

**“TIQXMMI” MILLIY TADQIQOT UNIVERSITETI HUZURIDAGI
FUNDAMENTAL VA AMALIY TADQIQOTLAR INSTITUTI
HUZURIDAGI № DSc.03/31.03.2022.T/FM.10.04 RAQAMLI ILMIY
KENGASH ASOSIDAGI BIR MARTALIK ILMIY KENGASH**

**“TOSHKENT IRRIGATSIYA VA QISHLOQ XO‘JALIGINI
MEXANIZATSIYALASH MUHANDISLARI INSTITUTI”
MILLIY TADQIQOT UNIVERSITETI**

ESHMATOV BAXTIYOR XASANOVICH

**QATLAMLI O‘ZAKLANGAN KOMPOZIT QOBIQLARNING
KUCHLANGANLIK-DEFORMATSIYALANGANLIK VA DINAMIK
HOLATINI BAHOLASH UCHUN MATEMATIK MODELLAR VA
HISOBLASH USULLARI**

**05.01.07 – Matematik modellashtirish. Sonli usullar va dasturlar majmui.
01.02.04 – Deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi**

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI DOKTORI (DSc)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

**Fizika-matematika fanlari doktori (DSc) dissertatsiyasi
avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктора (DSc)
физико – математических наук**

**Contents of dissertation abstract of the doctor (DSc)
of physical and mathematical sciences**

Eshmatov Baxtiyor Xasanovich

Qatlamli o‘zaklangan kompozit qobiqlarning kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik va dinamik holatini baholash uchun matematik modellar va hisoblash usullari

3

Эшматов Бахтиер Хасанович

Математические модели и численные методы для оценки напряженно-деформированного и динамического состояния слоистых армированных композитных оболочек

31

Eshmatov Bakhtiyor Khasanovich

Mathematical models and numerical methods for estimating the stress-strain and dynamic state of layered reinforced composite shells

61

E’lon qilingan ishlar ro‘yxati

Список опубликованных работ

List of published works

65

**“TIQXMMI” MILLIY TADQIQOT UNIVERSITETI HUZURIDAGI
FUNDAMENTAL VA AMALIY TADQIQOTLAR INSTITUTI
HUZURIDAGI № DSc.03/31.03.2022.T/FM.10.04 RAQAMLI ILMIY
KENGASH ASOSIDAGI BIR MARTALIK ILMIY KENGASH**

**“TOSHKENT IRRIGATSIYA VA QISHLOQ XO‘JALIGINI
MEXANIZATSIYALASH MUHANDISLARI INSTITUTI”
MILLIY TADQIQOT UNIVERSITETI**

ESHMATOV BAXTIYOR XASANOVICH

**QATLAMLI O‘ZAKLANGAN KOMPOZIT QOBIQLARNING
KUCHLANGANLIK-DEFORMATSIYALANGANLIK VA DINAMIK
HOLATINI BAHOLASH UCHUN MATEMATIK MODELLAR VA
HISOBLASH USULLARI**

**05.01.07 – Matematik modellashtirish. Sonli usullar va dasturlar majmui.
01.02.04 – Deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi**

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI DOKTORI (DSc)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Fan doktori (DSc) dissertatsiyasi mavzusi O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta’lim, fan va innovatsiyalar vaziligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.2.DSc/FM255 raqam bilan ro‘yxatga olingan.

Dissertatsiya “Toshkent irrigatsiya va qishloq xo‘jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti” Milliy tadqiqot universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o‘zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengashning veb-sahifasida (<http://tiame.uz>, info@ifar.uz) va “Ziyonet” Axborot ta’lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy maslahatchilar:

Mirsaidov Mirziyod

O‘zR FA akademigi, texnika fanlari doktori, professor

Abdikarimov Rustamxan Alimxanovich

Fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Safarov Ismoil Ibroximovich

Fizika-matematika fanlari doktori, professor

Ravshanov Normaxmad

Fizika-matematika fanlari doktori, professor

Nuraliyev Faxriddin Murodillaevich

Texnika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot:

Samarqand davlat arxitektura-qurilish universiteti

Dissertatsiya himoyasi “Toshkent irrigatsiya va qishloq xo‘jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti” Milliy tadqiqot universiteti huzuridagi Fundamental va amaliy tadqiqotlar instituti huzuridagi DSc.03/31.03.2022.T/FM.10.04 raqamli Ilmiy kengash asosidagi bir martalik Ilmiy kengashning 2024 yil «_____» _____ soat ____ dagi majlisida bo‘lib o‘tadi. (Manzil: Toshkent sh., 100000, Q.Niyoziy ko‘chasi 39 uy, Fundamental va amaliy tadqiqotlar instituti, 108-katta majlislar zali; (+99871) 237-09-61; faks: (+99871) 237-48-67, e-mail: info@ifar.uz.)

Dissertatsiya bilan “Toshkent irrigatsiya va qishloq xo‘jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti” Milliy tadqiqot universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (____ raqami bilan ro‘yxatga olingan). (Manzil: Toshkent sh., 100000, Q.Niyoziy ko‘chasi 39 uy. Tel.: (+99871) 237-09-61).

Dissertatsiya avtoreferati 2024 yil «____» _____ kuni tarqatildi.

(2024 yil «____» _____ dagi ____ raqamli reestr bayonnomasi).

B. J. Axmedov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash raisi,
O‘zR FA akademigi, fizika-matematika
fanlari doktori, professor

D. R. Rayimbayev

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash ilmiy kotibi,
fizika-matematika fanlari doktori

A. R. Hayotov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy
kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi,
fizika-matematika fanlari doktori, professor

KIRISH (fan doktori (DSc) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Dunyoda, insonning zamonaviy muhandislik faoliyatini rivojlantirish jarayonida ishlab chiqarish texnikasi va uni yaratish texnologiyasi murakkablashib bormoqda, shuning uchun muhandislik konstruksiyalarida yangi materiallardan, qoida tariqasida, bir jinsli bo‘lmagan – berilgan fizik-mexanik xususiyatlar majmuasidan foydalanish zarurati paydo bo‘ladi. So‘nggi yillarda tobora ko‘proq foydalanilayotgan bir jinsli bo‘lmagan materiallarning turlaridan biri bu kompozitsion materiallardir. Bunday materiallardan muhandislik konstruksiyalarida foydalanish nafaqat ularning ishlash xususiyatlarini sezilarli darajada yaxshilaydi, balki ba’zi hollarda an’anaviy materiallar doirasida amalga oshirilmaydigan konstruksiyalarni yaratishga imkon beradi. Muhandislik amaliyotida yangi kompozitsion materiallardan foydalanish, mustahkam, yengil va ishonchli konstruksiyalarni loyihalash va yaratish matematik modellarni, yupqa devorli konstruksiyalarning qatlamli o‘zaklangan elementlarining statikasi va dinamikasi masalalarini takomillashtirishni va kompozitsion materiallarning haqiqiy xususiyatlarini hisobga oladigan sonli hisoblash usullarini ishlab chiqishni talab qiladi.

So‘nggi yillarda dunyoda turli sanoat va qurilish sohalarida kompozitsion materiallardan foydalanishning jadal o‘sishi kuzatilmoqda. Ushbu o‘shishning sababi oxirgi foydalanuvchilar tomonidan, ayniqsa aerokosmik va mudofaa sohalarida uglerod tolalariga bo‘lgan talabning ortishi hisoblanadi. Hozirgi vaqtda kompozitsion materiallar bozori 114 milliard dollarga baholanmoqda va 2027 yilga kelib taxminan 170 milliard dollarga yetishi kutilmoqda, bu 2022 yildan 2027 yilgacha o‘rtacha 8.2 foizga ortdi degani.

Shuningdek, respublikamizda sanoat va qurilishda kompozitsion materiallardan konstruksiyalarni ishlab chiqarish va keng joriy etishga alohida e’tibor qaratilmoqda. Yangi zamonaviy kompozitsion materiallarga bo‘lgan ehtiyoj ularning fizik-mexanik va kimyoviy xususiyatlarini o‘rganish uchun ilmiy-tadqiqot markazlari va laboratoriyalarning sonini ko‘paytirishga yordam beradi.

Ushbu dissertatsiya tadqiqoti ma’lum darajada ushbu faoliyat sohasiga oid normativ-huquqiy hujjatlarda belgilangan maqsadlarga erishishga qaratilgan, shu jumladan O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 6 iyuldagi “O‘zbekiston Respublikasining 2022-2026-yillarga mo‘ljallangan innovatsion rivojlanish strategiyasini tasdiqlash to‘g‘risida” gi PF-165-son Farmoni, unda innovatsion rivojlanish strategiyasini amalga oshirishning ustuvor tarmoqlari qatoriga kiritilgan “**yangi kompozit materiallarni** ishlab chiqarishga innovatsion texnologiyalarni keng joriy qilish” ga alohida e’tibor qaratilmoqda. Shuningdek, innovatsion faoliyatni davlat tomonidan qo‘llab-quvvatlashning institutsional mexanizmlarini takomillashtirish orqali innovatsion faol tashkilotlar ulushini oshirishga qaratilgan chora-tadbirlar sifatida “... yashil iqtisodiyot tamoyillariga asoslangan qayta tiklanuvchi energetika, **yangi kompozit materiallar**, robototexnika, biotexnologiya, oziq-ovqat xavfsizligi, aqlli qishloq xo‘jaligi, aqlli tibbiyot, aqlli sanoat va klasterlash (mis va vinochilik) kabi strategik yo‘nalishlar bo‘yicha sun‘iy intellekt, buyumlar interneti hamda raqamlashtirish

texnologiyalarini joriy etishda resurslarni jamlash, yangi ish o‘rinlari va mahsulot yaratish hamda yangi xizmatlar tashkil qilish” aytib o‘tilgan. Ushbu loyihalarni zamonaviy dasturiy vositalar va axborot texnologiyalaridan foydalanmasdan amalga oshirish mumkin emasligini hisobga olib, O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 30-maydagi “O‘zbekiston Respublikasining seysmik xavfsizligini ta’minlash tizimini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi

PF-144-son Farmoniga ham e’tibor qaratish lozim. Ushbu hujjatga ko‘ra, “TIQXMMI” Milliy tadqiqot universitetiga zamonaviy sonli usul va dasturlardan (**PLAXIS, ANSYS, ABAQUS** va boshqalar) foydalangan holda “Suv omborlari va gidrotexnika inshootlarining zilzilabardoshligini baholash” o‘quv-ilmiy laboratoriyasini tashkil etish vazifasi yuklatilgan.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot O‘zbekiston Respublikasi fan va texnologiya rivojlanishining IV: “Matematika, mexanika va informatika” ustuvor yo‘nalishi doirasida bajarilgan.

Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha xorijiy ilmiy tadqiqotlar sharhi.

Hozirgi kunda dunyoning taniqli yetakchi ilmiy markazlari va oliy o‘quv yurtlarida – Virjiniya Politexnika universiteti (AQSH), Texas A&M universiteti (AQSH), Sharqiy Michigan universiteti (AQSH), Janubiy Florida universiteti (AQSH), Shanxay Jiao Tun universiteti (Xitoy), Lill universiteti (Fransiya), Rossiya Fanlar Akademiyasining Amaliy mexanika instituti (Rossiya), M.V.Keldish nomidagi Amaliy matematika instituti (Rossiya), Rossiya Fanlar Akademiyasi Sibir bo‘limining S.A.Xristianovich nomidagi Nazariy va amaliy mexanika instituti (Rossiya), Buyuk Pyotr Sankt-Peterburg Politexnika universiteti (Rossiya), S.P.Timoshenko nomidagi Mexanika instituti (Ukraina), Latviya universiteti (Latviya), Armaniston Respublikasi Milliy Fanlar Akademiyasining Mexanika instituti (Armaniston) va boshqalar kompozit materiallardan tayyorlangan yupqa devorli o‘zaklangan konstruksiyalar elementlarini statik va dinamik hisoblash sohasida faol ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda.

Hozirgi vaqtda ushbu markazlarda olib borilayotgan kompozitsion materiallardan yupqa devorli konstruksiyalar elementlarning statikasi va dinamikasi masalalarini o‘rganishning eng dolzarb yo‘nalishlari quyidagilardir: konstruksiya materialining bir jinsli bo‘lmaganligini hisobga olgan holda yupqa va qalin qobiqlarning yagona nazariyalarini (shu jumladan uch o‘lchovli nazariyalarni) ishlab chiqish (Sharqiy Michigan universiteti, AQSH); ko‘p qatlamli kompozit plastinalar va qobiqlarning matematik modellarini takomillashtirish (A&M Texas universiteti, AQSH); muhandislik materiallarini modellashtirish va kompozit materiallardan konstruksiyalarni tezlashtirilgan sinovdan o‘tkazish usullarini ishlab chiqish (Virjiniya Politexnika universiteti, AQSH); nazariy va eksperimental tadqiqotlar asosida kompozit konstruksiyalarni optimal o‘zaklashini ishlab chiqish (M.V.Keldish nomidagi Amaliy matematika instituti, Rossiya); statik va dinamik yuklanish hamda har xil harorat rejimlari sharoitida ishlaydigan o‘zaklangan, ko‘p qatlamli anizotrop, tarkibiy-bir jinsli bo‘lmagan, kompozit va

boshqa konstruksiyalarni tadqiq qilish (Rossiya Fanlar Akademiyasi Sibir bo'limining S.A.Xristianovich nomidagi Nazariy va amaliy mexanika instituti, Rossiya) va boshqalar.

Materialning geometrik va fizik parametrlarining kompozitsion materiallardan yupqa devorli konstruksiyalar elementlarining kuchlanganlik-deformatsiyalangan holatiga ta'siri muammolarini hal qilish uchun matematik modellar, sonli usullar, algoritmlar va dasturiy vositalar nazariyasini ishlab chiqish va qurish bo'yicha ilmiy tadqiqotlarni alohida e'tirof etamiz: ko'p qatlamli o'zaklangan yupqa devorli konstruksiyalarning kuchini baholash va prognoz qilish usullarini ishlab chiqish; turli statik va dinamik yuklar ta'sirida yupqa devorli konstruksiyalarni buzilish xavfini kamaytirishning samarali usullarini ishlab chiqish; materiallarning haqiqiy fizik-mexanik xususiyatlarini hisobga olgan holda yupqa plastinalar va qobiqlarning ustuvorligi masalalarini hal qilish uchun nazariy asoslarni yaratish va boshqalar.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Qatlamli yupqa devorli anizotrop o'zaklangan konstruksiyalar elementlarining kuchlanganlik-deformatsiyalangan holatini o'rganishda, statik va dinamik masalalarini hisoblash uchun nazariyalar, matematik modellar va usullarni yaratishda alohida hissa qo'shgan taniqli olimlar majmuasiga quyidagilar kiradi: S.A.Ambartsumyan, S.G.Lexnitskiy, X.M.Mushtari, P.M.Ogibalov, M.A.Koltunov, I.E.Troyanovskiy, J.E.Ashton, J.M.Whitney, E.I.Grigolyuk, P.P.Chulkov, V.V.Vasiliev, R.M.Jones, J.N.Reddy, M.S.Qatu, Y.V.Nemirovskiy, V.T.Gnuni, A.K.Malmeyster, V.P.Tamuj, G.A.Teters, A.E.Bogdanovich, I.M.Tuneyeva, V.D.Kubenko, P.S.Kovalchuk, L.V.Kurpa, A.Kaw, R.F.Gibson va boshqalar.

O'zbekistonda M.T.O'razboyev, V.K.Qobulov, F.B.Abutaliyev, T.B.Buriyev, T.Sh.Shirinqulov, S.S.Negmatov, F.B.Badalov, B.Mardonov, X.Eshmatov, M.Mirsaidov, K.Sultonov, T.Mavlyanov, I.I.Safarov, N.Ravshanov, SH.M.Shadimetov, B.A.Xudayarov, R.SH.Indiaminov, A.B.Ahmedov, R.A.Abdikarimov, M.K.Usarov va boshqalar tarkibiy elementlarning kuchlanganlik-deformatsiyalangan holatini baholash va prognoz qilish uchun matematik modellar va hisoblash usullarini ishlab chiqishda katta hissa qo'shdilar.

Shu bilan birga, qovushqoq-elastik xususiyatlarga ega va o'zaklangan tolalarning turli yo'nalishlariga ega qatlamlardan tashkil topgan yupqa devorli qatlamli o'zaklangan kompozit konstruksiyalar elementlarida sodir bo'ladigan jarayonlarni matematik modellashtirishda katta bo'shliqlar mavjud.

Tadqiqotning dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Toshkent irrigatsiya va qishloq xo'jaligini mexanizatsiyalash muhandislari institutining KXA-15-041 ilmiy-tadqiqot ishlari rejasiga kiruvchi "Kompozitsion materiallardan tayyorlangan qovushqoq-elastik yupqa devorli konstruksiyalar dinamikasining chiziqli bo'lmagan masalalarini yechishning samarali usullarini ishlab chiqish" (2009-2011) loyihasi; O'zbekiston Respublikasining 2021-2026 yillarga mo'ljallangan FZ-20200929327-sonli "Chiziqli bo'lmagan filtrlash va tuproq namligini hisobga olgan holda tuproq to'g'onlarining mustahkamligi uchun

ishonchli texnologiya va nazariyani ishlab chiqish” mavzusi; “Toshkent irrigatsiya va qishloq xo‘jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti” Milliy tadqiqot universitetida 2021-2023-yillarda “Materiallarning nohiziqli deformatsiyasini hisobga olgan holda yer osti inshootlarining mustahkamligi va dinamikasini hisoblashning istiqbolli usullarini ishlab chiqish” davlat budjet mavzusi doiralarida amalga oshirildi.

Tadqiqotning maqsadi Kirxgof-Lyav va Timoshenko nazariylari doirasida materialning geometrik nohiziqiligi va dissipativ xususiyatlarini hisobga olgan holda kompozitsion materiallardan yasalgan yupqa devorli anizotrop o‘zaklangan konstruksiya elementlarining statik va dinamik masalalarini nazariy asoslari, yechish uchun matematik modellar va usullarni ishlab chiqishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

- yupqa devorli anizotrop o‘zaklangan konstruksiyalar elementlarining kuchlanganlik-deformatsiyalangan holatini o‘rganish uchun nazariy asoslarni va umumlashtirilgan matematik modelni ishlab chiqish;

- anizotropiyaga ega statik va dinamik yuklar ta’sirida bo‘lgan yupqa devorli o‘zaklangan konstruksiyalar uchun chiziqli bo‘lmagan chegaraviy masalalarni sonli yechish uchun matematik modellar va usullarni takomillashtirish;

- tashqi yuklar ta’siri ostida qovushqoq-elastik yupqa devorli o‘zaklangan konstruksiyalar dinamikasini baholash uchun kuchsiz-singular yadroli bo‘linmaydigan chiziqsiz integro-differensial tenglamalar sistemasini olish;

- statik va dinamik yuklar ta’sirida qovushqoq-elastik yupqa devorli o‘zaklangan konstruksiyalar dinamikasi masalalarini sonli yechish uchun samarali yechim algoritmi va dasturiy vositalarni ishlab chiqish;

- turli fizik-mexanik va geometrik parametrlarning yupqa devorli o‘zaklangan qovushqoq-elastik konstruksiyalarning elementlarining statik va dinamik ta’sirini o‘rganish;

- qatlamli o‘zaklangan kompozit konstruksiyalarining elementlarini kuchlanganlik-deformatsiyalangan va dinamik holatini baholash uchun dasturiy vositalar majmuini yaratish.

Tadqiqot obyekti. Turli sanoat va qurilish sohalarida ishlatiladigan qatlamli anizotrop yupqa devorli o‘zaklangan konstruksiya elementlari.

