

ЕҢСЕБАЕВА ГҮЛЗАТ МҮРАТБЕКҚЫЗЫ

РЕОНОМДЫ МАТЕРИАЛДАРДЫҢ ЖЫЛЖЫМАЛЫЛЫҒЫ МЕН ЗАҚЫМДАНҒАНДЫҒЫНА ЖҮКТЕУ РЕЖИМІНІҢ ӘСЕРІН МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ЗЕРТТЕУ

«6D060300- Механика» мамандығы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алу үшін диссертациясына

АҢДАТПА

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. Деформацияланатын қатты дене механикасының негізгі есебінің бірі, ол тұтқырлысерпімді материалдардың деформациялану процестерін модельдеу. Модельді шартты түрде екі класқа бөледі: склерономдық және реономдық. Склерономдық модельдердің анықтауыш қатынастары уақыт түрлендірулеріне инвариант. Реономдық модельдер уақыттан айқын тәуелді операторлық қатынастармен сипатталады.

Қазіргі уақытта материалдардың тұтқырлысерпімді қасиетін анықтауға және сипаттауға болатын жетілдірілген тұтқырлысерпімділік теориясы мен әдістері бар. Онда сызықты және сызықты емес тұтқырлысерпімділік ажыратылады. Сызықты және сызықты 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.

Тұтқырлысерпімді материалдардың жылжымалылығының сызықты емес деформациялануын сипаттайтын анықтауыш қатынасын ең алғаш Ю.Н. Работнов ұсынған болатын және ол әлі күнге дейін математикалық есептеулердің мәселесі болып қалуда. Бұл анықтауыш қатынасы реономды материалдардың механикалық қасиеттерін сипаттауда кеңінен қолданылады.

Зерттелетін 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 немесе Абель ядросын 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. Сонымен бұл жұмыста физикалық сызықты (сызықты емес) реономды процестерді зерттеуде Ю.Н. Работновтың

мұралық сызықты емес тендеуінің параметрлерін анықтайтын жаңа тиімді әдісті табу талаптары қойылады.

Материалдардың ұзақ қызмет ету мерзіміндегі механикалық күйін есептеу қажет болса, онда жүктеу тарихының әсерін ескеру қажет. Реономды материалдардың жылжымалылығының сызықты емес деформациялануындағы параметрлі тендеуін тұрақты кернеуде, сатылы жүктемеде, жүктеу-жүксіздеу циклдік жүктеменің әр түрлеріндегі жүктемелерде және тұрақты жылдамдықтағы жүктеме режимдерінде сипаттауда қолдануға болады. Мұндай тендеуді материалдар конструкциясының инженерлік тәжірибелік есептеулерінде қолдану тиімді болып келеді.

Бұл жұмыста реономды материалдың бірі, асфальтбетон материалы зерттеледі. Ұсақ түйіршікті ыстық тығыз асфальтбетон көптеген елдерде, соның ішінде Қазақстанда автокөлік жолдарының үстінгі 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. Сондықтан, әр түрлі жүктеу режимдерінде және температураларда асфальтбетонның деформациялануы, беріктігін және шыдаммерзімін зерттеу тәжірибелік маңызды сұрақтардың бірі болып табылады.

Сондықтан Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институтында асфальтбетон үлгілері бірсыткік тікелей созуға сынауда әр түрлі режимдерде жүргізіледі. 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.

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. Пластикалық деформация процесі айрықша бірқалыпты емес, сол себептен денеде кездейсоқ микродеформациялар өрісі пайда болады.

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. Осындай зақымдардың жинақталуы әсерінен реономды материалдарда қирау процесі жылдам жүреді. Бұл жұмыста реономды материалдардың беріктігіне жүктеу режимдерінің әсері зерттеледі.

Зерттеудің 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 арамидтік 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 мұралық 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.

Қорғауға шығарылатын негізгі мәселелер. Зерттеу нәтижелері бойынша төмендегідей мәселелер шешілді:

- реономды материалдардың беріктігі мен шыдаммерзімін бағалауда, Ю.Н. Работновтың изохронды жылжымалылық қисықтарының әдісі негізінде реономды материалдардың сызықты емес деформациялануын сипаттаудың тиімді алгоритмі ұсынылды. Материалдың жылжымалылық параметрлерін α , ϵ_0 , δ , β және λ анықтаудың жақсартылған әдістері ұсынылды. Соның ішінде Абель ядросының параметрлерін (α , δ) табудың жаңа тиімді әдістері жасалды. α параметрін табу үшін бисекция әдісі қолданылды.

-жылжымалылық параметрлерінің α және δ мәндерін жоғары дәлдікпен есептейтін алгоритм және сәйкесті компьютерлік бағдарлама әзірленді. Реономды материалдардың жылжымалылық қисығынан кернеу релаксациясы қисықтары салынды.

