетілді: жүктеу жылдамдығының 0,000563 МПа/с -тан 0,651864 МПа/с-қа дейін 1158 (шамамен 1200) есе артуымен қирау уақыты, қираудың меншікті жұмысы мен қираудың деформациясы сәйкесінше 242, 160 және 3 есе азаяды, ал беріктігі 5 есе артады;

12. асфальтбетон үлгілерінің циклдік жүктемеде зерттелген сынақ нәтижелерінен әр циклда асфальтбетонның ең үлкен деформациясы жүктеу периодының соңында, ал ең үлкен қайту деформациясы жүксіздеу периодының соңында болатынын көрсетті. Қарастырылған жағдайда (жүктеу және жүксіздеу периодтарының ұзақтығы 600 секунд, кернеулер мәні 0,041-3,0 МПа аралығында, $T=22-24^{\circ}$ С температура) асфальтбетон өте пластикалық дене болып табылады: пластикалық деформация мөлшері жүктеу периодының соңындағы жалпы деформацияның 80-87%-ын құрайды.

Диссертация жұмысына қойылған тапсырмалардың барлығы толықтай орындалды. Ғылыми кеңесшілермен бірігіп, барлық белгіленген, орындалуы қиын тәжірибелік жұмыстары мен әдістемелері жүргізілді және алынған математикалық модельдеулердің реономды материалдарының жылжымалылығына салыстырмалы талдауы жасалды. Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институтында зерттелген асфальтбетон үлгілерінің жылжымалылығының тәжірибелік деформация мәндері математикалық модельдеу арқылы есептелген мәндерімен салыстырылды. Асфальтбетон үлгілерінің жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндері мен есептелген мәндері арасындағы сәйкестік жақсы екендігі көрсетілді.

Диссертациялық жұмысында алынған реономды материалдардың жылжымалылығының сынақ нәтижелері аналитикалық формулалармен ұштастырылды. Бұл формулалар көптеген материалдарды зерттегенде, әрі қарай талдауда пайдалануға мүмкіндік береді. Бұл жұмыс деформацияланатын қатты дене механикасы, т.б. пәндер шеңберінде айтарлықтай құнды және даму деңгейіне елеулі үлес қосатын болады.

Диссертацияның әдебиеттерге сараптамалық шолуы, әлемдегі барлық жетекші мемлекеттер ғалымдарының заманауи жұмыстарын қамтиды. Алынған нәтижелер, Scopus, Web of Science дерекқорымен индекстелетін халықаралық ғылыми журналдарында жарияланды, сонымен қатар отандық және шет елдерде өткізілген халықаралық конференцияларда талқыланды.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Кристенсен Р. Введение в теорию вязкоупругости. - М: Мир, 1974. – 340 с.
- 2 Георгиевский Д.В., Климов Д.М., Победря Б.Е. Особенности поведения вязкоупругих материалов // Механика твердого тела. - 2004, № 1, - С. 119-157.
- 3 Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твёрдого тела. – Москва: Наука, 1988. - 712 с.
- 4 Искакбаев А. Деформацияланатын қатты дене механикасының негіздері. Оқу құралы. - Алматы «Қазақ университеті», 2007. - 176 б.
- 5 Tschoegl N.N. The phenomenological theory of linear viscoelastic behavior: An introduction // Springer-Verlag, Berlin. - Germany, 1989.
- 6 Ferry J.D. Viscoelastic properties of polymers // Willey, New York, 3rd edition. - USA, 1980.
- 7 Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. – Москва: Наука, 1966. - 752 с.
- 8 Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел. - Москва: Наука, 1977. - 384 с.
- 9 Timoshenko S., Goodier J. Theory of elasticity //McGraw-Hill: New York. - USA, 1970.
- 10 Lurie A.I. Theory of elasticity // Springer-Verlag: Berlin. - Heidelberg, 2005.
- 11 Volterra V. Lecons sur les fonctions de lignes. - Paris. Gauthier-Villard, 1913.
- 12 Работнов Ю.Н. Равновесие упругой среды с последствием //ПИММ. - 1948. - Т. 12, Вып. 1. - С. 53-62.
- 13 Работнов Ю.Н., Паперник Л.Х., Степанычев Е.И. Нелинейная ползучесть стеклопластика ТС8/3-250 // Механика полимеров. - 1971. - № 3. - С. 391-397.
- 14 Работнов Ю.Н., Паперник Л.Х., Степанычев Е.И. Приложение нелинейной теории наследственности к описанию временных эффектов в полимерных материалах // Механика полимеров. - 1971. -№1. – С. 74-87.
- 15 Р.Д. Максимов, Ч.Л. Даугсте, Е.А. Соколов. Особенности соблюдения температурно-временной аналогии при физически нелинейной ползучести полимерного материала //Механика полимеров. – 1974. - №3. - С. 415-426.
- 16 Суворова Ю.В., Мосин А.В. Определение параметров дробно-экспоненциальной функции Работнова с использованием интегрального преобразования и современного программного обеспечения // Проблемы машиностроения и автоматизации. - 2002. - №4. - С. 54-56.
- 17 Суворова Ю.В. О нелинейно-наследственном уравнении Ю.Н. Работнова и его приложениях // Механика твердого тела. – 2004. - №1. – С. 174-181.
- 18 Мосин А.В. Вычисление параметров нелинейного определяющего уравнения наследственного типа // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2002. - № 2. - С. 83-88.
- 19 Maksimov R.D. and Plume E. Long-term creep of hybrid aramid/glass-fiber-reinforced plastics // Mechanics of Composite Materials. – 2001. - Vol. 37, No.4. - P. 271-280.