Tadqiqot predmeti. Turli xil yuklar ta’sirida anizotrop o‘zaklangan yupqa devorli konstruksiya elementlarning ichki kuch omillarini hamda dinamik holatini baholash uchun nazariy asoslar, matematik modellar, sonli usullar, algoritmlar va dasturiy vositalarni ishlab chiqish.

Tadqiqot usullari. Dissertatsiya ishida Bubnov-Galerkin usuli, kuchsiz-singular relaksatsiya yadroli nohiziqli integro-differensial tenglamalar sistemani yechish usullari, kvadratura formulalari usuli, hisoblash eksperimentlar, Gauss usuli, cheklangan elementlar usuli qo‘llanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

- kompozit konstruksiyalar elementlarining qatlamliligini hisobga olgan holda qovushqoq-elastik anizotrop plastinalar, panellar va qobiqlarning dinamikasini baholash uchun nazariy asoslari takomillashtirildi;

- Kirxgof-Lyav va Timoshenko nazariyalari doirasida qovushqoq-elastik anizotropik o'zaklangan qatlamli konstruksiya elementlar dinamikasi masalalarining matematik modellari ishlab chiqilgan bo'lib, ular har bir qatlamda o'zaklangan tolalar yo'nalishini hisobga olishga imkon beradi;

- nochiziqli tebranishlar va qovushqoq-elastik anizotrop o'zaklangan plastinalar va qobiqlarning dinamik ustuvorligi masalalarini o'rganish uchun oddiy ajralmaydigan integro-differensial tenglamalar sistemalari dinamik tez o'sadigan siqilish va siljish yuklarini hisobga olgan holda olingan;

- yupqa devorli o'zaklangan qovushqoq-elastik konstruksiya elementlarining nochiziqli tebranishlar va dinamik ustuvorligi masalalari uchun oddiy nochiziqli integro-differensial tenglamalar sistemani sonli yechish uchun hisoblash algoritmi ishlab chiqilgan;

- Delphi algoritmik tilida ishlab chiqilgan dasturiy ta'minot asosida anizotropik o'zaklangan qovushqoq-elastik yupqa devorli plastinalarning turli xil yuklar, chegara shartlari va o'zaklangan tolalar yo'nalishi bo'yicha dinamik harakati o'rganildi;

- ABAQUS muhandislik dasturiy kompleksi yordamida anizotrop o'zaklangan to'rtburchak plastinalarning qanotsimon konfiguratsiyasining kuchlanganlik-deformatsiyalangan holati o'rganildi.

Tadqiqotning amaliy natijalari. Fizik-mexanik va geometrik parametrlarini va o'zaklangan tolalarning yo'nalishini hisobga olgan holda kompozit materiallardan yasalgan o'zaklangan plastinalar, panellar va qobiqlarning dinamik va kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini baholash va prognoz qilish uchun sonli usullar, algoritmlar va amaliy dasturlar majmuasini yaratishdan iboratdir.

Tadqiqot natijalarining ishonchligi yupqa devorli plastinalar va qobiqlar nazariyasining sinovdan o'tgan matematik apparati yordamida chegaraviy masalalarni to'g'ri qo'yish, matematik hisoblashlarning qat'iyligi, asosli yechim usullaridan foydalanish, aniq analitik yoki taqribiy sonli yechimlar ma'lum bo'lgan bir qator model masalalarini hal qilish, ko'rib chiqilgan masalalarning har biri uchun natijalarni kerakli aniqlikka qadar amaliy yaqinlashishini tekshirish, ishlab chiqilgan metodologiya bo'yicha olingan natijalarni taqqoslash, algoritmlar va hisoblash dasturlari model masalalarining ma'lum yechimlari bilan asoslanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati. O'tkazilgan tadqiqotlarning ilmiy ahamiyati kompozit konstruksiyalarning yupqa devorli elementlari nazariyasini rivojlantirishga muhim hissa qo'shadigan va ularning turli xil konstruksiya xususiyatlarini statik va dinamik ta'sirlar ostida hisobga olishga imkon beradigan nazariy asoslar va matematik modellar, usullar va algoritmlarni ishlab chiqishdan iborat.

Tadqiqotning amaliy ahamiyati. Amaliy ahamiyati qatlamli o'zaklangan konstruksiyalar elementlarining mustahkamligi va dinamik holatini baholash va materialning haqiqiy xususiyatlarini hisobga olgan holda inshootlarni loyihalashda tadqiqot natijalaridan amaliy foydalanish uchun ishlatiladigan algoritmlar va amaliy dasturlar majmuasini ishlab chiqishdan iborat.

Tadqiqot natijalarini tadbiiq qilish.

Yupqa devorli qatlamli o‘zaklangan konstruksiyalarning statikasi va dinamikasini sonli tahlil qilish uchun ishlab chiqilgan matematik modellar, hisoblash usullari va algoritmlari asosida turli xil yuklar ta’sirida kompozitsion materiallardan tayyorlangan konstruksiyaviy elementlarning mustahkamligi matematik hisob-kitoblari amalga oshirildi. Ushbu hisob-kitoblar “Kimyoviy texnologiya”, “Real Lion Houses”, “New World Star” va “Nurobod House” MCHJlarda (“O‘zsanoatqurilishmateriallari” ning 2024 yil 3 iyundagi 02/15-1336 - sonli ma’lumotnomasi) joriy etilgan. Ilmiy-tadqiqot natijalarining joriy etilishi konstruksiyaning og‘irligini kamaytirish hisobiga sarf materiallarini 20 million so‘mdan ortiq tejashga imkon berdi.

Ilmiy-tadqiqot ishlari natijalarining aprobatsiyasi. Ushbu tadqiqot natijalari 14 ta xalqaro ilmiy-texnik va ilmiy-amaliy anjumanlarda muhokama qilingan.

Dissertatsiya ishining to‘liq mazmuni:

- “Toshkent irrigatsiya va qishloq xo‘jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti” Milliy tadqiqot universitetining “Mexanika va kompyuterli modellashtirish” kafedrasida huzuridagi “Mexanika muammolari” respublika ilmiy seminari (2024-yil 6-apreldagi 19-sonli bayonnoma);

- Toshkent kimyo-texnologiya instituti huzuridagi ilmiy seminari (2024-yil 9-apreldagi 1-sonli bayonnoma);

- Toshkent davlat transport universiteti huzuridagi “Hisoblash matematikasi va matematik modellashtirishning zamonaviy muammolari” ilmiy seminari (2024-yil 18-apreldagi 8-sonli bayonnoma);

- O‘zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi M.T.O‘rozboyev nomidagi Mexanika va inshootlar seysmik mustahkamligi instituti huzuridagi ilmiy seminari (2024-yil 7-maydagi 3-sonli bayonnoma);

- “Raqamli texnologiyalar va sun‘iy intellektni rivojlantirish” ilmiy-tadqiqot instituti qoshidagi “Murakkab tizimlarni modellashtirish” laboratoriyasining ilmiy seminarlarda (2024 yil 14 maydagi 2-sonli bayonnoma) muhokama qilingan.

Tadqiqot natijalarining e‘lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha jami 43 ta ilmiy ish chop etilgan bo‘lib ulardan 1 tasi monografiya, 2 tasi intellektual mulk huquqi guvohnomasi. O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta’lim, fan va innovatsiyalar vazirligi qoshidagi OAKning fan doktori (DSc) dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 26 ta maqola, shu jumladan respublika jurnallarida 6 ta maqola va xalqaro jurnallarda 20 ta maqola (Scopus ma’lumotlar bazasida indekslangan nashrlarda 18 ta maqola va Web of Science ma’lumotlar bazasida 13 ta maqola) chop etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, beshta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 194 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiya ishining kirish qismida ilmiy tadqiqot mavzusining dolzarbligi va zaruriyati to‘g‘risida ma’lumotlar keltirilgan. Tadqiqotning maqsadi, hal

qilinishi kerak bo'lgan asosiy muammolar ko'rsatilgan. Tadqiqot mavzusi bo'yicha ko'rib chiqilgan muammolarni hal qilish usullari, himoya qilinadigan asosiy natijalar tavsiflangan va sanab o'tilgan. Ishda olingan natijalarning ilmiy va amaliy ahamiyati, shuningdek ularni amalga oshirish, matbuotda e'lon qilish, dissertatsiya tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning birinchi bobi **“Kompozitsion materiallar. Asosiy xususiyatlari. Kompozit materiallar mexanikasi sohasidagi tadqiqotlarning hozirgi holati”** uchta paragrafdan iborat. Bobning birinchi paragrafida kompozitsion materiallar, ularning tasnifi va asosiy xususiyatlari to'g'risida ma'lumotlar keltirilgan. An'anaviy materiallarga nisbatan kompozit materiallardan foydalanishning afzalliklari batafsil bayon etilgan.

Ikkinchi paragrafida qatlamlı o'zaklangan kompozit materiallarning asosiy xususiyatlari keltirilgan. Odatda, qatlamlı konstruksiyalarda tolalı o'zaklangan material qatlamlari bir-biriga mahkamlanadi, har bir qatlam tolasining yo'nalishlari odatda turli bo'lib, tayyor tuzilishga turli yo'nalishlarda sezilarli kuch va bikrlık beradi. Shunday qilib, ko'p qatlamlı o'zaklangan kompozit materialning mustahkamligi va bikrligi konstruksiyaning o'ziga xos talablariga moslashtirilishi mumkin. Tolalar bilan o'zaklangan ko'p qatlamlı kompozit materiallar zamonaviy raketa dvigatellari va suv osti kemalarining korpuslari, samolyot qanotlari panellari va korpus qismlari va boshqalarni ishlab chiqarishda keng foydalanilmoqda.

Har qanday qatlamlı kompozitning asosiy elementi – bu matritsada bir tomonlama yoki to'qilgan tolalarning tekis (ba'zan qobiqdagi kabi egri) joylashuvi bo'lgan plastina.

Tola asosiy o'zaklangan yoki yuk ko'taruvchi element bo'lib, odatda yuqori quvvat va bikrlikka ega. Matritsa organik, metall, keramika yoki uglerod bo'lishi mumkin. Matritsaning vazifasi tolalarni saqlash va himoya qilish, shuningdek, tolalar orasidagi yukni taqsimlash va ular orasidagi yukni uzatish vositasini ta'minlashdir. Agar tolaning yorilishi bo'lsa, oxirgi funksiya ayniqsa muhimdir. U yerda yirtilgan tolaning bir qismidan yuk matritsaga va keyinchalik yirtilgan tolaning boshqa qismiga, shuningdek qo'shni tolalarga o'tkaziladi. Yukni uzatish mexanizmi matritsada paydo bo'ladigan siljish kuchlanishidir; siljish kuchlanishi yirtilgan tolaning tortilishiga qarshilik ko'rsatadi. Ushbu yukni uzatish mexanizmi ipsimon tolalar bilan o'zaklangan kompozit materiallar matritsaning kuchidan kattaroq yukga bardosh beradigan vositadir.

Laminat, tolalar va matritsaning tarkibiy qismlari, mexanika nuqtayi nazaridan, turli yo'llar bilan namoyon bo'ladi. Tolalar odatda chiziqli egiluvchanlikni namoyish etadi, ammo betondagi o'zaklangan po'lat panjaralar mukammal plastik kabi harakat qiladi. Alyuminiy, shuningdek ko'plab polimerlar va ba'zi kompozit materiallar elastoplastik holatni namoyish etadi va hokazo. Hozirgi vaqtda kompozit materiallarning holatini o'rganishda ushbu modellarni amalga oshirish uchun kam ish qilingan.

Uchinchi paragrafda kompozitsion materiallardan yupqa devorlı konstruksiyalar mexanikasi sohasidagi tadqiqotlarning rivojlanish tarixi va hozirgi holati haqida qisqacha ma'lumot berilgan. Birinchi bobda keltirilgan kompozitsion

materiallar to'g'risidagi barcha ma'lumotlar muallifning Kornell universiteti (AQSH, 2005-2007), Virjiniya Politexnika instituti va davlat universiteti (AQSH, 2007-2008), Buffalodagi Nyu-York davlat universiteti (AQSH, 2008-2010) va Lill-1 Fan va texnologiya universiteti (Fransiya, 2013-2014) kabi nufuzli xorijiy universitetlarning ilmiy markazlari va tadqiqot laboratoriyalarida ko'p yillik tadqiqotlari asosida olingan.

Dissertatsiya ishining ikkinchi bobi “Qovushqoq-elastik o'zaklangan qatlamli qobiqlar dinamikasi masalalarini shakllantirish” qovushqoq-elastik o'zaklangan qatlamli qobiqlar dinamikasi masalalarining matematik modellarini qurishga bag'ishlangan. Boshida masalaning matematik modeli Kirxgof-Lyava qobiqlarining klassik nazariyasi asosida qurilgan. Kirxgof-Lyava gipotezasi jismning ikki o'lchovli matematik modeli sifatida tanilgan, deformatsiyalanmagan normallar gipotezasini qabul qilishga asoslangan.

Kirxgof-Lyava nazariyasiga ko'ra, normal va urinma kuchlari, shuningdek, eguvchi va buralish momentlari har bir qatlam uchun kuchlanishlarning integrallash bilan belgilanadi:

$$N_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x^{(k)} dz, \quad N_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y^{(k)} dz, \quad T = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy}^{(k)} dz,$$

$$M_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x^{(k)} z dz, \quad M_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y^{(k)} z dz, \quad H = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy}^{(k)} z dz$$

yoki

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ T \\ M_x \\ M_y \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}^* & A_{12}^* & A_{16}^* & B_{11}^* & B_{12}^* & B_{16}^* \\ A_{12}^* & A_{22}^* & A_{26}^* & B_{12}^* & B_{22}^* & B_{26}^* \\ A_{16}^* & A_{26}^* & A_{66}^* & B_{16}^* & B_{26}^* & B_{66}^* \\ B_{11}^* & B_{12}^* & B_{16}^* & D_{11}^* & D_{12}^* & D_{16}^* \\ B_{12}^* & B_{22}^* & B_{26}^* & D_{12}^* & D_{22}^* & D_{26}^* \\ B_{16}^* & B_{26}^* & B_{66}^* & D_{16}^* & D_{26}^* & D_{66}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \chi_x \\ \chi_y \\ \chi_{xy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Bu yerda $A_{ij}^*, B_{ij}^*, D_{ij}^*, i, j = 1, 2, 6$ – quyidagi shaklga ega operatorlar:

$$A_{ij}^* \varphi = \sum_{k=1}^K (\bar{Q}_{ij}^* \varphi)_k (z_k - z_{k-1}), \quad B_{ij}^* \varphi = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K (\bar{Q}_{ij}^* \varphi)_k (z_k^2 - z_{k-1}^2),$$

$$D_{ij}^* \varphi = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^K (\bar{Q}_{ij}^* \varphi)_k (z_k^3 - z_{k-1}^3),$$

$$\bar{Q}_{11}^* \varphi = \left[Q_{11}^* \cos^4 \theta + \frac{1}{2} (Q_{12}^* + 2Q_{66}^*) \sin^2 2\theta + Q_{22}^* \sin^4 \theta \right] \varphi,$$

$$\bar{Q}_{12}^* \varphi = \left[\frac{1}{4} (Q_{11}^* + Q_{22}^* - 4Q_{66}^*) \sin^2 2\theta + Q_{12}^* \left(1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \right) \right] \varphi,$$

$$\bar{Q}_{16}^* \varphi = \left[Q_{11}^* \sin \theta \cos^3 \theta - \frac{1}{4} (Q_{12}^* + 2Q_{66}^*) \sin 4\theta - Q_{22}^* \sin^3 \theta \cos \theta \right] \varphi,$$

$$\bar{Q}_{22}^* \varphi = \left[Q_{11}^* \sin^4 \theta + \frac{1}{2} (Q_{12}^* + 2Q_{66}^*) \sin^2 2\theta + Q_{22}^* \cos^4 \theta \right] \varphi,$$

$$\bar{Q}_{26}^* \varphi = \left[Q_{11}^* \sin^3 \theta \cos \theta - \frac{1}{4} (Q_{12}^* + 2Q_{66}^*) \sin 4\theta - Q_{22}^* \sin \theta \cos^3 \theta \right] \varphi,$$

$$\bar{Q}_{66}^* \varphi = \left[\frac{1}{4} (Q_{11}^* - 2Q_{12}^* + Q_{22}^*) \sin^2 2\theta + Q_{66}^* \cos^2 2\theta \right] \varphi,$$

$$Q_{11}^* \varphi = \frac{E_1}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} (1 - \Gamma_{11}^*) \varphi,$$

$$Q_{12}^* \varphi = \frac{E_1 \mu_{21}}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} (1 - \Gamma_{12}^*) \varphi = \frac{E_2 \mu_{12}}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} (1 - \Gamma_{12}^*) \varphi,$$

$$Q_{22}^* \varphi = \frac{E_2}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} (1 - \Gamma_{22}^*) \varphi,$$

$$Q_{66}^* \varphi = G_{12} (1 - \Gamma_{66}^*) \varphi,$$

$$\Gamma_{ij}^* \varphi = \int_0^t \Gamma_{ij}(t - \tau) \varphi(\tau) d\tau, i, j = 1, 2, 6$$

Bu yerda E_1, E_2 – cho‘zilish–siqilish uchun Yung modullari; G_{12} – siljish modullari; μ_{12}, μ_{21} – Puasson koeffitsientlari; Γ_{ij}^* – relaksatsiya yadrolari bilan integral operatorlar $\Gamma_{ij}(t)$, K – qobiq qatlamlari soni, θ – OX o‘qiga nisbatan tolalar yo‘nalishini tavsiflovchi burchak.

$\varepsilon_x^0, \varepsilon_y^0, \gamma_{xy}^0, \chi_x, \chi_y, \chi_{xy}$ o‘rta yuzasidagi deformatsiyalar va x, y, z yo‘nalishlari bo‘yicha u, v, w ko‘chishlari o‘rtasidagi bog‘liqlik quyidagicha qabul qilinadi:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x^0 &= \frac{\partial u}{\partial x} - k_x w + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2, & \varepsilon_y^0 &= \frac{\partial v}{\partial y} - k_y w + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2, \\ \gamma_{xy}^0 &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y}, \\ \chi_x &= -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, & \chi_y &= -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, & \chi_{xy} &= -2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{aligned} \quad (2)$$

bunda k_x va k_y – qobiqning o‘rta yuzasining egriligi.

(1) va (2) ni harakat tenglamalariga qo‘yilganda:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + p_x &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, & \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} + p_y &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial^2 H}{\partial x \partial y} + k_x N_x + k_y N_y + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial w}{\partial x} + T \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial w}{\partial x} + N_y \frac{\partial w}{\partial y} \right) + q &= \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \end{aligned}$$

klassik Kirxgof-Lyava nazariyasi bo‘yicha masalaning matematik modelini tavsiflovchi nochiziqli xususiy hosilalardagi integro-differensial tenglamalar sistemasini olamiz.

Biroq, so‘nggi paytlarda ilmiy hamjamiyat orasida qatlamli anizotrop o‘zaklangan qobiqlarning dinamik holatini tavsiflovchi matematik modellarni yaratishda oddiy deformatsiyalarga qo‘shimcha ravishda siljish deformatsiyalarini hisobga olgan holda qobiq nazariyalaridan foydalanish afzalroq degan fikrlar

bildirilmoqda. Shu maqsadda ushbu dissertatsiya ishida Timoshenkoning takomillashtirilgan nazariyasi bo'yicha qovushqoq-elastik qatlamli anizotrop o'zaklangan qobiqlar dinamikasi masalasining matematik modeli ham qurilgan.