-асфальтбетон үлгілеріне біросьтік тікелей созуға сынау бойынша тәжірибелік зерттеулер жүргізілді. Асфальтбетон үлгілерінің жылжымалылық процесіне тұрақты кернеуде, сатылы, тұрақты жүктеу жылдамдығы және циклдік (жүктеу-жүксіздеу) жүктемесі режимдерінің сынақтарының нәтижелері көрсетілді.

Жүргізілген зерттеулердің нақтылығы мен сипаты.

Ұсынылған алгоритмдердің дәлдігін анықтау үшін 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 нәтижелерімен зерттеулер жүргізілді. Ұсынылған әдістеменің дәлдігі жоғары екендігі көрсетілді. Математикалық аппараттың, теориялық зерттеулердің және тәжірибелік берілгендердің сапалық және сандық сәйкестігімен; зерттеу нәтижелерінің практикада қолданылуымен қамтамасыз етіледі.

Зерттеудің 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) реономды процестерді зерттеуде маңызды болып табылады. 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.

Теориялық тұрғыдан алғанда реономды материалдардың жылжымалылығының сызықты емес деформациялануын есептеу әдістері мен алгоритмдері және сәйкесті әзірленген компьютерлік бағдарлама басқа барлық реономды материалдардың деформациялануын сипаттайтын жақсы алгоритм бола алады.

Зерттеу нәтижелерінің 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.Ы. 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, олардың 3 жарияланымдары ҚР Білім және ғылым министрлігінің Білім және ғылым саласындағы бақылау комитеті ұсынған ғылыми басылымдарына жатады және Халықаралық ғылыми конференциялардың материалдарында 5 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.

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 тарауында** реономды материалдардың жылжымалылық процесін сипаттауда Ю.Н. Работновтың сызықтық емес интегралдық теңдеуі қарастырылды. Материалдың жылжымалылық қисықтары мен изохронды қисықтарының схемалық түрін қолдана отырып, Ю.Н. Работновтың изохронды жылжымалылық қисықтарының әдісі нақты түсіндірілді. Ю.Н. Работнов ұсынған мұралық материалдардың сызықты емес деформациялану процесіне сызықтық емес интегралдық теңдеуінің математикалық сипаттамасы келтірілген. Ю.Н. Работновтың сызықтық емес интегралдық теңдеуіне бөлшек-экспоненциалды Работнов ядросы немесе Абель ядросын пайдалана отырып, сәйкесті реономды материалдардың сызықты емес деформациясына сәйкесті теңдеу 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. Жылжымалылық параметрлерінің α және δ мәндерін жоғары дәлдікпен есептейтін алгоритм және сәйкесті компьютерлік бағдарлама әзірленді.

Реономды материалдардың сызықты емес деформациялану процесін сипаттаудың толық әдістемесі жасалды. Тәжірибелік және модельдік реологиялық параметрлер және изохронды қисықтарының ұқсастық коэффициенттері туралы түсінік енгізілді. Реономды материалдардың жылжымалылығында сызықты емес деформациялануын сипаттау үшін олардың көмегімен әр түрлі деңгейіндегі кернеулерде шартты лездік деформацияларды қалай табуға болатындығы көрсетілді. Нейлон 6, ТС 8/3-250 шыныпластик ($\Theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) материалы, СВМ араמידтік 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 сыналған нәтижелерін қолдану кезінде, ұсынылған әдістер мен сәйкесті бағдарлама көмегімен жүзеге асыру процесі көрсетілді. Ұсынылған әдістеменің дәлдігі жоғары екендігі көрсетілді. 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. Тұрақты жүктеу жылдамдығы режимінде сыналған эпоксифенолды шыныпластик материалының жылжымалылық деформациясының тәжірибелік мәндеріне математикалық модельдеу жасалды. Тұтқырлысерпімді материалдардың кернеулердің релаксациясы есептері шешілді.

Диссертацияның екінші тарауында «Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институтында» асфальтбетон үлгілері $22-24^\circ \text{ C}$ 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. Асфальтбетонның жылжымалылығының сызықтық емес деформациялануы ұсынылған әдістеменен жеткілікті түрде сипатталады.

Диссертацияның үшінші тарауында асфальтбетон үлгілерінің тікелей созылу схемасы бойынша тұрақты кернеудегі, тұрақты жылдамдықтағы жүктемеде және циклдік жүктемеде жүргізілген тәжірибелік сынақтары көрсетілді. Тұрақты кернеуде $0,036 \text{ МПа}$ -дан $0,763 \text{ МПа}$ -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. Асфальтбетонның қирау сипаттамалары (қирау уақыты, қирау деформациясы, қираудың меншікті жұмысы және беріктігі) жүктеу жылдамдығынан тәуелділігі дәрежелік функциямен жоғары дәлдікте сипатталды. Жүктеу жылдамдығы асфальтбетонның 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.

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, $T=22-24^{\circ}\text{C}$ температура) асфальтбетон өте пластикалық дене болып табылады: пластикалық деформация мөлшері жүктеу периодының соңындағы жалпы деформацияның 80-87%-ын құрайды.

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