- 20 Дергунов Н.Н., Наперник Л.Х., Работнов Ю.Н. Анализ поведения графита на основе нелинейной наследственной теории // ПМТФ. – 1971. - №2. - С. 76-82.
- 21 R.D. Maksimov, L. Jirgens, J. Jansons and E. Plume. Mechanical properties of polyester polymer-concrete // *Mechanics of Composite Materials*. – 1999. - Vol. 35, No. 2. - P. 99-110.
- 22 Фанг Я.Ч. Математические модели зависимости напряжение – деформация для живых мягких тканей // *Механика полимеров*. - 1975. - №5. - С. 850-867.
- 23 Fung Y.C. Stress-strain history relations of soft tissues in simple elongation // In: *Biomechanics, Its Foundations and Objectives*. - New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs. - 1972. - P. 181-208
- 24 Khokhlov A.V. Deformation and long-term strength of a thick-walled tube of physically non-linear viscoelastic material under constant pressure // *Russian Metallurgy (Metally)*, Allerton Press Inc. (United States). 2020. - № 10. - P. 41-49.
- 25 Хохлов А.В. Критерии немонотонности и отрицательности коэффициента Пуассона реономных материалов, описываемых нелинейным соотношением вязкоупругости Работнова // *Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика, Москва*. - 2020. - № 3. - С. 32-38.
- 26 Khokhlov A.V. Applicability indicators and identification techniques for a nonlinear Maxwell–type elastoviscoplastic model using loading–unloading curves // *Mechanics of Composite Materials*. - Kluwer Academic/Plenum Publishers (United States). 2019. –Vol. 55, № 2. - P. 195-210.
- 27 Khokhlov A.V. Effect of the Initial Stage of Strain on the Properties of Relaxation Curves Generated by the Rabotnov Nonlinear Relation for Viscoelastic Materials // *Moscow University Mechanics Bulletin*. - Allerton Press Inc. (United States). 2019. – Vol. 74, № 4. - P. 83-88
- 28 Khokhlov A.V. Properties of the Set of Strain Diagrams Produced by Rabotnov Nonlinear Equation for Rheonomous Materials // *Mechanics of Solids*. - Allerton Press Inc. (United States). - 2019. Vol. 54, № 3. - P. 384-399.
- 29 Хохлов А.В. Оценка влияния начальной стадии деформирования на свойства кривых релаксации, порождаемых нелинейным соотношением Работнова для вязкоупругих материалов // *Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика*. – Москва. – 2019. - № 4. – С. 28-33.
- 30 Хохлов А.В. Свойства семейства диаграмм деформирования, порождаемых нелинейным соотношением Ю.Н. Работнова для вязкоупругопластичных материалов // *Известия РАН. Механика твердого тела*, 2019, № 2, с. 29-47.
- 31 Khokhlov A.V. A nonlinear Maxwell-Type model for Rheonomic Materials: Stability under Symmetric Cyclic Loadings // *Moscow University Mechanics Bulletin*. - Allerton Press Inc. (United States). – 2018. - Vol. 73, № 2. - P. 39-42.
- 32 Khokhlov A.V. Analysis of properties of ramp stress relaxation curves produced by the Rabotnov non-linear hereditary theory // *Mechanics of Composite Materials*. - Kluwer Academic/Plenum Publishers (United States). – 2018. –Vol. 54, № 4. - P. 473-486.