Timoshenko nazariyasiga ko'ra, normal va urinma kuchlar, eguvchi va buralish momentlari, shuningdek ko'ndalang kuchlar nisbatlardan aniqlanadi:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ T \\ M_x \\ M_y \\ H \\ Q_x \\ Q_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}^* & A_{12}^* & A_{16}^* & B_{11}^* & B_{12}^* & B_{16}^* & 0 & 0 \\ A_{12}^* & A_{22}^* & A_{26}^* & B_{12}^* & B_{22}^* & B_{26}^* & 0 & 0 \\ A_{16}^* & A_{26}^* & A_{66}^* & B_{16}^* & B_{26}^* & B_{66}^* & 0 & 0 \\ B_{11}^* & B_{12}^* & B_{16}^* & D_{11}^* & D_{12}^* & D_{16}^* & 0 & 0 \\ B_{12}^* & B_{22}^* & B_{26}^* & D_{12}^* & D_{22}^* & D_{26}^* & 0 & 0 \\ B_{16}^* & B_{26}^* & B_{66}^* & D_{16}^* & D_{26}^* & D_{66}^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{44}^* & A_{45}^* \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{45}^* & A_{55}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \frac{\partial \psi_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \psi_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \psi_x}{\partial y} + \frac{\partial \psi_y}{\partial x} \\ \frac{\partial w}{\partial y} + \psi_y \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \psi_x \end{bmatrix} \quad (3)$$

bunda $A_{ij}^*, B_{ij}^*, D_{ij}^*$ – quyidagi shaklga ega operatorlar:

$$A_{ij}^* \varphi = \sum_{k=1}^K (\bar{Q}_{ij}^* \varphi)_k (z_k - z_{k-1}), B_{ij}^* \varphi = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K (\bar{Q}_{ij}^* \varphi)_k (z_k^2 - z_{k-1}^2),$$

$$D_{ij}^* \varphi = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^K (\bar{Q}_{ij}^* \varphi)_k (z_k^3 - z_{k-1}^3), i, j = 1, 2, 6,$$

$$A_{ij}^* \varphi = K_s \sum_{k=1}^K (\bar{Q}_{ij}^* \varphi)_k (z_k - z_{k-1}), i, j = 4, 5,$$

$$\bar{Q}_{44}^* = (Q_{44}^* \cos^2 \theta + Q_{55}^* \sin^2 \theta) \varphi,$$

$$\bar{Q}_{45}^* = [(Q_{55}^* - Q_{44}^*) \cos \theta \sin \theta] \varphi, \quad \bar{Q}_{55}^* = (Q_{55}^* \cos^2 \theta + Q_{44}^* \sin^2 \theta) \varphi,$$

$$\bar{Q}_{44}^* \varphi = G_{23} (1 - \Gamma_{44}^*) \varphi, \quad \bar{Q}_{55}^* \varphi = G_{13} (1 - \Gamma_{55}^*) \varphi,$$

K_s siljish koeffitsientining qiymati $f(z)$ funksiyasining turiga bog'liq bo'lib, u τ_{xz} va τ_{yz} kuchlanishlarini qobiq qalinligi bo'yicha taqsimlash qonunini tavsiflaydi. Hisoblashda biz siljish koeffitsientining qiymatlarini 5/6 ga teng deb qabul qildik. S.A.Ambartsumyan va E.Reysner plastinalarning takomillashtirilgan nazariyasida K_s uchun aynan shunday qiymatni oladi. S.P.Timoshenko ishlarida 2/3 va 8/9 qiymatlari olingan.

(3) ni harakat tenglamalariga qo'yilganda:

$$\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + p_x = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} + p_y = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2},$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + k_x N_x + k_y N_y + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial w}{\partial x} + T \frac{\partial w}{\partial y} \right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial w}{\partial x} + N_y \frac{\partial w}{\partial y} \right) + q = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2},$$

$$\frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial y} - Q_x = \frac{\rho h^2}{12} \frac{\partial^2 \psi_x}{\partial t^2}, \quad \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial M_y}{\partial y} - Q_y = \frac{\rho h^2}{12} \frac{\partial^2 \psi_y}{\partial t^2}$$

Timoshenkoning takomillashtirilgan nazariyasiga ko'ra kompozitsion materiallardan qatlamli o'zaklangan qobiqlar dinamikasi masalalarining matematik modellarini tavsiflovchi noxiziqli xususiy hosilalardagi integro-differensial tenglamalar sistemasini olamiz.

Hisoblashlarda eng oddiy va shu bilan birga juda keng tarqalgan relaksatsiya yadrolari sifatida Koltunova-Rjanitsin kuchsiz-singulyar yadrolari ko'rinishda ishlatilgan:

$$\Gamma_{ij}(t) = A_{ij} e^{-\beta_{ij} t} t^{\alpha_{ij}-1}, \quad 0 < \alpha_{ij} < 1, \quad i, j = 1, 2, 6, \quad (4)$$

bunda $A_{ij}, \beta_{ij}, \alpha_{ij}$ – tajribalardan aniqlangan qovushqoqlikning reologik parametrlari.

O'zaklangan tolalarning turli yo'nalishlarida materiallarning qovushqoq-elasticligining reologik parametrlarini aniqlash uchun I.M.Tyuneeva ishida keltirilgan tajribalar natijalaridan foydalanamiz. Muallif o'z ishida tajribalar asosida ba'zi o'zaklangan stekloplastiklarning, masalan, Tekstolit, KAST-V, SVAM va EDFning qovushqoqligining reologik parametrlarini olgan. Ishda keltirilgan parametrlar OX o'qiga nisbatan $0^0, 45^0$ va 90^0 o'zaklangan tolalar yo'nalishlari bo'lgan namunalarga mos keladi. Ushbu dissertatsiya ishida tolalarning ixtiyoriy yo'nalishi bo'lgan namunalar uchun qovushqoqlikning reologik parametrlarining qiymatlari interpolatsiya formulalaridan foydalangan holda eksperimental natijalardan olingan. 1-jadvalda interpolatsiya formulalari yordamida olingan ikki turdagi stekloplastik (KAST-V va EDF) uchun A qovushqoqligining reologik parametrlari berilgan.

1-jadval

O'zaklangan tolalar yo'nalishi burchagining turli qiymatlarida A reologik qovushqoqlik parametrining qiymatlari

Stekloplastik	Tolalar yo'nalishi						
	0^0	15^0	30^0	45^0	60^0	75^0	90^0
KAST-V	0.0099	0.0159	0.0195	0.0208	0.0197	0.0162	0.0104
EDF	0.0016	0.0043	0.006	0.0067	0.0064	0.0051	0.0028

Tyuneevaning ishida bo'lgani kabi α reologik parametrning qiymatlari tolalar yo'nalishidan qat'iy nazar doimiy bo'ladi. β reologik parametrning qiymatlari shunchalik kichikki, ularning ta'sirini e'tiborsiz qoldirish mumkin.

Ikkinchi bobda olingan xususiy hosilali noxiziqli integro-differensial tenglamalar sistemasi Bubnov-Galerkin usuli yordamida uchinchi bobning **“Qovushqoq-elastic qatlamli o'zaklangan dinamikasi masalalarining hal qiluvchi tenglamalari sistemalari”** birinchi va ikkinchi paragraflarida keltirilgan kuchsiz-singulyar relaksatsiya yadroli noxiziqli oddiy integro-differensial tenglamalar sistemalariga keltiriladi.

Kuchsiz-singular relaksatsiya yadrolari bo‘lgan qovushqoq-elastik tizimlar dinamikasini o‘rganishga bag‘ishlangan kam miqdordagi ilmiy adabiyotlarning mavjudligi $t = 0$ vaqtidagi xoslik mavjudligi bilan izohlanadi. Dissertatsiya ishida kvadratura formulalaridan foydalanishga asoslangan sonli usulning tavsifi berilgan, bu esa chiziqli bo‘lmagan integral-differensial tenglamalar sistemasini yechishga imkon beradi, avval singular yadrolarni regular yadrolarga aylantiradi. Tanlangan usulning aniqligini baholash uchun test masalasi yechilgan. Quyidagi jadvalda test masalasining aniq va taqribiy yechimining sonli qiymatlari berilgan. Natijalardan ko‘rinib turibdiki, tavsiflangan usulning xatosi ishlatilgan kvadratura formulalarining xatosiga to‘g‘ri keladi va interpolatsiya bosqichiga nisbatan bir xil kichiklik tartibiga ega (2-jadval).

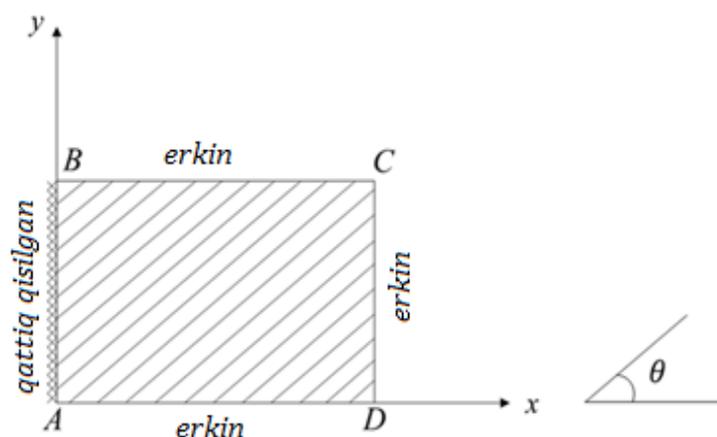
2-jadval

Test masalasi natijalari

t	Yechim		$\Delta, \%$
	<i>Aniq</i>	<i>Taqribiy</i>	
0.0	1.000000000	1.000000000	-
0.01	0.997303642	0.998929533	0.296
0.02	0.994614554	0.997560123	0.397
0.03	0.991932717	0.995866611	0.462
0.04	0.989258111	0.993831608	0.491
0.05	0.986590716	0.991439562	0.482
0.06	0.983930514	0.988675329	0.433
0.07	0.981277485	0.985522169	0.340
0.08	0.978631609	0.981957961	0.200
0.09	0.975992868	0.977947442	0.004
0.10	0.973361242	0.973403577	0.004

Dissertatsiyaning “O‘zaklangan plastinalar statikasi” nomli to‘rtinchi bobida har xil geometrik konfiguratsiyadagi anizotropik o‘zaklangan to‘rtburchakli plastinalarning egilishini o‘rganishga bag‘ishlangan bo‘lib, ularning har birida bir tomoni qattiq qisilgan, qolgan tomonlari esa bo‘sh (konsol plastina). Bunday tadqiqotlar zamonaviy samolyotsozlik sanoatida juda dolzarbdir.

Dastlab anizotrop o‘zaklangan to‘g‘ri burchakli konsol plastinani egilish masalasi ko‘ndalang yuk ta’siri ostida $q = q(x, y)$ ko‘rib chiqildi (1-rasm) .



1-rasm. θ° burchak ostida tolalar bilan o‘zaklangan anizotrop to‘rtburchaklar konsol plastinaning geometriyasi

Olingan natijalarning to‘g‘riligini tekshirish uchun ularni chekli elementlar usuli yordamida hisoblangan natijalar bilan taqqoslash amalga oshirildi. ABAQUS kompleksi dasturiy vosita sifatida ishlatilgan. Turli xil usullar yordamida olingan 45° burchak ostida o‘zaklangan tolalar yo‘nalishi bilan kvadrat plastinaning maksimal ko‘chish qiymati 3-jadvalda keltirilgan.

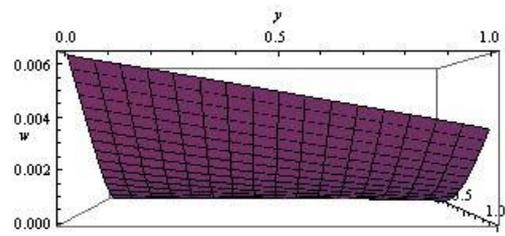
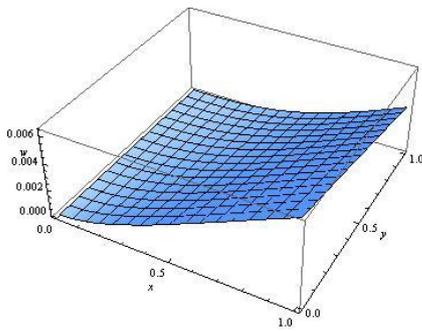
3-jadval

Bir xil yuk $q = const$ ostida turli xil usullar yordamida olingan natijalarni taqqoslash (Material: uglerod epoksid smola, tolalar yo‘nalishi 45°)*

Obyekt	Materiallarning mexanik xususiyatlari				$w_{max} (M)$	farqi, %
	E_1, GPa	E_2, GPa	ν_{12}	G_{12}, GPa		
Anizotrop plastina (ABAQUS)	181	10.3	0.28	7.17	$6.559 \cdot 10^{-3}$	-
Anizotrop plastina (Delphi) $M=N=4$	181	10.3	0.28	7.17	$6.237 \cdot 10^{-3}$	-4.909
Anizotrop plastina (Delphi) $M=N=8$	181	10.3	0.28	7.17	$6.377 \cdot 10^{-3}$	-2.775
Anizotrop plastina (Delphi) $M=N=12$	181	10.3	0.28	7.17	$6.378 \cdot 10^{-3}$	-2.761

* Balkaning hisoblashi berilmagan, chunki buralish mavjud.

Olingan natijalarni tahlili shuni ko‘rsatdiki, 45° burchak ostida tolalar yo‘nalishi bo‘lgan anizotrop plastina uchun olingan natijalar orasidagi eng katta farq taxminan 4.91% ni tashkil qiladi. Bu holda yechimning yaqinlashishi ortotropik holatga qaraganda sekinroq (tolalar yo‘nalishi 0 va 90° da) bo‘ladi. Aniqroq natijalarga erishish uchun yoyishda kamida 64 ta haddan foydalanish kerak ($M = N = 8$). Bunday holda, farq 2.78% ni tashkil qiladi.

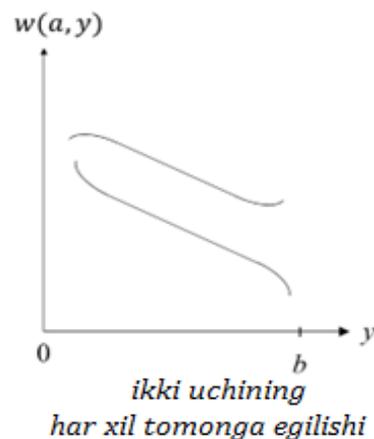
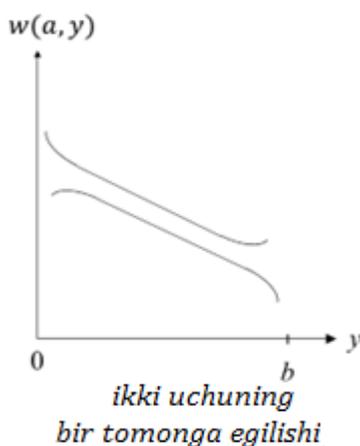
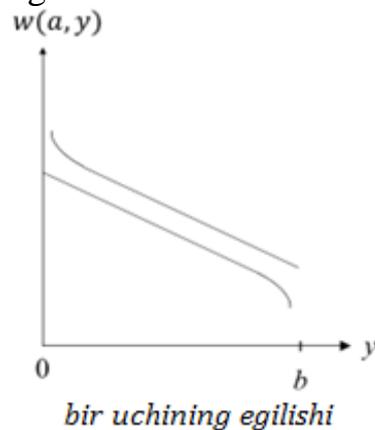
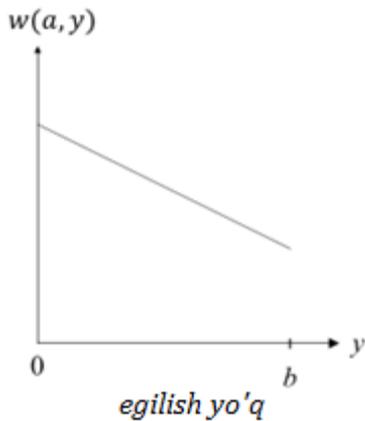


2-rasm. Ko‘ndalang yuk $q = const$ ta‘sirida anizotrop kvadrat o‘zaklangan konsol plastinaning egilishi (o‘zaklangan tolalar yo‘nalishi 45°)

O‘zaklangan tolalar yo‘nalishining kvadrat konsol plastinaning egilishiga ta‘siri o‘rganildi. Kutilganidek, ortotrop plastinalar holatlarida, bikr mahkamlangan tomonga qarama-qarshi bo‘lgan plastina qirrasi buralmaydi. Bunday hollarda, $x = const$ tekisligi bilan plastina kesishmalaridagi chiziqlar bo‘ylab har bir nuqta uchun og‘ish qiymatlari bir xil bo‘ladi. Ortotrop plastinadan farqli o‘laroq, bikr mahkamlangan tomonga qarama-qarshi bo‘lgan qirg‘oq anizotrop plastinalarda buralishi kuzatiladi (2-rasm). Bu yerda ko‘chish qiymatlari plastinaning $x = const$ tekisligi bilan kesishish nuqtalarida mos kelmaydi. Bundan tashqari, natijalar shuni ko‘rsatadiki, bikr mahkamlangan qirraga qarama-qarshi joylashgan $x = a$ qirrasi to‘g‘ri chiziq shaklida bo‘ladi. Bu shuni anglatadiki, plastinada “egilish” yo‘q, uning sxemasi 3-rasmda ko‘rsatilgan.

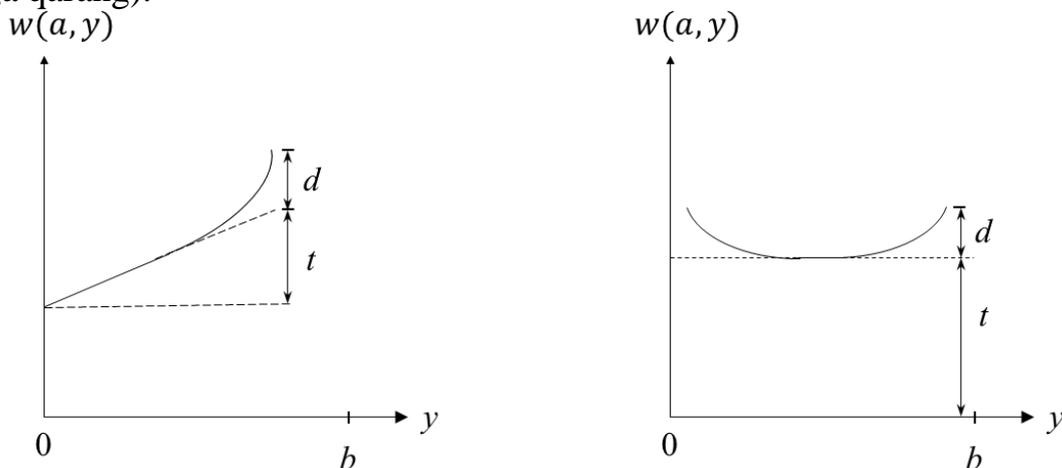
Plastinaning bikr mahkamlangan tomoniga qarama-qarshi joylashgan

$x = a$ qirrasi egilishlarining tasnifi



3- rasm. Egilishning har xil shakllari

Qirralar egilish paytida bir xil yoki qarama-qarshi yo‘nalishda ko‘chishi mumkin. Egilish profilning sirtlarining yuqori va quyi egilishni tavsiflovchi qavariqligi bilan bog‘liq. Bu egilish elastik birikma yordamida yaratiladi va plastinaning ikkala uchidagi egilish ko‘rsatkichi $f = d/t$ kabi aniqlanadi (4-rasmga qarang).



4-rasm. Egilishning ko‘rsatkichlari

Misol uchun, gaz oqimidagi plastinaning holatiga ta’sir qilish uchun, egilish yetarlicha kichik bo‘lishi mumkinligi inobatga olib, ma’lum bir mezonni kiritish kerak. Plastinaning biki mahkamlangan tomoniga qarama-qarshi joylashgan chekka qirra faqat d/t qiymati 2% dan oshsa, egiladi, deb faraz qilamiz.

Anizotrop va izotropik kvadrat plastinalarning turli xil yuklarda buralish va egilishi xususiyatlari 4-jadvalda keltirilgan. Jadvalning oxirgi ustunida $x = a$, $y = b/2$ nuqtada $\partial w / \partial y$ egri chizig‘ining qiyalik qiymatlarini topish mumkin. Bu nuqta biki mahkamlangan qirraga qarama-qarshi joylashgan qirraning markazidir ($x = a$, $y \in (0, b)$).

4-jadval

Anizotrop o‘zaklangan va izotrop kvadrat konsol plastinalari buralish va egilishi

O‘zaklangan tolalar yo‘nalishi	Plastina o‘lchamlari	Yuk	Buralishi/egilishi	Egilish koeffitsienti, f	$w(a, b/2)$, m	$\frac{\partial w}{\partial y}(a, b/2)$
0^0	$a=1\ m,$ $b=1\ m$	$q=const$	$yo'q / yo'q$	-	$8.21 \cdot 10^{-4}$	0
90^0			$yo'q / yo'q$	-	$14.52 \cdot 10^{-3}$	0
45^0			$ha / yo'q$	-	$4.985 \cdot 10^{-3}$	$-2.78 \cdot 10^{-3}$
-45^0			$ha / yo'q$	-	$4.985 \cdot 10^{-3}$	$2.78 \cdot 10^{-3}$
0^0		$q = q_0(1 - 2y/b)$	ha/ha (ikki uchi qarama-qarshi yo‘nalishda)	0.085	0	$-1.07 \cdot 10^{-3}$
90^0			$ha / yo'q$	-	0	$-2.486 \cdot 10^{-3}$
45^0			ha/Ha (bir uchi)	0.092	$8.31 \cdot 10^{-4}$	$-1.426 \cdot 10^{-3}$
-45^0			ha/ha (bir uchi)	0.084	$-8.31 \cdot 10^{-4}$	$-1.426 \cdot 10^{-3}$

<i>Izotrop (Alyuminiy)</i>			<i>ha/yo'q</i>	-	0	$-0.635 \cdot 10^{-3}$
--------------------------------	--	--	----------------	---	---	------------------------

So'ngra to'rtburchak anizotrop o'zaklangan konsol plastinalar qanotsimon (to'g'ri burchakli bo'lmagan) konfiguratsiyada egilish masalalari o'rganildi. Ushbu masalalarni hal qilish uchun ABAQUS kompleksidan foydalanildi, chunki Bubnov-Galerkin yoki Ritz kabi yaqinlashtirish usullari uchun chegara shartlarini qanoatlantiradigan funksiyalarni to'rtburchakli bo'lmagan plastinalar uchun topish ancha mushkul masala. Umuman aytganda, turli xil geometrik konfiguratsiyaga ega bo'lgan plastinalarni Rvachev usuli bilan tadqiq qilish mumkinligini ta'kidlaymiz.

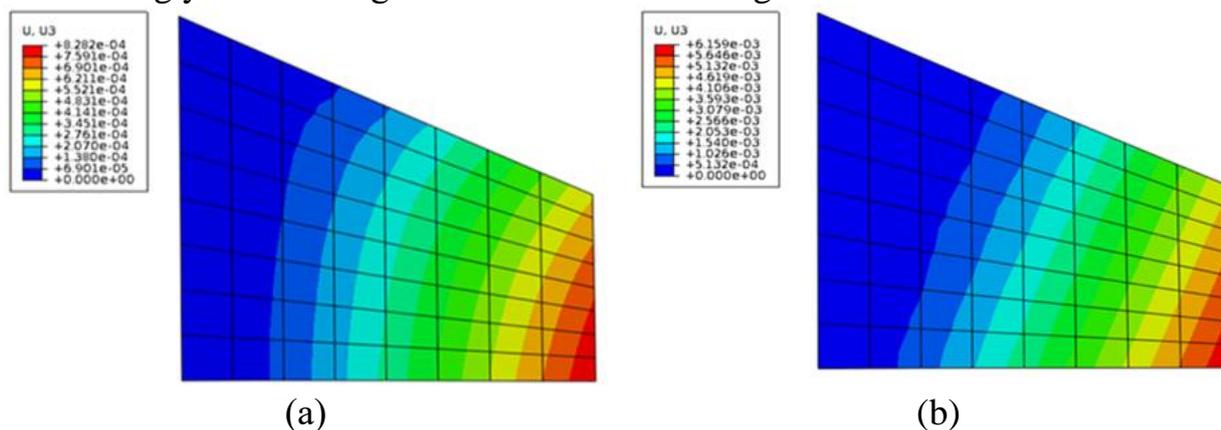
5 - jadval

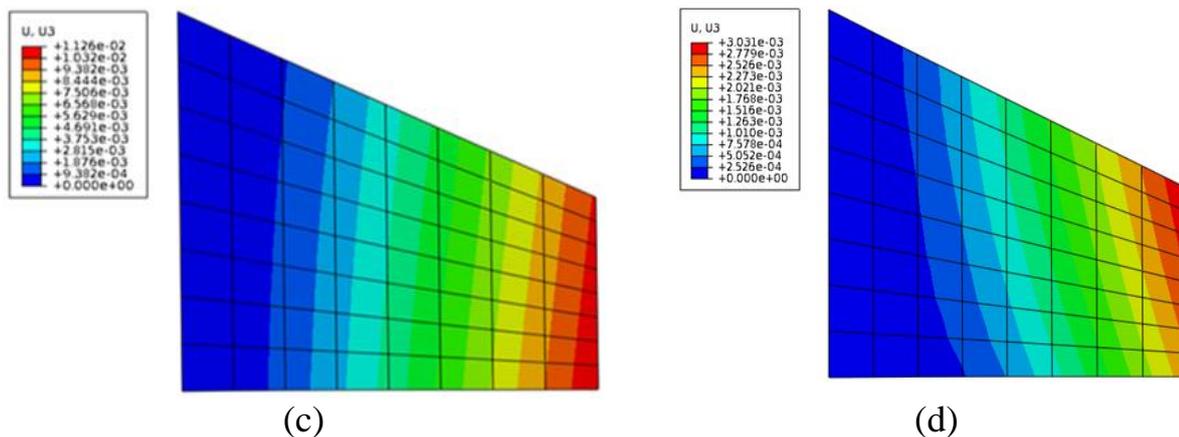
Turli xil kompozitsion materiallardan tayyorlangan trapetsiya ko'rinishida anizotrop o'zaklangan konsol plastinalarining maksimal ko'chish qiymatlari

<i>Material</i>	$E_1,$ <i>GPa</i>	$E_2,$ <i>GPa</i>	E_1/E_2	$G_{12},$ <i>GPa</i>	w_{max}		
					0^0	45^0	90^0
<i>Epoksidli stekloplastik</i>	38.6	8.27	4.67	4.14	$3.505 \cdot 10^{-3}$	$10.68 \cdot 10^{-3}$	$14.26 \cdot 10^{-3}$
<i>Yuqori mustahkamlikka ega uglerodli epoksid</i>	145	9	16.11	4.5	$1.065 \cdot 10^{-3}$	$7.860 \cdot 10^{-3}$	$13.19 \cdot 10^{-3}$
<i>Yuqori modulli uglerodli epoksid</i>	181	10.3	17.57	7.17	$0.828 \cdot 10^{-3}$	$6.159 \cdot 10^{-3}$	$11.26 \cdot 10^{-3}$
<i>Epoksidli boroplastik</i>	204	18.5	11.03	5.59	$0.775 \cdot 10^{-3}$	$4.704 \cdot 10^{-3}$	$6.696 \cdot 10^{-3}$

Dastlab, anizotrop o'zaklangan trapetsiya ko'rinishida konsol plastinaning egilishi masalasi ko'rib chiqiladi. Turli xil kompozitsion materiallardan tayyorlangan trapetsiya ko'rinishida anizotrop plastinaning maksimal egilishi qiymatlari 5-jadvalda keltirilgan.

Anizotrop trapetsiya ko'rinishida qanotsimon plastinalarga bir tekis ko'ndalang yuk ta'siridagi holati 5-rasmda keltirilgan.





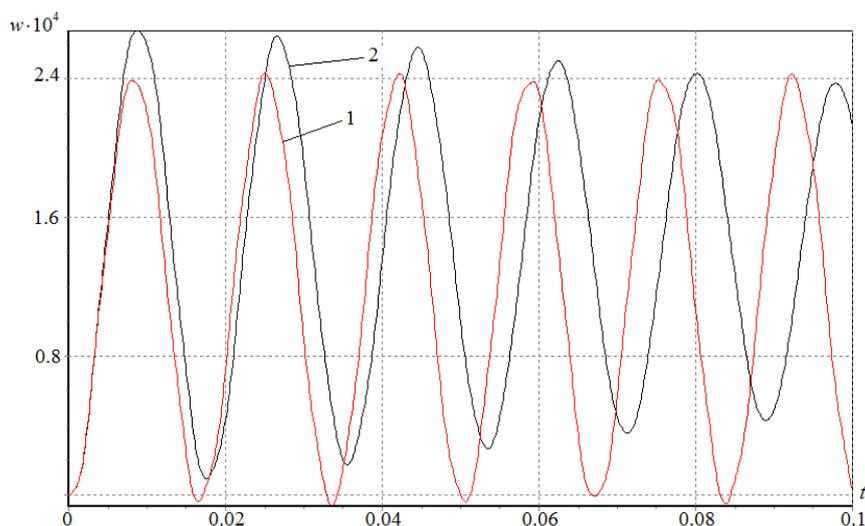
5-rasm. Trapetsiya ko‘rinishida anizotrop o‘zaklangan konsol plastinalarining egilishi. Material: uglerodli epoksid, tolalar yo‘nalishi: a) 0°; b) 45°; c) 90°; d) -45°

Shu bilan birga, ushbu bobda parallelogramm va kapalak qanoti shaklidagi konsol plastinalarining egilishi o‘rganilgan.

“Qovushqoq-elastik qatlamli o‘zaklangan plastinalar va qobiqlarning nohiziqli tebranishlari va dinamik ustuvorligini hisoblash” deb nomlangan beshinchi bob turli xil tashqi yuklar ta’sirida qovushqoq-elastik anizotropik o‘zaklangan to‘g‘ri to‘rtburchakli plastinaning dinamik holatini o‘rganishga bag‘ishlangan.

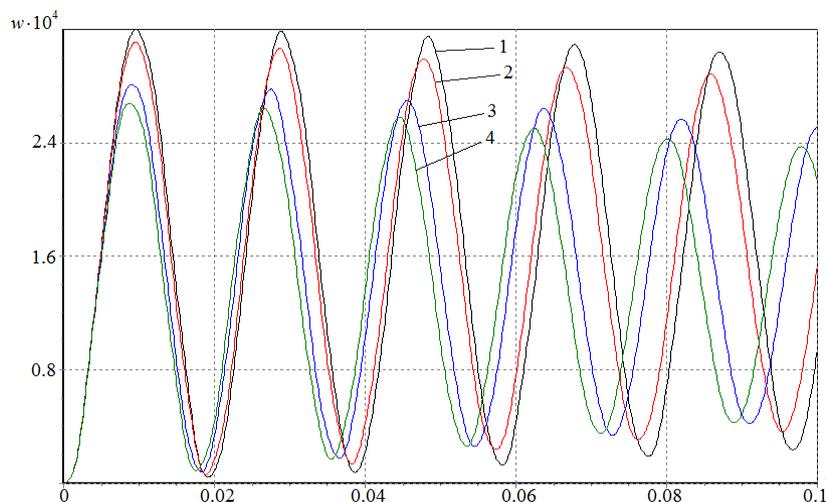
Beshinchi bobning birinchi paragrafi ko‘ndalang statik yuk q ta’sirida qovushqoq-elastik anizotropik o‘zaklangan sharnirli tayanchga ega bo‘lgan plastinaning tebranishini o‘rganishga bag‘ishlangan.

6-rasmda materialning qovushqoq-elastik xususiyatlarining anizotrop o‘zaklangan plastina holatiga ta’siri o‘rganildi. Bu yerda 1-egri chiziq elastik masalaning natijasini ($A = 0$), 2-egri chiziq esa qovushqoq-elastik masalasi natijasini tasvirlaydi. Qovushqoq-elastik shaklda ko‘rib chiqilgan plastinaning tebranish jarayoni vaqt o‘tishi bilan so‘nib ketadigan jarayon bo‘lib, fazalar o‘ngga siljiydi, elastik ko‘rinishda esa tebranish amplitudasi vaqt o‘tishi bilan o‘zgarmaydi va jarayonning o‘zi mukammal garmonik tebranishga o‘xshaydi. Amaldagi KAST-V ($A = 0.0208$) va EDF ($A = 0.0067$) har xil qovushqoq-elastik xususiyatlarga ega materiallardir. KAST-V materialdan tayyorlangan va yaqqol qovushqoqlik xususiyatini namoyon qiladigan plastinaning tebranishi EDF materialdan tayyorlangan plastinaga nisbatan intensivroq so‘nadi.



6-rasm. KAST-V materialidan tayyorlangan, o‘zaklangan plastina holatiga qovushqoq-elasticlik xususiyatlarining ta’siri (1-elastic masala, 2-qovushqoq-elastic masala)

7-rasmda o‘zaklangan tolalarning turli yo‘nalishlarida (1 – 0°; 2 – 15°; 3 – 30°; 4 – 45°) qovushqoq-elastic plastinalarning o‘rta nuqtalarining ko‘chishidagi o‘zgarishlar tasvirlangan. 0° dan 45° gacha bo‘lgan tolalar yo‘nalishi burchagi oshgani sayin, ko‘chish qiymatlarining kamayishi kuzatiladi.



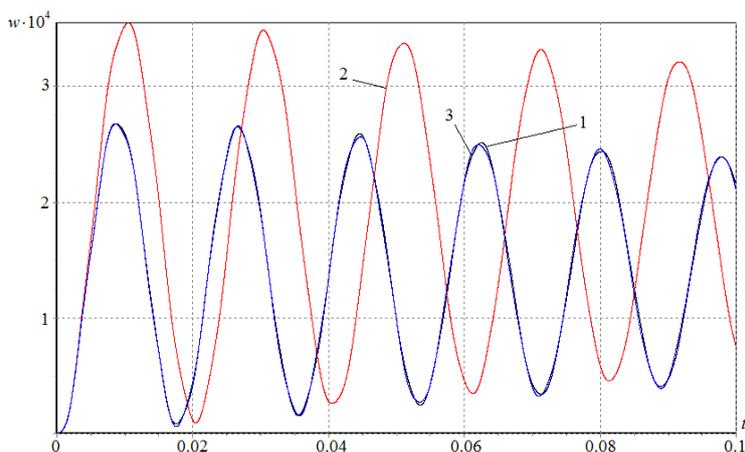
7-rasm. O‘zaklangan tolalarning turli yo‘nalishlarida (1 – 0°; 2 – 15°; 3 – 30°; 4 – 45°) qovushqoq-elastic anizotrop plastinaning o‘rta nuqtaning ko‘chishidagi o‘zgarishlar

Bundan tashqari, o‘zaklangan plastinaning turli geometrik va fizik-mexanik parametrlarining o‘zgarishi ta’siri tadqiq etilgan.

Zamonaviy o‘zaklangan kompozitlar – bu bir nechta o‘zaklangan qatlamlarning majmui bo‘lib, ularning har biri o‘ziga xos mexanik xususiyatlarga ega bo‘ladi. Shunday qilib, kompozitning strukturasi o‘zgartirib, turli xil omillarga (yuklar, harorat, namlik va boshqalar) qarab holatini oldindan prognoz qilish imkoniyatiga ega bo‘lgan konstruksiyalarni yaratish mumkin. Shu

munosabat bilan, turli xil tolalar yoʻnalishlariga ega qatlamli oʻzaklangan plastinalarning holatlarini tadqiq etish alohida qiziqish uygʻotadi.

8-rasmda KAST-V dan tayyorlangan qovushqoq-elastik qatlamli oʻzaklangan plastinalarning oʻrta nuqtalarining koʻchishidagi oʻzgarishlar keltirilgan. Birinchi egri chiziq OX oʻqiga nisbatan tolalar yoʻnalishi 45° boʻlgan bir qatlamli plastina holatiga toʻgʻri keladi. Ikkinchi egri chiziq ikki qatlamli plastina holatiga toʻgʻri keladi, uning birinchi qatlami 0° yoʻnalishi boʻlgan tolalarga mos, ikkinchi qatlami esa OX oʻqiga nisbatan 90° yoʻnalishiga ega. Uchinchi egri chiziq - birinchi egri chiziqqa deyarli toʻgʻri keladi, bu ikki qatlamli plastina boʻlib, uning tolalari mos ravishda 45° va 135° yoʻnalishlariga ega. Bundan tashqari, bu plastinalarning barchasi bir xil qalinlikka ega. Natijalar shuni koʻrsatadiki, tolalar OX oʻqiga parallel va perpendikular boʻlgan qatlamli plastinalarda koʻchish qiymatlari mos mexanik xususiyatlarga ega boʻlgan boshqa plastinalarga qaraganda kattaroqdir.



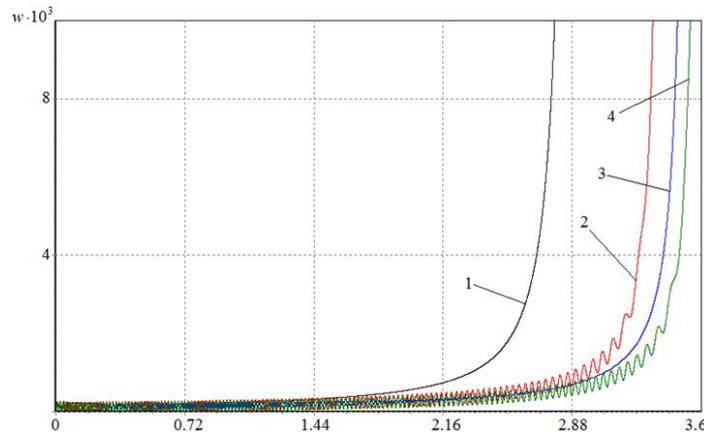
8-rasm. Qovushqoq-elastik qatlamli oʻzaklangan plastinalarning oʻrta nuqtalarining koʻchishidagi oʻzgarishlar (1 – 45° burchak ostida tolalar bilan oʻzaklangan bir qavatli plastina; 2 – birinchi qatlamda 0° va ikkinchisida esa 90° tolalar bilan oʻzaklangan ikki qavatli plastina; 3-birinchi qatlamda 45° va ikkinchi qatlamda -45° tolalar bilan oʻzaklangan ikki qavatli plastina.

Beshinchi bobning ikkinchi paragrafida qovushqoq-elastik anizotropik oʻzaklangan plastinaning tez ortib boradigan siquvchi yuklari bilan boʻrtib chiqishini tadqiq etishga bagʻishlangan.

Tomonlari a va b boʻlgan, a tomoni boʻylab bir yoʻnalishda siqilgan qovushqoq-elastik toʻrtburchakli oʻzaklangan plastinani koʻrib chiqamiz, bunda $P(t) = P_0 \cdot t$ (P_0 – yuklanish tezligi) qonuniga muvofiq siqish kuchlari vaqtga proporsional ravishda oʻsib boradi.