33 Хохлов А.В. Свойства диаграмм нагружения и разгрузки, порождаемых нелинейным определяющим соотношением типа Максвелла для реономных материалов //Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Физико-математические науки. - Издательство ГОУ ВО СамГТУ (Самара). – 2018. – Т. 22, № 2. - С. 293-324.

34 Суворова Ю.В., Алексеева С.И. Инженерные приложения модели наследственного типа к описанию нелинейного поведения полимеров и композитов с полимерной матрицей //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2000. - Т. 66, №5. - С. 47-51.

35 Iskakbayev A., Teltayev B., Alexandrov S. Determination the creep parameters of linear viscoelastic materials //Journal of Applied Mathematics. – 2016. - P. 1-6.

36 Iskakbayev A., Teltayev B., Rossi C.O. Steady-state creep of asphalt concrete //Applied Sciences. – 2017. – No. 7. - P. 1-13.

37 Teltayev B.B., Iskakbayev A., Oliviero Rossi C. Regularities of creep and long-term strength of hot asphalt concrete under tensile // Functional Pavement Design – Proceedings of the 4th Chinese-European Workshop on Functional Pavement Design. – CEW. – 2016. - P.169-178.

38 Iskakbayev A., Teltayev B., Rossi C.O., Yensebayeva G. Determination of nonlinear creep parameters for hereditary materials // Applied Sciences. – 2018. - P. 1-17.

39 Iskakbayev A., Teltayev B., Andriadi F., Estayev K., Suppes E., Iskakbayeva A. Experimental research of creep, recovery and fracture processes of asphalt concrete under tension // Proceedings of the 24th International Congress on Theoretical and Applied Mechanics. - Montreal, Canada. 21-26 August 2016. – P. 1-3.

40 Iskakbayev A., Teltayev B., Oliviero Rossi C. Deformation and strength of asphalt concrete under static and step loadings // Transport Infrastructure and Systems. Proceedings of the AИТ International Congress on Transport Infrastructure and Systems (TIS 2017). - Rome, Italy. - P. 3-8.

41 Хохлов А.В. Сравнительный анализ свойств кривых ползучести, порождаемых линейной и нелинейной теориями наследственности при ступенчатых нагружениях // Математическая физика и компьютерное моделирование. Издательство "Волгоградский государственный университет". – Волгоград. – 2018. – Т. 21, № 2. - С. 27-51.

42 Хохлов А.В. Анализ общих свойств кривых ползучести при ступенчатом нагружении, порождаемых нелинейным соотношением Работнова для вязкоупругопластичных материалов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Естественные науки». - Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Москва. – 2017. - № 3. - С. 93-123.

43 Хохлов А.В. Индикаторы применимости и методики идентификации нелинейной модели типа Максвелла для реономных материалов по кривым ползучести при ступенчатых нагружениях //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Естественные науки». - Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Москва. – 2018. - № 6. - С. 92-112.