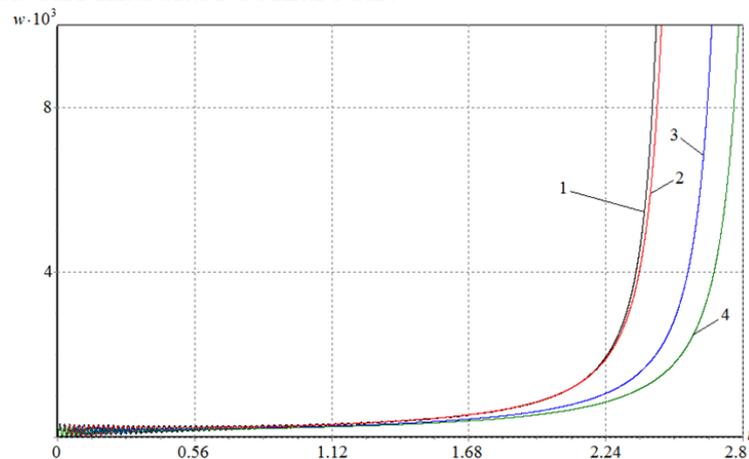
Oldingi holatda boʻlgani kabi, bu yerda materialning qovushqoq-elastik xususiyatlarining KAST-V va EDF stekloplastiklardan tayyorlangan oʻzaklangan plastinalarning holatiga taʼsiri boʻyicha tadqiqotlar keltirilgan. Umuman olganda, KAST-V va EDF turli qovushqoq-elastik xususiyatlarga ega materiallardir. 9-rasmda koʻrsatilgandek, konstruksiya materialining qovushqoq-elastik xususiyatlarini hisobga olish kritik vaqtning pasayishiga olib keladi. Bu, ayniqsa,

EDF ($A = 0.0067$)ga qaraganda ko‘proq qovushqoq xususiyatlarga ega bo‘lgan KAST-V ($A = 0.0208$) plastinalarda seziladi. Elastik va qovushqoq-elastik KAST-V plastinalar uchun kritik vaqt qiymatlaridagi farq 21% ga, EDF plastinalari uchun esa bu farq 2.4% ni tashkil qiladi. Bundan kelib chiqadiki, bunday turdagi masalalarni hal qilishda konstruksiya materialining qovushqoq-elastik xususiyatlarini hisobga olish juda muhimdir.



9-rasm. Konstruksiya materialining qovushqoq-elastik xususiyatlarining o‘zaklangan plastina harakatiga ta’siri: KAST-V uchun - 1-qovushqoq-elastik, 2-elastik va EDF uchun - 3-qovushqoq-elastik, 4-elastik.

Kompozit materiallarda tolalarning yo‘nalishi konstruksiya elementlarining mustahkamligiga salmoqli ta’sir ko‘rsatishi mumkin. Tolalarning yo‘nalishi makroskopik bikrlilik va mustahkamligini ta’minlaydi, bu konstruksiya elementlarining mexanik xususiyatlarini yaxshilashda muhim rol o‘ynaydi. Shuning uchun o‘zaklangan plastina tolalari yo‘nalishidagi o‘zgarishlarning dinamik jarayonga ta’siri masalasi dolzarbdir.

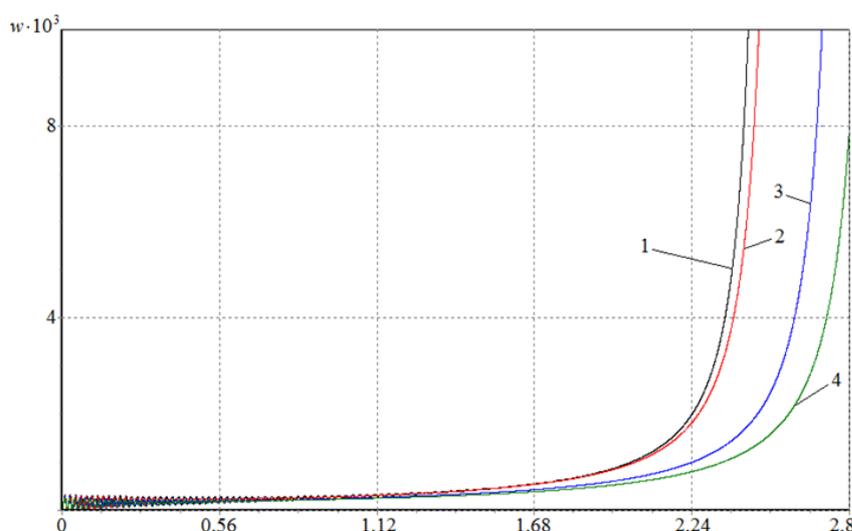


10-rasm. Turli xil o‘zaklangan tolali yo‘nalishlarga (1 – 0°; 2 – 15°; 3 – 30°; 4 – 45°) ega plastinalar uchun ko‘chishning vaqtga bog‘liqligi.

10-rasmda tolalar yo‘nalish burchaklari 0° dan 45° gacha oshgani sayin, kritik vaqt oshishi ko‘rsatilgan. Bu shuni anglatadiki, barcha, bir qatlamli o‘zaklangan KAST-V plastinalari orasida eng barqarori 45° li tola yo‘nalishi bo‘lgan plastina hisoblanadi. Tola yo‘nalishi 0° dan 45° gacha bo‘lgan bir qatlamli plastinalar uchun kritik vaqt qiymatlari orasidagi farq 12% ni tashkil qiladi.

Yuqorida aytib o‘tilganidek, o‘zaklangan kompozitlar bir nechta o‘zaklangan qatlamlarning majmuidir, ularning har biri o‘ziga xos mexanik xususiyatlarga ega. Shunday qilib, kompozitning tuzilishini o‘zgartirib, holatini oldindan taxmin qilish mumkin bo‘lgan konstruksiyalarni yaratish mumkin.

Shu munosabat bilan, markaziy siqilish ta’siri ostida ulardagi tolalarning turli yo‘nalishlariga ega bo‘lgan ko‘p qatlamli o‘zaklangan plastinalarning holatini tadqiq qilish alohida qiziqish uyg‘otadi. 11-rasmda KAST-V dan tayyorlangan ko‘p qatlamli o‘zaklangan plastinalarning o‘rta nuqtalaridagi o‘zgarishlarni ko‘rsatilgan. Bundan tashqari, bu plastinalarning barchasi turli xil tolalar yo‘nalishlariga ega bo‘lsada, ularning qalinligi bir xildir. Natijalar shuni ko‘rsatadiki, bir qatlamda OX o‘qiga nisbatan -45^0 va boshqa qatlamda 45^0 burchak ostida joylashgan tolali ikki qatlamli plastinalar uchun kritik vaqt qiymatlari boshqalarga qaraganda yuqori bo‘ladi. OX o‘qiga parallel va perpendikular bo‘lgan qatlamli tolali plastina shunga o‘xshash mexanik xususiyatlarga ega bo‘lgan boshqa plastinalarga qaraganda kamroq bo‘lgan kritik vaqtga ega (ya’ni u kamroq barqaror). Yuqoridagi ikki qavatli plastinalar uchun kritik vaqt qiymatlari orasidagi farq 13.3% ni tashkil qiladi.



11-rasm. Ko‘chishning turli xil o‘zaklangan tolalar yo‘nalishlarida (1 – $0^0/90^0$; 2 – $15^0/-15^0$; 3 – $30^0/-30^0$; 4 – $45^0/-45^0$) ikki qavatli plastinalar vaqtga bog‘liqligi.

7-jadvalda o‘zaklangan plastinalarning holatini tadqiq qilish natijalari, ularning tomonlaridan birini dinamik ravishda siqilish paytida ularning mexanik, fizik va geometrik parametrlarining keng oraliqda o‘zgarishi keltirilgan.

Jadvalda keltirilgan sonli natijalarni tahlil qilish shuni ko‘rsatadiki, konstruksion materiallarning qovushqoq-elastik xususiyatlarini hisobga olish kritik vaqt qiymatining sezilarli pasayishiga olib keladi. Ba’zi hollarda elastik va qovushqoq-elastik masalalarni hal qilishda olingan natijalardagi farqlar bir-biridan 20% dan ko‘proq farq qiladi. Tuzilmalardagi tolalarning yo‘nalishi ham muhim vaqt miqdoriga sezilarli ta’sir ko‘rsatishi ko‘rsatilgan. Masalan, tolalari 45^0 va -45^0 burchak ostida yo‘nalishga ega bo‘lgan ikki qavatli plastinalarda kritik vaqt qiymatlari tolalari 45^0 burchak ostida joylashgan bir xil qalinlikdagi bir qatlamli

plastinadan kattaroqdir. Bu shuni anglatadiki, kompozit materialning tuzilishini o'zgartirib, u yoki bu dinamik va statik yuklarga nisbatan ancha chidamli konstruksiyalarni yaratish mumkin.

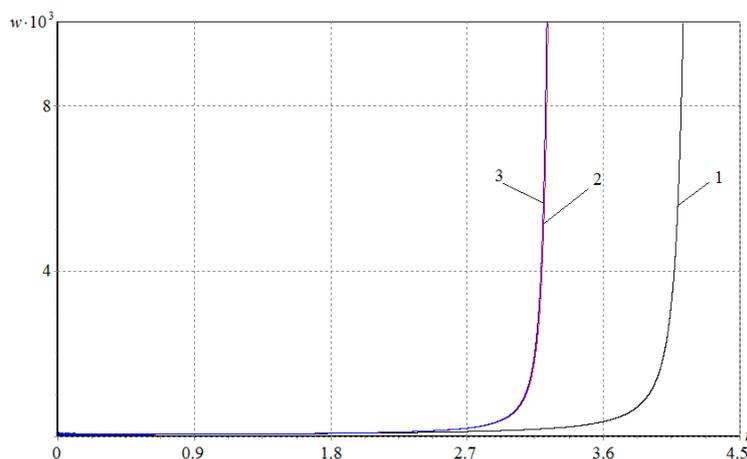
7-jadval

Plastinaning turli geometrik va fizik-mexanik parametrlarida kritik vaqt qiymatlari

№	Plastinaning geometrik parametrlari			Fizik parametrlari		Qatlamlar soni	Tolar yo'nalishlari	Kritik vaqt qiymatlari		
	a, m	b, m	h, sm	q, Pa	$P_0, MPa/s$			Elastik masala	Qovush qoq-elastik masala	farqi (% da)
1	0.5	0.5	0.5	100	2	1	45 ⁰	3.2798	2.7117	21
2	0.6	0.5	0.5	100	2	1	45 ⁰	3.3358	2.7338	22
3	0.7	0.5	0.5	100	2	1	45 ⁰	3.5262	2.8604	23.3
4	0.5	0.5	0.4	100	2	1	45 ⁰	2.0238	1.6522	22.5
5	0.5	0.5	0.3	100	2	1	45 ⁰	0.9192	0.7680	19.7
6	0.5	0.5	0.5	200	2	1	45 ⁰	3.2110	2.5986	23.6
7	0.5	0.5	0.5	300	2	1	45 ⁰	3.1422	2.4982	25.8
8	0.5	0.5	0.5	100	2.5	1	45 ⁰	2.6268	2.1806	20.5
9	0.5	0.5	0.5	100	3	1	45 ⁰	2.1858	1.8248	19.8
10	0.5	0.5	0.5	100	2	1	0 ⁰	2.5984	2.3884	8.8
11	0.5	0.5	0.5	100	2	1	15 ⁰	2.7640	2.4038	15
12	0.5	0.5	0.5	100	2	1	30 ⁰	3.1046	2.6044	19.2
13	0.5	0.5	0.5	100	2	2	0°/90°	2.5984	2.3830	9
14	0.5	0.5	0.5	100	2	2	15°/-15°	2.7860	2.4152	15.4
15	0.5	0.5	0.5	100	2	2	30°/-30°	3.1396	2.6344	19.2
16	0.5	0.5	0.5	100	2	2	45°/-45°	3.3242	2.7496	20.9
17	0.5	0.5	0.5	100	2	3	45°/-45°/45°	3.2900	2.7168	21.1

Beshinchi bobning uchinchi paragrafida qovushqoq-elastik anizotropik o'zaklangan plastinaning dinamik siljish paytida dinamik ustuvorligi masalasi ko'rib chiqilgan. $P(t) = P_0 \cdot t$ (P_0 – yuklash tezligi) qonuniga binoan siljish harakatlari vaqtga mutanosib ravishda oshishini qabul qilamiz.

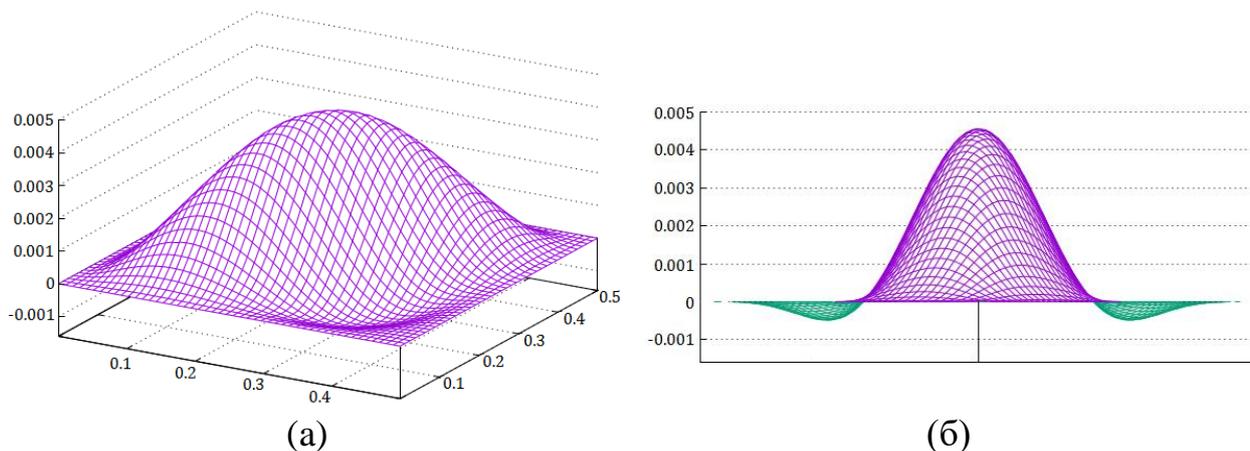
Yuqorida olingan natijalarning to'g'riligini asoslash maqsadida Bubnov-Galerkin usulining yaqinlashuvi o'rganildi (12-rasm).



12-rasm. Bubnov-Galerkin usulining yaqinlashishi
(1 - $M = N = 1$, 2 - $M = N = 2$, 3 - $M = N = 3$)

Quyidagi natijalar bir hadli va ko‘p hadli yaqinlashuvlardan olingan. Rasmdan ko‘rinib turibdiki, ko‘chishni hisoblashda approksimatsiya funksiyasida to‘rtta dastlabki garmonikani ($M = N = 2$) inobatga olish kifoya. Hadlar sonining yanada ko‘payishi dinamik jarayonga sezilarli ta‘sir ko‘rsatmaydi.

13a va 13b rasmlarda siljish kuchlari ta‘sirida birk mahkamlangan plastinaning deformatsiyalanadigan shaklini tasvirlaydi. Ta‘kidlash joizki, bunday yuklar ta‘sirida plastinada ham musbat, ham manfiy ko‘chishlar bo‘lgan sohalar paydo bo‘ladi. Bu yerda qayd etish kerakki, anizotrop plastinalarning bir xil, tekis siquvchi yuklanishida ushbu sohalarining tugun bog‘lanishlari, boshqacha aytganda tugun chiziqlari yoki no‘l og‘ish chiziqlari yuzaga kelmaydi.



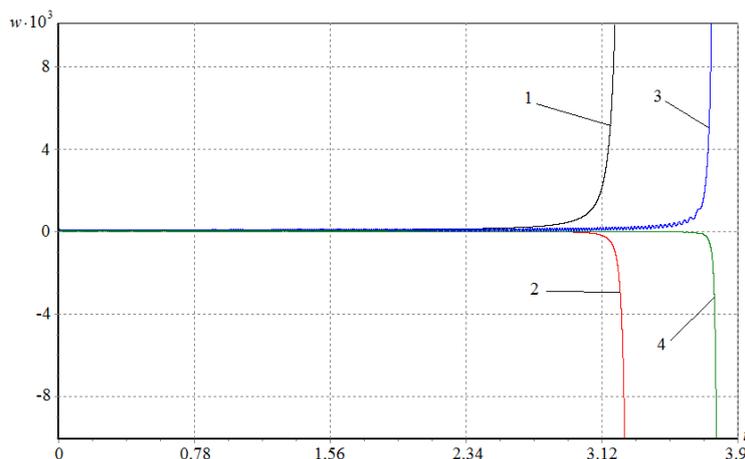
13-rasm. Deformatsiyalanadigan plastinaning egilish shakli

Siquvchi dinamik yuklar ta‘siri ostida plastinalarning ustuvorligi masalalarini hal qilishda kritik vaqt va kritik yukni belgilaydigan mezon sifatida, aksariyat hollarda ko‘chishning qiymati plastina qalinligiga teng qiymatdan oshmasligi sharti qabul qilinadi. Plastinaning bunday deformatsiyalarida manfiy qiymatga ega bo‘lgan ko‘chish sohalari bo‘lmaydi.

Ishda, deformatsiyalanadigan plastinada musbat va manfiy ko‘chishlarga ega bo‘lgan sohalar mavjudligi sababli, hisoblashda eng yuqori va eng past

nuqtalardagi ko‘chish qiymatlari o‘rtasidagi farq (bu yerda va undan keyin – kritik nuqtalar) bo‘lgan paytda erishilgan kritik dinamik yukni ko‘rib chiqamiz. Plastina qiymatiga etadi, uning qalinligi teng. Bu yerda shuni ta’kidlash kerakki, plastinaning eng yuqori nuqtasi joylashgan joydan farqli o‘laroq (u har doim diagonallarning kesishmasida bo‘ladi – o‘rta nuqta), eng past nuqtaning joylashishi plastinaning fizik va geometrik parametrlarining o‘zgarishiga qarab o‘zgaradi.

Materialning qovushqoq-elastik xususiyatlarining o‘zaklangan plastina holatiga ta’siri 14-rasmda berilgan. Bu yerda 1 va 2 egri chiziqlar qovushqoq-elastik masalaning natijalarini, 3 va 4 egri chiziqlar elastik ($A = 0$) ni ifodalaydi. Rasmlardan ko‘rinib turibdiki, konstruksiya materialining qovushqoq-elastik xususiyatlarini hisobga olish kritik vaqtning pasayishiga olib keladi. Elastik va qovushqoq-elastik plastinalar uchun kritik vaqt qiymatlaridagi farq, plastinaning geometrik va fizik parametrlarining o‘zgarishiga qarab, 15% dan oshadi. Bundan tashqari, o‘zaklangan EDF plastinasi ($A = 0.0067$) o‘zaklangan KAST-V plastinasi ($A = 0.0208$) bilan solishtirganda siljish harakatlariga nisbatan ancha ustuvorli ekanligini ko‘rish mumkin (14-rasm). Buning sababi shundaki, ikkinchisi birinchisiga nisbatan ko‘proq qovushqoq xususiyatlarga ega.



14-rasm. Kritik nuqtalarda KAST-V plastinasining ko‘chishlarini o‘zgarishi

So‘ngra dinamik tez sur‘at bilan o‘sadigan siljish yuklari ta’sirida KAST-V dan anizotrop o‘zaklangan plastinaning kritik vaqt qiymatlarining sonli natijalari keltirilgan (8-jadval). Ushbu natijalar geometrik va fizik parametrlarida keng ko‘lamli o‘zgarishlar natijasida olingan. Bunday holda, jadvalda keltirilgan qiymatlar elastik va qovushqoq-elastik masalalarning natijasidir.

Yuqorida aytib o‘tilganidek, konstruksiya materialining qovushqoq-elastik xususiyatlarini hisobga olish sonli natijalarga salmoqli ta’sir qiladi. Bu ayniqsa, tashqi statik yuk q ning siljish yuklaridan tashqari, anizotrop plastinaga ta’sir qilganda seziladi.

Har biri mexanik xususiyatlari bilan bir-biridan farq qiladigan o‘zaklanuvchi qatlamlarning almashinishi bo‘lgan zamonaviy qatlamli kompozitlar so‘nggi paytlarda ko‘plab sohalarda muvaffaqiyatli qo‘llanilmoqda. Ular konstruksiyaning og‘irligini sezilarli darajada kamaytirishi, dvigatellarning samaradorligini oshirishi, shuningdek, yuqori darajada samarador ishlashi va ishonchlilikka ega yangi

konstruksiyalarni yaratishi mumkin. Shunga asoslanib, qatlamlar sonining ta'siri va qatlamlardagi o'zaklangan tolalar yo'nalishi o'rganilayotgan dinamik jarayonga o'rganildi. Natijalar shuni ko'rsatadiki, ikki qavatli plastinalar bir qavatli plastinalarga qaraganda siljish yuklariga nisbatan ancha chidamli. Masalan, 45^0 va

-45^0 tolalari yo'nalishi bo'lgan ikki qavatli qovushqoq-elastik plastinada kritik vaqt qiymatlari 45^0 tolalari yo'nalishi bo'lgan bir qatlamga qaraganda 1.2 baravar ko'p. Qatlamlar sonining yanada ko'payishi har doim ham o'rinli emas. Uch qatlamli qovushqoq-elastik KAST-V plastinalari tolalar yo'nalishi bilan $45^0/-45^0/45^0$ ikki qatlamli qatlamlarga qaraganda kamroq chidamli, lekin bir qatlamli qatlamlarga qaraganda ancha ustuvorli. Bundan tashqari, ushbu uchta konstruksiyaning qalinligi teng.

8-jadval

Anizotrop o'zaklangan plastinaning geometrik va fizik parametrlarining turli qiymatlarida kritik vaqt qiymatlari

№	Geometrik parametrlari			Fizik parametrlari		Qatlamlar soni	Tolalar yo'nalishlari	Kritik vaqtning qiymatlari		
	a, m	b, m	h, cm	q, Pa	$P_0, MIIa/c$			Elastik masala	Qovushqoq-elastik masala	Farqi (% da)
1	0.5	0.5	0.5	100	5	1	45^0	3.7325	3.1629	15.3
2	0.6	0.5	0.5	100	5	1	45^0	3.2155	2.7211	15.4
3	0.7	0.5	0.5	100	5	1	45^0	2.9677	2.5129	15.3
4	0.5	0.5	0.4	100	5	1	45^0	2.3838	2.0194	15.3
5	0.5	0.5	0.3	100	5	1	45^0	1.3292	1.1240	15.4
6	0.5	0.5	0.5	200	5	1	45^0	3.7136	3.1246	15.9
7	0.5	0.5	0.5	300	5	1	45^0	3.7009	3.0946	16.4
8	0.5	0.5	0.5	100	6	1	45^0	3.1141	2.6452	15.1
9	0.5	0.5	0.5	100	7	1	45^0	2.6711	2.2743	14.9
10	0.5	0.5	0.5	100	5	1	0^0	4.2618	3.9568	7.2
11	0.5	0.5	0.5	100	5	1	15^0	3.9175	3.4630	11.6
12	0.5	0.5	0.5	100	5	1	30^0	3.7667	3.2287	14.3
13	0.5	0.5	0.5	100	5	2	$0^0/90^0$	4.2861	3.9712	7.3
14	0.5	0.5	0.5	100	5	2	$15^0/-15^0$	4.3527	3.8456	11.7
15	0.5	0.5	0.5	100	5	2	$30^0/-30^0$	4.5252	3.8704	14.5
16	0.5	0.5	0.5	100	5	2	$45^0/-45^0$	4.6053	3.8919	15.5
17	0.5	0.5	0.5	100	5	3	$45^0/-45^0/45^0$	3.7993	3.2184	15.3

Beshinchi bobning so'nggi paragrafi qovushqoq-elastik anizotrop o'zaklangan konstruksiya elementlarning dinamikasi masalalarini hal qilishda qobiqlarning klassik va takomillashtirilgan nazariyalaridan olingan natijalarni qiyosiy tahlil qilishga bag'ishlangan.

Natijalar shuni ko'rsatdiki, qovushqoq-elastik anizotrop o'zaklangan konstruksiya elementlarining dinamikasi masalalarini ko'rib chiqishda qalinligi muhim rol o'ynaydi. Ushbu nazariyalardan olingan natijalardagi farqlar faqat konstruksiya elementning qalinligi oshganda paydo bo'ladi. Vaqtning dastlabki

nuqtasida ko‘rib chiqilgan barcha holatlarda, ushbu nazariyalar bo‘yicha olingan natijalar amplituda qiymatlari bo‘yicha bir-biridan deyarli farq qilmaydi lekin vaqt o‘tishi bilan o‘rtadagi farq ortib boradi.

ASOSIY XULOSALAR

“Qatlamli o‘zaklangan kompozit qobiqlarning kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik va dinamik holatini baholash uchun matematik modellar va hisoblash usullari” mavzusidagi fan doktorlik (DSc) dissertatsiyasi bo‘yicha o‘tkazilgan tadqiqotlar asosida quyidagi xulosalar olindi:

1. Geometrik noxizizlikni hisobga olgan holda qovushqoq-elastik qatlamli anizotrop o‘zaklangan konstruksiya elementlarning dinamikasini baholash uchun nazariy asoslar va umumiy matematik modellar ishlab chiqilgan.

2. Klassik va takomillashtirilgan qobiqlar nazariyasidan foydalangan holda qovushqoq-elastik qatlamli anizotropik o‘zaklangan plastinalar, panellar va qobiqlarning dinamikasini baholash uchun noxizizli xususiy hosilali integro-differensial tenglamalar sistemalari ishlab chiqilgan.

3. Dinamik tez sur‘atlarda o‘sib boradigan siquvchi va siljish yuklamalarini hisobga olgan holda noxizizli tebranishlar va qovushqoq-elastik anizotrop o‘zaklangan plastinalar va qobiqlarning dinamik ustivorligi masalalarini tadqiq qilish uchun oddiy ajralmaydigan integro-differensial tenglamalar sistemalari Bubnov-Galerkin usulini qo‘llash orqali olingan.

4. Samarali sonli yechish uslubi va hisoblash algoritmi ishlab chiqilgan, ularning asosida Delphi algoritmik tilida qovushqoq-elastik sistemalar dinamikasining keng qamrovli muammolarini hal qilishga imkon beradigan amaliy dasturlar majmuasi yaratilgan. Ushbu dasturlar majmuasi kompozitsion materialning turli fizik-mexanik va geometrik parametrlarida qatlamli anizotrop o‘zaklangan konstruksiya elementlar holatini baholash va prognoz qilish imkonini berishi ko‘rsatilgan.

5. Matematik modellar adekvatligi va sonli usullar, algoritm hamda olingan natijalarning aniqligini asoslash uchun test masalasi yechilgan. Olingan natijalar shuni ko‘rsatdiki, taklif etilayotgan sonli usulning xatoligi ishlatilgan kvadratura formulalarining xatoligiga to‘g‘ri keladi va interpolatsiya qadamiga nisbatan bir xil kichiklik tartibiga ega bo‘ladi. Ishlab chiqilgan matematik modellarning adekvatligi, taklif etilgan usulning afzalligi va samaradorligi qatlamli anizotrop o‘zaklangan yupqa devorli konstruksiya elementlari uchun dinamika va ustivorlik masalalarini hal qilish orqali isbotlangan.

6. Uchuvchi apparatlar qanoti ko‘rinishidagi anizotrop o‘zaklangan to‘rtburchak plastinalarning (turli geometrik konfiguratsiyalarga ega bo‘lgan konsol plastinalari) kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini tadqiq qilishda birinchi marotaba egilish koeffitsiyenti tushunchasi kiritilgan. Plastinalarning fizik-mexanik va geometrik parametrlariga, shuningdek o‘zaklangan tolalarning yo‘nalishiga qarab ko‘chish qiymatlari tahlil qilingan.

7. Turli xil statik va dinamik yuklanishlarda qatlamli anizotrop o‘zaklangan konstruksiya elementlarning dinamik holatini o‘rganishda konstruksiya elementlari

materialining qovushqoq-elastik xususiyatlarini hisobga olishning muhimligi ko'rsatilgan.

8. Klassik va takomillashtirilgan qobiqlar nazariyalaridan foydalangan holda qovushqoq-elastik anizotropik o'zaklangan konstruksiyay elementlarning erkin tebranishlarini tadqiq qilishda, olingan natijalardagi sezilarli farq qatlamli o'zaklangan yupqa bo'lmagan konstruksiyalar elementlarning dinamikasini baholashda paydo bo'lishi aniqlandi.

9. Tadqiqot natijalariga ko'ra 1 ta monografiya, 2 ta intellektual mulk huquqi guvohnomasi, 20 ta xalqaro jurnallarda maqolalar chop etilgan (18 ta Scopus ma'lumotlar bazasida indekslangan nashrlarda va 13 ta Web of Science ma'lumotlar bazasida).

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/31.03.2022.T/FM.10.04 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ НАУК ПРИ
НИУ «ТИИИМСХ»**

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ТАШКЕНТСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ИРРИГАЦИИ И МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА»**

ЭШМАТОВ БАХТИЁР ХАСАНОВИЧ

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ДЛЯ
ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО И
ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СЛОИСТЫХ АРМИРОВАННЫХ
КОМПОЗИТНЫХ ОБОЛОЧЕК**

**05.01.07 – Математическое моделирование. Численные методы и комплексы программ
01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела**

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА (DSc)
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК**

Ташкент – 2024

Тема диссертации доктора наук (DSc) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан, под номером B2024.2.DSc/FM255.

Диссертация выполнена в Национальном исследовательском университете «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства».

Автореферат диссертации на трёх языках (узбекском, русском, английском (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (<http://tiame.uz>, info@ifar.uz) и на Информационно-образовательном портале «Ziyonet» (www.ziyonet.uz).

Научные консультанты:

Мирсаидов Мирзиёд

Академик АН РУз, д.т.н., профессор

Абдикаримов Рустамхан Алимханович

доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Сафаров Исмоил Иброхимович

доктор физико-математических наук, профессор

Равшанов Нормухмад

доктор физико-математических наук, профессор

Нуралиев Фахриддин Муродиллаевич

доктор технических наук, профессор

**Ведущая организация:
университет**

Самаркандский

архитектурно-строительный

Защита диссертации состоится «__» _____ 2024 г. в ____ часов на заседании Научного совета DSc.03/31.03.2022.T/FM.10.04 при Институте фундаментальных и прикладных наук при НИУ «ТИИИМСХ» (Адрес: 100000, г. Ташкент, ул. Кары Ниязий, 39, Институт фундаментальных и прикладных наук, зал заседаний №108; (+99871) 237-09-61; факс: (+99871) 237-48-67, e-mail: info@ifar.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Национального исследовательского университета «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства» (зарегистрирована за № __). (Адрес: 100000, г. Ташкент, ул. Кары Ниязий, 39. Тел. (+99871) 237-09-61.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2024 года.
(Реестр протокола рассылки № __ от «__» _____ 2024 года).

Б.Ж. Ахмедов

Председатель научного совета
по присуждению ученых степеней,
академик АН РУз,

доктор физико-математических наук, профессор

Д.Р. Раимбаев

Ученый секретарь научного совета
по присуждению ученых степеней,
доктор физико-математических наук

А.Р. Хаётов

Председатель научного семинара при
научном совете по присуждению ученых степеней,
доктор физико-математических наук, профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора наук (DSc))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире процессе развития современной инженерной деятельности человека возрастает сложность создания техники и технологии её изготовления, в связи с чем возникает потребность в использовании в инженерных конструкциях новых материалов, как правило, неоднородных – с заданным комплексом физико-механических свойств. Одной из разновидностей неоднородных материалов, находящих все большее применение в последние годы, являются композиционные материалы. Применение таких материалов в инженерных конструкциях не только существенно улучшает их эксплуатационные характеристики, но и в ряде случаев позволяют создавать конструкции, нереализуемые в рамках традиционных материалов. Использование новых композиционных материалов в инженерной практике, проектирование и создание прочных, легких и надежных конструкций требует совершенствования математических моделей, задач статики и динамики слоистых армированных элементов тонкостенных конструкций и разработки численных методов расчета, в которых учитываются реальные свойства композиционных материалов.

В последние годы в мире наблюдается интенсивный рост использования композиционных материалов в различных отраслях промышленности и строительства. Причиной этого роста является растущий спрос на углеродные волокна со стороны конечных пользователей, особенно в аэрокосмической и оборонной отраслях. В настоящее время рынок композиционных материалов оценивается в 114 млрд. долларов США и, по прогнозам, достигнет порядка 170 млрд. долларов США к 2027 году, увеличившись в среднем на 8.2% в период с 2022 по 2027 год.

В нашей республике также особое внимание уделяется производству и широкому внедрению в промышленность и строительство конструкций из композиционных материалов. Потребность в новых современных композиционных материалах способствует увеличению количества научно-исследовательских центров и лабораторий для изучения их физико-механических и химических свойств.

В некоторой степени данное диссертационное исследование направлено на достижение целей, определенных в нормативно-правовых документах, касающихся данной сферы деятельности, включая Указ Президента Республики Узбекистан №УП-165 «Об утверждении стратегии инновационного развития Республики Узбекистан на 2022 - 2026 годы» от 6 июля 2022 года, где среди приоритетных секторов реализации стратегии инновационного развития особое внимание уделяется «широкому внедрению инновационных технологий в производство **новых композиционных материалов**». Там же, в качестве мероприятий направленных на увеличение доли инновационно активных организаций за счет совершенствования институциональных механизмов государственной поддержки инновационной деятельности упоминается «... аккумулярование ресурсов, создание новых

рабочих мест и продукции, а также организация новых услуг при внедрении искусственного интеллекта, интернета вещей и технологий цифровизации в таких стратегических направлениях, основанных на принципах «зеленой экономики», как возобновляемая энергетика, **новые композиционные материалы**, робототехника, биотехнологии, продовольственная безопасность, умное сельское хозяйство, умная медицина, умная промышленность и кластеризация». Учитывая, что реализация этих проектов невозможна без использования современных программных средств и информационных технологий, важно отметить также Указ Президента Республики Узбекистан №УП-144 «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы обеспечения сейсмической безопасности Республики Узбекистан» от 30 мая 2022 года. Согласно этому документу на Национальный исследовательский университет «ТИИМСХ» возложена функция по созданию научно-учебной лаборатории «Оценка сейсмостойкости водохранилищ и гидротехнических сооружений» с использованием для этого современных цифровых методов и программ (**Plaxis, Ansys, Abaqus** и других).

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в рамках приоритетного направления IV «Математика, механика и информатика» развития науки и технологий Республики Узбекистан.

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации.

В настоящее время в известных мировых ведущих научных центрах и высших учебных заведениях – Вирджинском политехническом институте (США), Техаском университете А&М (США), Университете Восточного Мичигана (США), Университете Южной Флориды (США), Шанхайском университете Цзяо Тун (Китай), Университете Лилль (Франция), Институте прикладной механики Российской Академии наук (Россия), Институте прикладной математики им. М.В.Келдыша (Россия), Институте теоретической и прикладной механики СО РАН имени С.А.Христиановича (Россия), Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого (Россия), Институте механики имени С.П.Тимошенко (Украина), Латвийском университете (Латвия), Институте механики НАН Республики Армения (Армения) и др. проводятся активные научные исследования в области статического и динамического расчета элементов тонкостенных армированных конструкций из композиционных материалов.

Наиболее актуальными направлениями исследований задач статики и динамики тонкостенных элементов конструкций из композиционных материалов, проводимых в настоящее время в этих центрах являются: разработка унифицированных теорий тонких и толстых оболочек (включая трехмерные теории) с учетом неоднородности материала конструкции (Университет Восточного Мичигана, США); усовершенствование математических моделей многослойных композитных пластин и оболочек (Техасский Университет А&М); моделирование инженерных материалов и

разработка методов ускоренного испытания конструкций из композиционных материалов (Политехнический университет Вирджинии); на основе теоретических и экспериментальных исследований разработка оптимального армирования композитных конструкций (Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша); исследование армированных, многослойных анизотропных, структурно-неоднородных, композитных и других конструкций, работающих в условиях статического и динамического нагружения, температурных режимах (Институт теоретической и прикладной механики СО РАН имени С.А.Христиановича) и др.

Особо отметим научные исследования по разработке теории и построению математических моделей, численных методов, алгоритмов и программных средств для решения проблем влияния геометрических и физических параметров материала на напряженно-деформированное состояние элементов тонкостенных конструкций из композиционных материалов; разработка методов оценки и прогнозирования прочности многослойных армированных тонкостенных конструкций; разработка эффективных методов снижения риска разрушения тонкостенных конструкций при различных статических и динамических нагрузках; создание теоретических основ для решения задач об устойчивости тонких пластин и оболочек с учетом реальных физико-механических свойств материалов и др.

Степень изученности проблемы. К плеяде выдающихся ученых внесших особый вклад в создание теорий, построение математических моделей и методов расчета задач исследования напряженно-деформированного состояния слоистых элементов тонкостенных анизотропных армированных конструкций следует отнести: С.А.Амбарцумяна, С.Г.Лехницкого, Х.М.Муштари, П.М.Огибалова, М.А.Колтунова, И.Е.Трояновского, J.E.Ashton, J.M.Whitney, Э.И.Григолюка, П.П.Чулкова, В.В.Васильева, R.M.Jones, J.N.Reddy, M.S.Qatu, Ю.В.Немировского, В.Ц.Гнуни, А.К.Мальмейстера, В.П.Тамужа, Г.А.Тетерса, А.Е.Богдановича, И.М.Тюнееву, В.Д.Кубенко, П.С.Ковальчука, Л.В.Курпа, А.Кaw, R.F.Gibson и др.

В Узбекистане существенную лепту в разработку математических моделей и вычислительных методов для оценки и прогнозирования напряженно-деформированного состояния элементов конструкций внесли такие отечественные ученые, как М.Т.Уразбаев, В.К.Кабулов, Ф.Б.Абуталиев, Т.Б.Буриев, Т.Ш.Ширинкулов, С.С.Негматов, Ф.Б.Бадалов, Б.Мардонов, Х.Эшматов, М.Мирсаидов, К.Султанов, Т.Мавлянов, И.И.Сафаров, Н.Равшанов, Ш.М.Шадиметов, Б.А.Худаяров, Р.Ш.Индиаминов, А.Б.Ахмедов, Р.А.Абдикаримов, М.К.Усаров и др.

Вместе с тем, существуют еще большие пробелы в математическом моделировании процессов, происходящих в элементах тонкостенных слоистых армированных композитных конструкций, обладающих

вязкоупругими свойствами и состоящих из слоев с различными направлениями армированных волокон.