- 44 Бахрах Г.С. Усталостное разрушение асфальтобетонных покрытий и пути замедления этого процесса. Строительство и эксплуатация автомобильных дорог //Экспресс-информация ЦБНТИ Минавтодора РСФСР. - 1980. - №9. -40 с.
- 45 Москвитин В.В. Циклические нагрузки элементов конструкций. - Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. - 1981. – 344 с.
- 46 Бондарь В.С., Бурчаков С.В., Даншин В.В. Математическое моделирование процессов упругопластического деформирования и разрушения материалов при циклических нагрузках //Проблемы прочности и пластичности. – 2010. – Вып. 72. - С. 18-27.
- 47 Хохлов А.В. Нелинейная модель типа Максвелла для реономных материалов: стабильность при симметричных циклических нагрузках //Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. - Издательство Моск. ун-та. – Москва. – 2018. - № 2. - С. 59-63.
- 48 Iskakbayev A., Teltayev B., Rossi C.O. Modeling of cyclic strength for the asphalt concrete considering damage accumulation // Applied Sciences. – 2017. - No. 7. - P. 2-11.
- 49 Iskakbayev A., Teltayev B.B., Rossi CO., Yensebayeva G.M. Experimental investigation of an asphalt concrete deformation under cyclic loading // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. – 2018. - 2(428). - P. 104-111.
- 50 Золотарев В.А. Долговечность дорожных асфальтобетонов. - Харьков, Вища школа. – 1977. - 116 с.
- 51 Бабков В.Ф. Дорожные условия и режимы движения автомобилей. – Москва, транспорт. – 1967. - 224 с.
- 52 Iskakbayev A., Teltayev B.B., Rossi CO., Estayev K. A new simple damage accumulation model for predicting of an asphalt concrete cyclic strength // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. – 2018. - 5 (431). - P. 38-47.
- 53 Iskakbayev A.I., Teltayev B.B., Yensebayeva G.M. Mechanical characteristics of asphalt concrete at different loading rates // News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. – 2019. – Vol. 6, №438. - P. 64–69.
- 54 Хохлов А.В. Идентификация нелинейной модели упруговязкопластичности типа Максвелла по диаграммам нагружения с постоянными скоростями //Деформация и разрушение материалов. - Издательство Наука и технологии. – Москва. – 2018. - № 4. - С. 2-10.
- 55 Хохлов А.В. Свойства семейства кривых нагружения с постоянной скоростью, порождаемых нелинейной моделью вязкоупругопластичности типа Максвелла //Машиностроение и инженерное образование. - Издательство Университет машиностроения. – Москва. – 2017. - № 1. - С. 57-71
- 56 Cai W., McDowel G.R., Airey G.D. Discrete element modeling of uniaxial constant strain rate tests on asphalt mixtures //Granular Matter. - 2013. - №15. - P. 163-174.

- 57 Islam M.D.R., Ahmad M., Tarefder R.A. Effect of loading rate on the properties of asphalt concrete using three-point bending test // *Advanced Materials Research*. - 2015. - No. 1096. - P. 553-556.
- 58 Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими. - Москва: Транспорт. – 1972. - 424 с.
- 59 Сильянов В.В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения. – Москва: Транспорт. – 1977. - 303 с.
- 60 Качанов Л.М. Основы механики разрушения. - Изд-во «Наука». – 1974. - 312 с.
- 61 Работнов Ю.Н. Введение в механику разрушения. -Москва «Наука». – 1987. - 80 с.
- 62 Новожилов В.В. О перспективах феноменологического подхода к проблеме разрушения //Механика деформируемых тел и конструкций. – М.: Наука. – 1975. - С. 349-359.
- 63 Болотин В.В. Трещиностойкость материалов и континуальная механика повреждений //ДРАН. - 2001. - Т. 376, №6. - С. 760-762.
- 64 Искакбаев А.И., Искакбаева А.А. О влиянии трещины на долговечность стареющих тел //Известия РАН. Механика твердого тела. - 2003. - №5. - С.121-127.
- 65 Искакбаев А.И. Интегральное представление кинетики повреждений материалов //Известия РАН. Механика твердого тела. – 2002. - №2. - С. 127-133.
- 66 Чаусов Н.Г., Богданович А.З. Моделирование кинетики деформирования материала в зоне предразрушения. //Проблемы прочности, НАН Украины. – Киев. – 2003. - №2. - С. 54-65.
- 67 Чаусов Н.Г., Лебедев А.А., Богданович А.З. О предельной поврежденности материала в зоне концентратора //Проблемы прочности, НАН Украины. – Киев. – 2002. - №6. - С. 31-37.
- 68 Iskakbayev A.I., Teltayev V.B., Yensebayeva G.M., Kutimov K.S.. Computer modeling of creep for hereditary materials by Abel’s kernel // *News of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and technical sciences*. – 2018. – Vol. 6, No. 432. - P. 66-76.
- 69 Iskakbayev A., Teltayev V.B., Rossi C.O., Yensebayeva G.M., Abu B., Kutimov K. Impact of loading rate on asphalt concrete deformation and failure //Magazine of Civil Engineering. - 2020. - 100 (8). Article No. 10008. – P. 1-8.
- 70 Искакбаев А., Телтаев Б.Б., Енсебаева Г.М., Кутимов К.С., Абу Б.Д. Анализ процессов ползучести и релаксаций материалов на основе нелинейной наследственной теории Работнова //XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник трудов в 4 томах, Д23. Т.3: Механика деформируемого твердого тела. – Уфа: РИЦ БашГУ. - 2019. – С. 376-378. //DOI: [10.22226/2410-3535-2019-congress-v3](https://doi.org/10.22226/2410-3535-2019-congress-v3)
- 71 Iskakbayev A.I., Teltayev V.B., Rossi C.O., Yensebayeva G.M. Analysis of the influence of loading mode on creep of rheonomic materials. Workshop on “Smart Nanostructured Materials: from Molecular Self-assembly to Advanced Applications”. - Rome, Italy. - 2019.

72 Искакбаев А.И., Енсебаева Г.М. Реономды процестерді изохронды жылжымалылық қисықтарының ұқсастық әдісімен модельдеу //Халықаралық жас ғалымдар мен студенттердің «Фараби әлемі» конференциясы. - Алматы, 2018. – Б. 66.

73 Искакбаев А., Енсебаева Г.М. Анализ влияния режима нагружения на ползучесть реономных материалов //Материалы IV Международной научно-практической конференции «Наука и образование в современном мире: вызовы XXI века». - Нур-Султан. – 2019. - С. 145-150.

74 Енсебаева Г.М., Кутимов К.С., Абу Б.Д. Исследование релаксации напряжений методом Работнова //Материалы международной научной конференции «Теоретические и прикладные вопросы математики, механики и информатики». – Караганда. – 2019. - С. 183-184.

75 Работнов Ю.Н., Милейко С.Т. Кратковременная ползучесть. – Москва: Наука. – 1970. - 224 с.

76 Goldhoff R.M. The application of Rabotnov's creep parameter //Proc. ASTM.- 1961. - Vol.61. - P. 907-919.

77 Новоженова О.Г. Воспоминания о функционалах Вольтерра, дробно-экспоненциальной функции Работнова, Миттаг-Леффлера и вырожденной гипергеометрической функциях, а также краткий обзор соответствующих работ //Труды конференции «Наследственная механика деформирования и разрушения твердых тел – научное наследие Ю.Н. Работнова». ИМАШ РАН. - М., 2014. - С. 113-116.

78 Работнов Ю.Н., Паперник Л.Х., Звонов Е.Н. Таблицы дробно-экспоненциальной функции отрицательных параметров и интеграла от нее. – Москва: Наука. – 1969. - 132 с.

79 Голуб В.П., Фернати П.В., Ляшенко Я.Г. Об определении параметров дробно-экспоненциальных ядер наследственности линейно вязкоупругих материалов //Прикладная механика. – 2008. – Т. 44, № 9. – С. 12-25.