Связь диссертационного исследования с исследовательскими планами ВУЗа, в котором выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках: проекта “Разработка эффективных методов решения нелинейных задач динамики вязкоупругих тонкостенных конструкций из композиционных материалов” (2009-2011), входящего в план научно-исследовательской работы КХА-15-041 Ташкентского института инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства; фундаментального гранта Республики Узбекистан № ФЗ-20200929327 на период 2021-2026 годы по теме “Разработка надежной технологии и теории прочности земляных плотин с учетом нелинейной фильтрации и влажности почвы”; государственной бюджетной темы “Разработка перспективных методов расчета прочности и динамики грунтовых сооружений с учетом нелинейного деформирования материалов” 2021-2023 гг. в Национальном исследовательском университете “Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства”.

Целью исследования является развитие теоретических основ, разработка математических моделей и методов решений задач статики и динамики элементов тонкостенных анизотропных армированных элементов конструкций из композиционных материалов с учетом геометрической нелинейности и диссипативных свойств материала в рамках теории Кирхгофа-Лява и теории Тимошенко.

Задачи исследования:

- разработка теоретических основ и обобщенной математической модели для исследования напряженно-деформированного состояния элементов тонкостенных анизотропных армированных конструкций;

- усовершенствование математических моделей и методов численных решений нелинейных краевых задач для тонкостенных армированных конструкций, обладающих анизотропией и находящихся под воздействием статических и динамических нагрузок;

- получение систем нераспадающихся нелинейных интегро-дифференциальных уравнений со слабо-сингулярными ядрами релаксации для оценки динамики вязкоупругих тонкостенных армированных конструкций под воздействием внешних нагрузок;

- разработка эффективного алгоритма решения и программных средств для численного решения задач динамики вязкоупругих тонкостенных армированных конструкций при воздействии на них статических и динамических нагрузок;

- исследование влияния различных физико-механических и геометрических параметров на статику и динамику вязкоупругих элементов тонкостенных армированных конструкций;

- создание комплекса программных средств для оценки напряженно-деформированного состояния и динамического поведения слоистых армированных композитных элементов оболочечных конструкций.

Объектом исследования являются слоистые анизотропные тонкостенные армированные элементы конструкций, используемые в различных отраслях промышленности и строительства.

Предметом исследования является развитие теорий, разработка математических моделей, методов, алгоритмов и программных средств для оценки внутренних силовых факторов и динамического поведения анизотропных армированных тонкостенных элементов конструкций при различных нагрузках.

Методы исследования. В диссертационной работе применяются метод Бубнова-Галеркина, методы решения систем нелинейных интегро-дифференциальных уравнений со слабо-сингулярными ядрами релаксации, метод квадратурных формул, численные эксперименты, метод Гаусса, метод конечных элементов.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- усовершенствованы теоретические предпосылки для оценки динамики вязкоупругих анизотропных пластинок, панелей и оболочек с учетом слоистости элементов композитных конструкций;

- разработаны математические модели задач динамики вязкоупругих анизотропных армированных слоистых элементов конструкций в рамках теории Кирхгофа-Лява и теории Тимошенко, позволяющие учесть направления армированных волокон в каждом слое;

- получены системы обыкновенных нераспадающихся интегро-дифференциальных уравнений для исследования задач о нелинейных колебаниях и динамической устойчивости вязкоупругих анизотропных армированных пластин и оболочек с учетом динамических быстро возрастающих сжимающих и сдвиговых нагрузок;

- разработан вычислительный алгоритм численного решения систем обыкновенных нелинейных интегро-дифференциальных уравнений задач о нелинейных колебаниях и динамической устойчивости вязкоупругих элементов тонкостенных армированных конструкций;

- на основе разработанного программного средства на алгоритмическом языке Delphi, исследовано динамическое поведение анизотропных армированных вязкоупругих тонкостенных пластин при различных нагрузках, граничных условиях и направления армированных волокон;

- при помощи инженерного программного комплекса ABAQUS, исследовано напряженно-деформированное состояние анизотропных армированных четырёхугольных пластин крыловидной конфигурации.

Практические результаты исследования заключаются в создании численных методов, алгоритмов и комплекса прикладных программ для оценки и прогноза динамического поведения и напряженно-деформируемого состояния армированных пластин, панелей и оболочек из композиционных

материалов с учетом их физико-механических и геометрических параметров и направления армированных волокон.

Достоверность результатов исследования обосновывается корректностью постановки краевых задач с использованием апробированного математического аппарата теории тонких пластин и оболочек, строгостью математических выкладок, использованием обоснованных методов решения, решением ряда модельных задач, для которых известны точные аналитические или приближенные численные решения, проверкой для каждой из рассмотренных задач практической сходимости результатов до требуемой точности, сопоставлением результатов, полученных по разработанной методике, алгоритмами и программами расчета с известными решениями модельных задач.

Научная значимость результатов исследования:

Научная значимость проведенных исследований заключается в разработке теоретических основ и математических моделей, методов и алгоритмов, вносящих важный вклад в развитие теории тонкостенных элементов композитных конструкций и позволяющих учитывать их различные конструктивные особенности под статических и динамических воздействиях.

Практическая значимость исследования:

Практическая значимость заключается в разработке алгоритмов и комплекса прикладных программ, используемых для оценки прочности и динамического поведения элементов слоистых армированных конструкций и практическом использовании результатов исследований при проектировании конструкций с учетом реальных свойств материала.

Внедрение результатов исследований.

На основе разработанных математических моделей, вычислительных методов и алгоритмов для численного анализа статики и динамики тонкостенных слоистых армированных конструкций проведены математические расчеты элементов конструкций из композиционных материалов на прочность при различных нагрузках. Эти расчеты внедрены в ООО «Кимёвий технология», ООО «Real Lion Houses», ООО «New World Star» и ООО «Nurobod House» (справка «Узпромстройматериалы» №02-15-1336 от 3 июня 2024 года). Внедрение научно-исследовательских результатов позволило, за счет снижения веса конструкции, сэкономить расходные материалы на более чем 20 миллионов сум.

Апробация результатов исследований. Результаты данного исследования апробированы на 14 международных научно-технических и научно-практических конференциях.

Полное содержание диссертационной работы доложено и обсуждено на:
- республиканском научном семинаре “Проблемы механики” при кафедре “Механика и компьютерное моделирование” Национального исследовательского университета “Ташкентский институт инженеров

ирригации и механизации сельского хозяйства” (протокол №19 от 6 апреля 2024 года);

- научном семинаре при Ташкентском химико-технологическом институте (протокол №1 от 9 апреля 2024 года);

- научном семинаре “Вычислительная математика и современные проблемы математического моделирования” при Ташкентском государственном транспортном университете (протокол №8 от 18 апреля 2024 года);

- научном семинаре при Институте механики и сейсмостойкости сооружений Академии наук Республики Узбекистан (протокол №3 от 7 мая 2024 года);

- научном семинаре лаборатории “Моделирование сложных систем” при научно-исследовательском институте “Развития цифровых технологий и искусственного интеллекта” (протокол №2 от 14 мая 2024 года).

Публикации по теме исследования. По теме диссертации всего опубликовано 43 научные работы. В частности, 1 монография, 2 свидетельства об интеллектуальной собственности, 26 статей в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов, в том числе 6 статей в республиканских и 20 статей в международных журналах (18 статей в изданиях индексируемых в базе данных Scopus и 13 статей в базе данных Web of Science).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Объем диссертации составляет 194 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении диссертационной работы представлены сведения об актуальности и востребованности темы научного исследования. Излагается цель исследования, основные проблемы, которые необходимо решить. Описаны и перечислены методы решения рассмотренных проблем по теме исследования, основные результаты, выносимые на защиту. Описана научная и практическая значимость полученных в работе результатов, а также их внедрение, опубликование в печати, структура и объем.

Первая глава диссертации под названием «Композиционные материалы. Основные характеристики. Современное состояние исследований в области механики композиционных материалов» состоит из трех параграфов. В первом параграфе главы представлены сведения касательно композиционных материалов, их классификация и основные характеристики. Подробно описаны преимущества использования композиционных материалов по сравнению с традиционными материалами.

В втором параграфе приведены основные особенности слоистых армированных композитных материалов. Как правило, в слоистых конструкциях слои армированного волокнами материала скрепляются

вместе, причем направления волокон каждого слоя обычно ориентированы в разных направлениях для придания готовой конструкции значительной прочности и жесткости в различных направлениях. Таким образом, прочность и жесткость многослойного армированного композитного материала, могут быть приспособлены к конкретным требованиям конструкции. Примерами многослойных композитных материалов, армированных волокнами, являются корпуса современных ракетных двигателей и субмарин, панели крыла самолета и секции кузова и т.д.

Основным элементом любого слоистого композита является пластина, представляющая собой плоское (иногда изогнутое, как в оболочке) расположение однонаправленных или сплетенных волокон в матрице.

Волокно является основным армирующим или несущим нагрузку элементом и обычно отличается высокой прочностью и жесткостью. Матрица может быть органической, металлической, керамической или углеродной. Функция матрицы заключается в поддержании и защите волокон, а также в обеспечении средства распределения нагрузки между волокнами и передачи нагрузки между ними. Последняя функция особенно важна, если волокно имеет разрыв. Там нагрузка от одной части разорванного волокна передается на матрицу и, впоследствии, на другую часть разорванного волокна, а также на соседние волокна. Механизмом передачи нагрузки является напряжение сдвига, возникающее в матрице; напряжение сдвига сопротивляется вытягиванию разорванного волокна. Этот механизм передачи нагрузки является средством, с помощью которого композитные материалы, армированные нитевидными волокнами, выдерживают нагрузку, превышающую прочность матрицы.

Компоненты ламината, волокон и матрицы, с точки зрения механики, проявляют себя по-разному. Волокна обычно демонстрируют линейную упругость, хотя арматурные стальные стержни в бетоне ведут себя как идеально пластичные. Алюминий, а также многие полимеры и некоторые композитные материалы проявляют упругопластическое поведение и т.д. К настоящему времени было мало проделано работ для реализации этих моделей в изучении поведения композитных материалов.

В третьем параграфе дан краткий обзор по истории развития и современного состояния исследований в области механики тонкостенных конструкций из композиционных материалов. Вся приведенная в первой главе информация касательно композиционных материалов получена на основе многолетних исследований автора в научных центрах и исследовательских лабораториях таких престижных зарубежных ВУЗах как Корнельский университет (США, 2005-2007), Вирджинский Политехнический институт и государственный университет (США, 2007-2008 гг.), Нью-Йоркский государственный университет в Баффало (США, 2008-2010 гг.) и в Университете науки и технологий Лилль I (Франция, 2013-2014 гг.).

Вторая глава диссертационной работы “Постановка задач динамики вязкоупругих армированных слоистых оболочек” посвящена построению математических моделей задач динамики вязкоупругих армированных слоистых оболочек. Для начала была построена математическая модель задачи на основе классической теории оболочек Кирхгофа-Лява. Гипотеза Кирхгофа-Лява известная как двумерная математическая модель тела, основана на принятии гипотезы недеформируемых нормалей.

Согласно теории Кирхгофа-Лява нормальные и касательные усилия, а также изгибающие и крутящие моменты определяются интегрированием напряжений по каждому слою:

$$N_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x^{(k)} dz, \quad N_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y^{(k)} dz, \quad T = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy}^{(k)} dz,$$

$$M_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x^{(k)} z dz, \quad M_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y^{(k)} z dz, \quad H = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy}^{(k)} z dz$$

ИЛИ

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ T \\ M_x \\ M_y \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}^* & A_{12}^* & A_{16}^* & B_{11}^* & B_{12}^* & B_{16}^* \\ A_{12}^* & A_{22}^* & A_{26}^* & B_{12}^* & B_{22}^* & B_{26}^* \\ A_{16}^* & A_{26}^* & A_{66}^* & B_{16}^* & B_{26}^* & B_{66}^* \\ B_{11}^* & B_{12}^* & B_{16}^* & D_{11}^* & D_{12}^* & D_{16}^* \\ B_{12}^* & B_{22}^* & B_{26}^* & D_{12}^* & D_{22}^* & D_{26}^* \\ B_{16}^* & B_{26}^* & B_{66}^* & D_{16}^* & D_{26}^* & D_{66}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \chi_x \\ \chi_y \\ \chi_{xy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Здесь $A_{ij}^*, B_{ij}^*, D_{ij}^*, i, j = 1, 2, 6$ – операторы, имеющие следующий вид:

$$A_{ij}^* \varphi = \sum_{k=1}^K (\bar{Q}_{ij}^* \varphi)_k (z_k - z_{k-1}), \quad B_{ij}^* \varphi = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K (\bar{Q}_{ij}^* \varphi)_k (z_k^2 - z_{k-1}^2),$$

$$D_{ij}^* \varphi = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^K (\bar{Q}_{ij}^* \varphi)_k (z_k^3 - z_{k-1}^3),$$

$$\bar{Q}_{11}^* \varphi = \left[Q_{11}^* \cos^4 \theta + \frac{1}{2} (Q_{12}^* + 2Q_{66}^*) \sin^2 2\theta + Q_{22}^* \sin^4 \theta \right] \varphi,$$

$$\bar{Q}_{12}^* \varphi = \left[\frac{1}{4} (Q_{11}^* + Q_{22}^* - 4Q_{66}^*) \sin^2 2\theta + Q_{12}^* \left(1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \right) \right] \varphi,$$

$$\bar{Q}_{16}^* \varphi = \left[Q_{11}^* \sin \theta \cos^3 \theta - \frac{1}{4} (Q_{12}^* + 2Q_{66}^*) \sin 4\theta - Q_{22}^* \sin^3 \theta \cos \theta \right] \varphi,$$

$$\bar{Q}_{22}^* \varphi = \left[Q_{11}^* \sin^4 \theta + \frac{1}{2} (Q_{12}^* + 2Q_{66}^*) \sin^2 2\theta + Q_{22}^* \cos^4 \theta \right] \varphi,$$

$$\bar{Q}_{26}^* \varphi = \left[Q_{11}^* \sin^3 \theta \cos \theta - \frac{1}{4} (Q_{12}^* + 2Q_{66}^*) \sin 4\theta - Q_{22}^* \sin \theta \cos^3 \theta \right] \varphi,$$

$$\bar{Q}_{66}^* \varphi = \left[\frac{1}{4} (Q_{11}^* - 2Q_{12}^* + Q_{22}^*) \sin^2 2\theta + Q_{66}^* \cos^2 2\theta \right] \varphi,$$

$$Q_{11}^* \varphi = \frac{E_1}{1 - \mu_{12}\mu_{21}} (1 - \Gamma_{11}^*) \varphi,$$

$$\begin{aligned}
Q_{12}^* \varphi &= \frac{E_1 \mu_{21}}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} (1 - \Gamma_{12}^*) \varphi = \frac{E_2 \mu_{12}}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} (1 - \Gamma_{12}^*) \varphi, \\
Q_{22}^* \varphi &= \frac{E_2}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} (1 - \Gamma_{22}^*) \varphi, \\
Q_{66}^* \varphi &= G_{12} (1 - \Gamma_{66}^*) \varphi, \\
\Gamma_{ij}^* \varphi &= \int_0^t \Gamma_{ij}(t - \tau) \varphi(\tau) d\tau, \quad i, j = 1, 2, 6
\end{aligned}$$

Здесь E_1, E_2 – модули Юнга при растяжении – сжатии; G_{12} – модули сдвига; μ_{12}, μ_{21} – коэффициенты Пуассона; Γ_{ij}^* – интегральные операторы с ядрами релаксаций $\Gamma_{ij}(t)$, K – количество слоёв оболочки, θ – угол, характеризующий направление волокон относительно оси OX .

Связь между деформациями в срединной поверхности $\varepsilon_x^0, \varepsilon_y^0, \gamma_{xy}^0, \chi_x, \chi_y, \chi_{xy}$ и перемещениями u, v, w по направлениям x, y, z примем в виде:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x^0 &= \frac{\partial u}{\partial x} - k_x w + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2, & \varepsilon_y^0 &= \frac{\partial v}{\partial y} - k_y w + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2, \\
\gamma_{xy}^0 &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y}, \\
\chi_x &= -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, & \chi_y &= -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, & \chi_{xy} &= -2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}
\end{aligned} \tag{2}$$

где k_x и k_y – кривизны срединной поверхности оболочки.

Подставляя (1) и (2) в уравнения движения:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + p_x &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, & \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} + p_y &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \\
\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial^2 H}{\partial x \partial y} + k_x N_x + k_y N_y + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial w}{\partial x} + T \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \\
+ \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial w}{\partial x} + N_y \frac{\partial w}{\partial y} \right) + q &= \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}
\end{aligned}$$

получим систему нелинейных интегро-дифференциальных уравнений в частных производных, описывающая математическую модель задачи по классической теории Кирхгофа-Лява.

Однако в последнее время среди ученого сообщества высказываются мнения, что при построении математических моделей, описывающих динамическое поведение слоистых анизотропных армированных оболочек предпочтительнее использовать теории оболочек, учитывающие помимо обычных деформаций сдвиговые деформации. С этой целью в данной диссертационной работе также была построена математическая модель задачи динамики вязкоупругих слоистых анизотропных армированных оболочек по уточненной теории Тимошенко.

Согласно теории Тимошенко нормальные и касательные усилия, изгибающие и крутящие моменты, а также поперечные силы определяются из соотношений:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ T \\ M_x \\ M_y \\ H \\ Q_x \\ Q_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}^* & A_{12}^* & A_{16}^* & B_{11}^* & B_{12}^* & B_{16}^* & 0 & 0 \\ A_{12}^* & A_{22}^* & A_{26}^* & B_{12}^* & B_{22}^* & B_{26}^* & 0 & 0 \\ A_{16}^* & A_{26}^* & A_{66}^* & B_{16}^* & B_{26}^* & B_{66}^* & 0 & 0 \\ B_{11}^* & B_{12}^* & B_{16}^* & D_{11}^* & D_{12}^* & D_{16}^* & 0 & 0 \\ B_{12}^* & B_{22}^* & B_{26}^* & D_{12}^* & D_{22}^* & D_{26}^* & 0 & 0 \\ B_{16}^* & B_{26}^* & B_{66}^* & D_{16}^* & D_{26}^* & D_{66}^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{44}^* & A_{45}^* \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{45}^* & A_{55}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \frac{\partial \psi_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \psi_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \psi_x}{\partial y} + \frac{\partial \psi_y}{\partial x} \\ \frac{\partial w}{\partial y} + \psi_y \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \psi_x \end{bmatrix} \quad (3)$$

где $A_{ij}^*, B_{ij}^*, D_{ij}^*$ – операторы, имеющие следующий вид:

$$A_{ij}^* \varphi = \sum_{k=1}^K (\bar{Q}_{ij}^* \varphi)_k (z_k - z_{k-1}), B_{ij}^* \varphi = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K (\bar{Q}_{ij}^* \varphi)_k (z_k^2 - z_{k-1}^2),$$

$$D_{ij}^* \varphi = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^K (\bar{Q}_{ij}^* \varphi)_k (z_k^3 - z_{k-1}^3), i, j = 1, 2, 6,$$

$$A_{ij}^* \varphi = K_s \sum_{k=1}^K (\bar{Q}_{ij}^* \varphi)_k (z_k - z_{k-1}), i, j = 4, 5,$$

$$\bar{Q}_{44}^* = (Q_{44}^* \cos^2 \theta + Q_{55}^* \sin^2 \theta) \varphi,$$

$$\bar{Q}_{45}^* = [(Q_{55}^* - Q_{44}^*) \cos \theta \sin \theta] \varphi, \quad \bar{Q}_{55}^* = (Q_{55}^* \cos^2 \theta + Q_{44}^* \sin^2 \theta) \varphi,$$

$$\bar{Q}_{44}^* \varphi = G_{23} (1 - \Gamma_{44}^*) \varphi, \quad \bar{Q}_{55}^* \varphi = G_{13} (1 - \Gamma_{55}^*) \varphi,$$

Значение коэффициента сдвига K_s зависит от вида функции $f(z)$, характеризующая закон распределения напряжений τ_{xz} и τ_{yz} по толщине оболочки. В расчетах значения коэффициента сдвига принимались равной 5/6. Именно такую величину принимает для K_s в уточненной теории пластинок С.А. Амбарцумян и Э. Рейсснер. В работах С.П. Тимошенко приняты значения 2/3 и 8/9.