80 Звонов Е.Н., Малинин Н.И., Паперник Л.Х., Цейтлин Б.М. Определение характеристик ползучести линейных упруго-наследственных материалов с использованием ЭЦВМ //Изв. АН СССР. МТТ. – 1968. - № 5. - С. 76-82.

81 Gavrilov D.A. and Markov B.A., Numerical method of determining the rheologic parameters of composites from test results // Mechanics of Composite Materials. -1987. - Vol. 22, No. 4. - P. 417-421.

82 Суворова Ю.В., Алексеева С.И. Инженерные приложения нелинейно-наследственной модели с учетом температуры //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2000. – Т. 66, № 6. - С. 48-52.

83 O. Emmanuel, V. Adanhounme, M.N. Hounkonnou. Hereditary kernel identification method of nonlinear polymeric viscoelastic materials //Mathematical Physics (math-ph) arXiv:1212.6219. – 2018. - P. 1-6.

84 Viktorova I., Alekseeva S., Holden L.K., Bates M.A., Maeser H. The Hereditary approach to time dependent modeling with fractional exponential function //North Carolina journal of Mathematics and statistics. – 2015. Vol. 1. - P. 58-62.

- 85 Осокин А.Е., Суворова Ю.В. Нелинейное определяющее уравнение наследственной среды и методика определения его параметров //Прикладная математика и механика. – 1978. – Т. 42, выпуск 6, - С. 1108-1114.
- 86 Rozovskii M.I. Some features of elasticity hereditary media // News of the USSR Academy of Sciences. – 1961. - No. 2. - P. 30-36.
- 87 Korn G.A., Korn T.M. Mathematical handbook for scientists and engineers. Definition, theorems, and formulas for reference and review. - New York, McGraw-Hill. - 1968.
- 88 Аннин Б.Д. Асимптотическое разложение экспоненциальной функции дробного порядка //ПММ. – 1961. – Т. 25, № 4. – С. 796-798.
- 89 Джон Шарп. Microsoft Visual C#. - Подробное руководство. 8-е издание. - 2017. – 848 с.
- 90 Искакбаев А. Основы механики деформируемого твердого тела. – Учебное пособие. - Алматы «Қазақ университеті». - 2008. – 215 с.
- 91 Вершинина С.В., Руденок О.В., Кулакова Н.С. Тарасова О.В. Статистические методы обработки данных: учебное пособие. - Тюмень: ТюмГНГУ. - 2015. – 160 с.
- 92 Борздова Т.В. Основы статистического анализа и обработка данных с применением Microsoft Excel. - Минск: ГИУСТ БГУ. – 2011. - 74 с.
- 93 Teltayev B.B. Fresh approach to low temperature cracking in asphalt concrete pavement //News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. – 2016. - 5(419). -P.161-178.
- 94 Teltayev B.B., Amirbayev Y.D. Experimental evaluation of strength for asphalt and polymer modified asphalt concretes at low temperatures //News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. – 2017. - 1(421). - P. 167-176.
- 95 Teltayev B.B. Evaluation of fatigue characteristics of hot mix asphalt with polymer additives // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. – 2017. -1(421). - P.141-148.
- 96 Teltayev B.B. Importance of rocks in road construction //News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. – 2017. - 3 (423). -P. 283-292.
- 97 Teltayev B.B. Fatigue failure of asphalt concrete pavement 1. Self-organization and mechanical interpretation // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. – 2017. – Vol. 3 No. 423. - P. 256-275.
- 98 Teltayev B.B. Fatigue destruction of asphalt concrete pavement. 2. Thermodynamics //News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. – 2017. -4(424). - P.148-169.
- 99 ҚР СТ 1225-2013. Жол, аэродром асфальтбетон қоспалары және асфальтбетон. Техникалық шарттар
- 100 ҚР СТ 1373-2013. Битумдар және битум тұтқырғыштар. Жол тұтқыр мұнай битумдар. Техникалық шарттар.

101 Superpave series No. 1. Performance graded asphalt binder specification and testing //Asphalt Institute. - Lexington. - 2003.

102 ҚР СТ 1284-2004. Құрылыс жұмыстарына арналған тығыз тау жыныстарынан алынған қиыршықтас және ұсақ тас. Техникалық шарттар.

103 EN 12697-33 (2003). Bituminous Mixtures. Test Methods for Hot Mix Asphalt. Part 33: Specimen prepared by roller compactor //European Committee for Standardization. - Brussels, Belgium.

104 Телтаев Багдат Бурханбайұлы, Искакбаев Алибай, Андриади Фемистокл Константинович. Устройство для определения механических характеристик материалов при растяжении. Патент №33243 Республика Казахстан (2018), Евразийский патент № 035218 (2020).

105 Искакбаев А.И., Телтаев Б.Б., С.Oliviero Rossi. Экспериментальные исследования ползучести и длительной прочности асфальтобетона при растяжении //Вестник КаздорНИИ. – 2017. - №1-2. – С. 53-54.

106 Fitzgerald J.E., Vakili J. Non linear characterization of sand-asphalt concrete by means of permanent-memory norms //Exp. Mech.- 1973. - №13. - P. 504–510.

107 Басалов Ю.Г., Кузнецов В.Н., Шестериков С.А. Определяющие соотношения для реономного материала //Изв. РАН. МТТ. – 2000. - №6. - С.69-89.

108 Yoder E.J., Witczak M.W. Principles of Pavement Design /John Wiley & Sons Inc.: Hoboken. – NJ, USA. – 1975. - P. 736.

109 Huang Y.H. Pavement Analysis and Design. 2nd ed. /Pearson Education, Inc.: Upper Saddle River. - NJ, USA. - 2004.

110 MS-4. The Asphalt Handbook, 7th ed. /Asphalt Institute: Lexington. - MA, USA. - 2008.

111 Papagiannakis A., Masad E. Pavement Design and Materials //John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken. - NJ, USA. - 2008.

112 Иванова Н.Н. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд. - Москва. Транспорт. - 1973. - 328 с.

113 Грушко И.М., Королев И.В., Борщ И.М., Мищенко Г.М. Дорожно-строительные материалы. - Москва. Транспорт. – 1991. - 357 с.

114 Гезенцевей Л.Б. Дорожный асфальтобетон. – Москва. Транспорт. – 1985. - 350 с.

115 Золотарев В.А., Ефремов С.В., Хамад Р.А. Влияние вида и уровня напряженно-деформированного состояния на коэффициент пластичности асфальтобетона // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. - 2012. – Т.1, №93. - С. 41-47.

116 Цытович Н.А. Механика грунтов. - Москва. Высшая школа. -1983. -288 с.

117 Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. - Москва. Высшая школа. - 1978. - 447 с.

118 Холмянский И.А. К вопросу определения долговечности асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог //Вестник СибАДИ. – 2011. - Выпуск 1(19). - С. 20-25.

- 119 Rabotnov Y.N. Creep problems in structural members //Amsterdam: North-Holland. - 1969.
- 120 EN 12697-46. (Darft). Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 46: Low temperature cracking and properties by uniaxial tension tests. - 2004.
- 121 EN 12697-24. Bituminous mixtures. Test method for hot mix asphalt, Part 24: Resistance to fatigue // European committee for standardization. - Brussels. Belgium. 2004.
- 122 Fakhri M., Kharrazi E.H., Aliha M.R.M., Berto F. The effect of loading rate of fracture energy of asphalt mixture at intermediate temperatures and under different loading modes // *Frattura ed Integrita Strutturale*. - 2018. - №43. - P. 113-132.
- 123 Малинин Н.Н. Ползучесть в обработке металлов. - М.: Машиностроение. - 1986. - 216 с.
- 124 Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. -М.: Наука. - 1974. - 573 с.
- 125 Черемской П.Г., Слезов В.В., Бетехтин В.И. Поры в твердом теле. - М.: Энергоатомиздат. - 1990. - 376 с.
- 126 Bailey J. An attempt to correlate some tensile strength measurements on glass: III // *Glass Industry*. - 1939. - №20. - P. 95-99.
- 127 Iskakbayev A.I., Teltayev B.B., Yestayev K.Z., Abu B.D. Long-term strength of asphalt concrete and its applications // *Construction and Building Materials*. - 2020. - Vol. 244, №30. -P. 1-11. // <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118325>
- 128 Завьялов М.А., Завьялов А.М. Оценка долговечности материала дорожного асфальтобетонного покрытия: энергетический и деформационный подходы // *Строительные материалы научно-технический и производственный журнал*. - СибАДИ, Омск. - 2011. - С. 34-35.
- 129 Scharapy R.A. Correspondence principle and a generalized J-integral for large deformation and fracture analysis of viscoelastic media // *International Journal of Fracture*. - 1984. - №25. P. 195-223.
- 130 Kim Y.R. Evaluation of healing and constitutive modeling of asphalt concrete by means of theory of nonlinear viscoelasticity and damage mechanics // PhD thesis, Texas A&M, College Station. - Texas. - 1988.
- 131 Kim Y.R., Lee Y.C., Lee H.Y. Correspondence principle for characterization of asphalt concrete // *Journal of Materials In Civil Engineering*. - 1995.- 7(1). P.59-68.
- 132 Kim Y.R., Little D.N. One-dimensional constitutive modeling of asphalt concrete // *Journal of Engineering Mechanics*. - 1990. - Vol. 116, No. 4. - P. 751-772.
- 133 Kim Y.R., Little D.N., Lytton R.L. Fatigue and healing characterization of asphalt mixtures // *Journal of Materials In Civil Engineering*. - 2003. - 15(1). P.75-83.
- 134 Levenberg E., Uzan J. Exposing the nonlinear viscoelastic behavior of asphalt-aggregate mixes // *Mechanics of Time-Dependent Materials*. - 2012. - No. 16. - P. 129-143.
- 135 Levenberg E. Modeling asphalt concrete viscoelasticity with damage and healing // *International Journal of Pavement Engineering*. - 2015. - P. 1-13.
- 136 Искакбаев А., Искакбаева А.А. Қатты денелер механикасы терминдерінің сөздігі. Қазақша-орысша-ағылшынша сөздік. - Алматы, 2006. - 399 с.

ҚОСЫМША А

Асфальтбетон үлгілері зерттелген құрылғының патенттерінің көшірмесі





**ЕВРАЗИЙСКАЯ ПАТЕНТНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
ЕВРАЗИЙСКОЕ ПАТЕНТНОЕ ВЕДОМСТВО**

ЕВРАЗИЙСКИЙ ПАТЕНТ



ЕВРАЗИЙСКИЙ ПАТЕНТ

№ 035218

Название изобретения:

«УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ»

Патентовладелец (льцы):

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО "КАЗАХСТАНСКИЙ ДОРОЖНЫЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ" (АО "КаздорНИИ")
(KZ)

Изобретатель (и):

Телтаев Багдат Бурханбайулы, Искакбаев Алибай,
Андриади Фемистокл Константинович (KZ)

Заявка №: 201700493
Дата подачи заявки: 06 октября 2017 г.
Дата выдачи патента: 18 мая 2020 г.

Настоящим удостоверяется, что евразийский патент выдан на изобретение с формулой, опубликованной в Бюллетене Евразийского патентного ведомства «Изобретения (евразийские заявки и патенты)» № 5 / 2020 год.

При уплате установленных годовых пошлин патент действует на территории государства - участников Евразийской патентной конвенции - Азербайджанской Республики, Кыргызской Республики, Республики Армения, Республики Беларусь, Республики Казахстан, Республики Таджикистан, Российской Федерации, Туркменистана.



ТЛЕВЛЕСОВА Сауле Январбековна
Президент Евразийского патентного ведомства