Подставляя (3) в уравнения движения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + p_x &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} + p_y = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + k_x N_x + k_y N_y + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial w}{\partial x} + T \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial w}{\partial x} + N_y \frac{\partial w}{\partial y} \right) + q = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial y} - Q_x = \frac{\rho h^2}{12} \frac{\partial^2 \psi_x}{\partial t^2}, \quad \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial M_y}{\partial y} - Q_y = \frac{\rho h^2}{12} \frac{\partial^2 \psi_y}{\partial t^2}$$

получаем систему нелинейных интегро-дифференциальных уравнений в частных производных, описывающая математические модели задач динамики слоистых армированных оболочек из композиционных материалов по уточненной теории Тимошенко.

В расчетах, в качестве ядер релаксации пользовались простейшими и в то же время достаточно общими слабо-сингулярными ядрами Колтунова-Ржаницына вида:

$$\Gamma_{ij}(t) = A_{ij} e^{-\beta_{ij} t} t^{\alpha_{ij}-1}, \quad 0 < \alpha_{ij} < 1, \quad i, j = 1, 2, 6, \quad (4)$$

где $A_{ij}, \beta_{ij}, \alpha_{ij}$ – реологические параметры вязкости, определяемые из экспериментов.

Для определения реологических параметров вязкости материалов при различных направлениях армированных волокон воспользуемся результатами экспериментов, приведенных в работе И.М.Тюнеевой. В работе автором на основе экспериментов были получены реологические параметры вязкости некоторых армированных стеклопластиков, таких как *Текстолит*, *КАСТ-В*, *СВАМ* и *ЭДФ*. Приведенные в работе параметры соответствуют образцам лишь с направлениями армированных волокон в 0, 45 и 90 градусов относительно оси *OX*. В данной диссертационной работе значения реологических параметров вязкости для образцов с произвольным направлением волокон были получены из экспериментальных результатов путем использования интерполяционных формул. В табл. 1 приведены реологические параметры вязкости A для двух видов стеклопластиков (*КАСТ-В* и *ЭДФ*), полученные с использованием интерполяционных формул.

Таблица 1

Значения реологического параметра вязкости A при различных значениях угла направления армированных волокон

Стекло-пластик	Направления волокон						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
<i>КАСТ-В</i>	0.0099	0.0159	0.0195	0.0208	0.0197	0.0162	0.0104
<i>ЭДФ</i>	0.0016	0.0043	0.006	0.0067	0.0064	0.0051	0.0028

Как и в работе И.М.Тюнеевой, значения реологического параметра α примем постоянной вне зависимости от направления волокон. Значения же реологического параметра β настолько малы, что их эффектами можно пренебречь.

Выведенные во второй главе системы нелинейных интегро-дифференциальных уравнений в частных производных с помощью процедуры Бубнова-Галеркина сводятся к решению систем нелинейных обыкновенных интегро-дифференциальных уравнений со слабо-сингулярными ядрами релаксации, которые приводятся в первой и второй

параграфах третьей главы под названием “Разрешающие уравнения задач динамики вязкоупругих слоистых армированных конструкций”.

Наличие незначительного количества научной литературы, посвященной исследованию динамики вязкоупругих систем со слабо-сингулярными ядрами релаксации объясняется наличием в ней особенностей в момент времени $t = 0$. В диссертационной работе дан и описан численный метод, основанный на использовании квадратурных формул, позволяющий решать системы нелинейных интегро-дифференциальных уравнений, предварительно трансформировав сингулярные ядра в регулярные. Для оценки точности выбранного метода была решена тестовая задача. В нижеприведенной таблице даны численные значения точного и приближенного решения тестовой задачи. Как видно из результатов, погрешность описанного метода совпадает с погрешностью использованных квадратурных формул и имеет тот же порядок малости относительно шага интерполяции (табл. 2).

Таблица 2

Результаты тестовой задачи

t	Решение		$\Delta, \%$
	<i>Точное</i>	<i>Приближенное</i>	
0.0	1.000000000	1.000000000	-
0.01	0.997303642	0.998929533	0.296
0.02	0.994614554	0.997560123	0.397
0.03	0.991932717	0.995866611	0.462
0.04	0.989258111	0.993831608	0.491
0.05	0.986590716	0.991439562	0.482
0.06	0.983930514	0.988675329	0.433
0.07	0.981277485	0.985522169	0.340
0.08	0.978631609	0.981957961	0.200
0.09	0.975992868	0.977947442	0.004
0.10	0.973361242	0.973403577	0.004

Четвертая глава диссертации - “Статика армированных пластин” - посвящена исследованию изгибов анизотропных армированных четырехугольных пластин различной геометрической конфигурации, в каждом из которых одна сторона жестко закреплена, а остальные стороны свободны (консольная пластина). Подобные исследования очень актуальны в современном авиастроении.

В начале рассматривается задача об изгибе анизотропной армированной прямоугольной консольной пластины (рис.1), подвергнутую поперечной нагрузке $q = q(x, y)$.

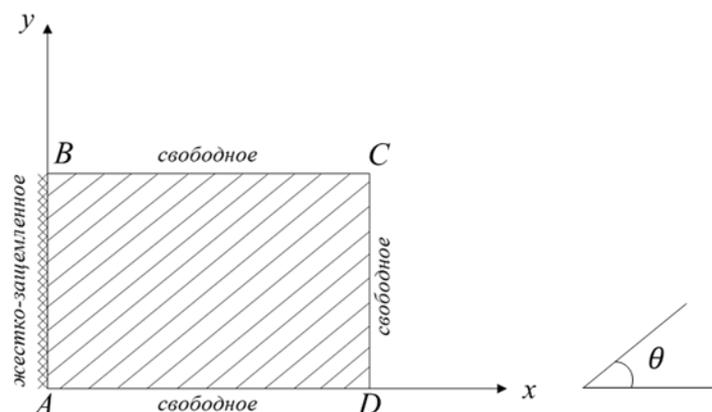


Рис. 1. Геометрия анизотропной прямоугольной консольной пластины, армированной волокнами под углом θ градусов

С целью проверки точности полученных результатов, проведено сравнение их с результатами, рассчитанными с использованием метода конечных элементов. В качестве программного средства использован комплекс ABAQUS. Максимальное значение прогиба квадратной пластины с направлением армированных волокон под углом в 45° , полученные с использованием различных методов, приведено в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение результатов, полученных с использованием различных методов при равномерной нагрузке $q = const$ (Материал: Углеродно-эпоксидная смола, направление волокон 45°)*

Объект	Механические свойства материалов				w_{max} (м)	разница, в %
	E_1 , ГПа	E_2 , ГПа	ν_{12}	G_{12} , ГПа		
Анизотропная пластина (ABAQUS)	181	10.3	0.28	7.17	$6.559 \cdot 10^{-3}$	-
Анизотропная пластина (Delphi) $M=N=4$	181	10.3	0.28	7.17	$6.237 \cdot 10^{-3}$	-4.909
Анизотропная пластина (Delphi) $M=N=8$	181	10.3	0.28	7.17	$6.377 \cdot 10^{-3}$	-2.775
Анизотропная пластина (Delphi) $M=N=12$	181	10.3	0.28	7.17	$6.378 \cdot 10^{-3}$	-2.761

*Расчет балки не приведен, поскольку присутствует скручивание.

Анализ полученных результатов показал, что для анизотропной пластины с направлением волокон под углом 45° наибольшая разница между полученными результатами составляет 4.91%. Сходимость решения в этом случае медленнее, чем в ортотропном (направление волокон в 0 и 90°). Чтобы получить более точные результаты, необходимо использовать в разложении не менее 64 членов ($M = N = 8$). В этом случае разница составляет 2.78%.

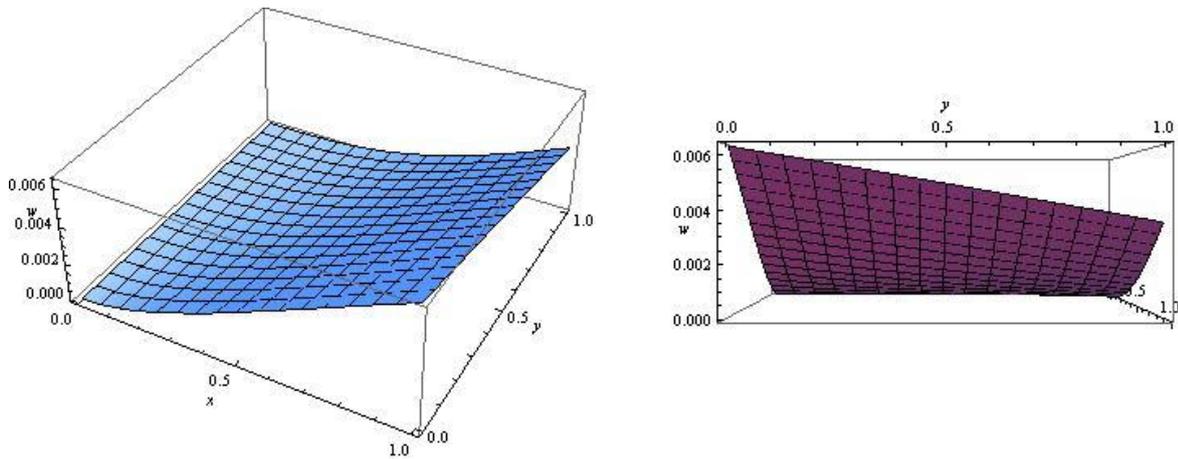
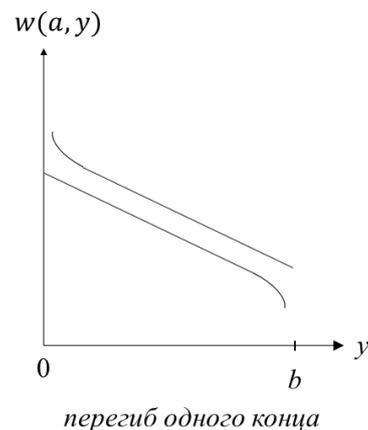
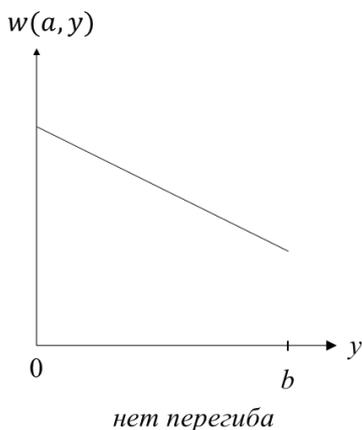


Рис. 2. Изгиб анизотропной квадратной армированной консольной пластины под действием поперечной нагрузки $q = const$ (направление армированных волокон 45°)

Исследовано влияние направления армированных волокон на изгиб квадратной консольной пластины. Как и следовало ожидать, в случаях ортотропных пластин кромка пластины, находящаяся напротив жестко защемленной стороны, не скручивается. В этих случаях значения отклонений одинаковы для каждой точки вдоль линий на пересечениях пластины с плоскостью $x = const$. В отличие от ортотропных пластин, в анизотропных пластинах на кромке, находящейся напротив жестко защемленной стороны, наблюдается скручивание (рис. 2). Здесь значения прогибов не совпадают в точках пересечения пластины с плоскостью $x = const$. Более того, результаты показывают, что ребро $x = a$, расположенное напротив зажатого края, имеет форму прямой линии. Это означает, что пластина не имеет “перегиба”, схема которого показана на рис. 3.

Классификация перегибов кромки $x = a$, расположенной напротив жестко защемленной стороны пластины



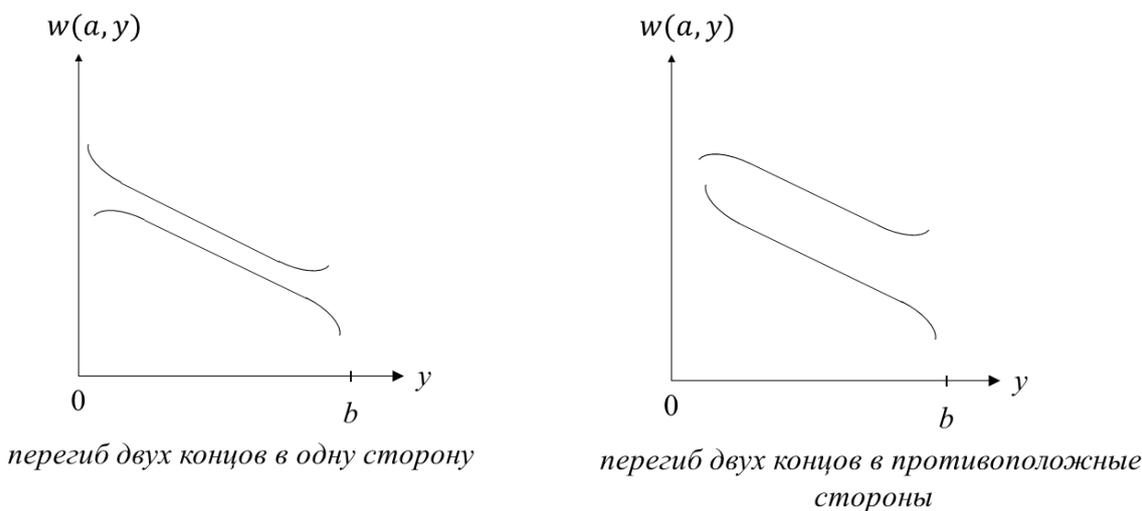


Рис. 3. Различные формы перегибов

Кромки при перегибе могут перемещаться в одном и том же или в противоположных направлениях. Перегиб связан с выпуклостью, которая описывает изгибы верхней и нижней поверхностей профиля.

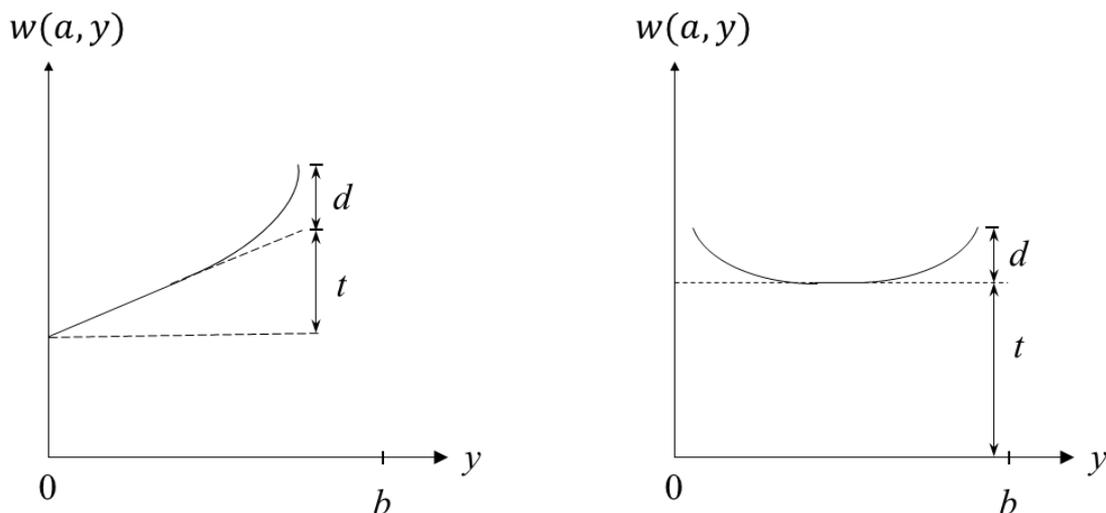


Рис. 4. Определители показателя перегиба

Так как перегиб может быть незначительным, чтобы повлиять к примеру на поведение пластины в потоке газа необходимо ввести определенный критерий. Будем предполагать, что кромка, расположенная напротив зажатой стороны пластинки, имеет перегиб только в том случае, если значение d/t превышает 2%.

Характеристики скручивания и перегиба анизотропной и изотропной квадратных пластин при различных нагрузках представлены в табл. 4. В последнем столбце таблицы можно найти значения наклонов $\partial w / \partial y$ кривой в точке $x = a, y = b/2$. Эта точка является центром кромки, расположенной напротив зажатой кромки ($x = a, y \in (0, b)$).

Скручивание и перегиб
анизотропной и изотропной квадратных армированных консольных пластин

Направление армированных волокон	Размеры пластины	Нагрузка	Скручивание/ перегиб	Коэффициент перегиба f	$w(a, b/2)$, м	$\frac{\partial w}{\partial y}(a, b/2)$
0^0	$a=1$ м, $b=1$ м	$q=const$	нет/нет	-	$8.21 \cdot 10^{-4}$	0
90^0			нет/нет	-	$14.52 \cdot 10^{-3}$	0
45^0			да/нет	-	$4.985 \cdot 10^{-3}$	$-2.78 \cdot 10^{-3}$
-45^0			да/нет	-	$4.985 \cdot 10^{-3}$	$2.78 \cdot 10^{-3}$
0^0		$q = q_0(1 - 2y/b)$	да/да (два конца в противоположных направлениях)	0.085	0	$-1.07 \cdot 10^{-3}$
90^0			да/нет	-	0	$-2.486 \cdot 10^{-3}$
45^0			да/да (один конец)	0.092	$8.31 \cdot 10^{-4}$	$-1.426 \cdot 10^{-3}$
-45^0			да/да (один конец)	0.084	$-8.31 \cdot 10^{-4}$	$-1.426 \cdot 10^{-3}$
Изотропный (Алюминий)			да/нет	-	0	$-0.635 \cdot 10^{-3}$

Далее были исследованы задачи об изгибе четырехугольных анизотропных армированных консольных пластин крыловидной (не прямоугольной) конфигурации. Для решения этих задач воспользовались комплексом ABAQUS, поскольку аппроксимирующие функции удовлетворяющие граничным условиям задачи для методов аппроксимации, таких как Бубнов-Галеркин или Ритц, нелегко найти для непрямоугольных пластин. Отметим, что в общем случае пластины с различной геометрической конфигурацией можно исследовать методом Рвачева.

Таблица 5

Максимальные значения прогибов трапецевидных анизотропных армированных консольных пластин, изготовленных из различных видов композиционных материалов

Материал	E_1 , ГПа	E_2 , ГПа	E_1/E_2	G_{12} , ГПа	w_{max}		
					0^0	45^0	90^0
Эпоксидный стеклопластик	38.6	8.27	4.67	4.14	$3.505 \cdot 10^{-3}$	$10.68 \cdot 10^{-3}$	$14.26 \cdot 10^{-3}$
Углеродный эпоксид повышенной прочности	145	9	16.11	4.5	$1.065 \cdot 10^{-3}$	$7.860 \cdot 10^{-3}$	$13.19 \cdot 10^{-3}$
Высокомодульный углеродный эпоксид	181	10.3	17.57	7.17	$0.828 \cdot 10^{-3}$	$6.159 \cdot 10^{-3}$	$11.26 \cdot 10^{-3}$
Эпоксидный боропластик	204	18.5	11.03	5.59	$0.775 \cdot 10^{-3}$	$4.704 \cdot 10^{-3}$	$6.696 \cdot 10^{-3}$

Сначала рассматривается задача об изгибе анизотропной армированной трапециевидной консольной пластины. Значения максимальных прогибов трапециевидных анизотропных пластин, изготовленных из различных композиционных материалов, представлены в табл. 5.

Поведение анизотропных трапециевидных крыловидных пластин при равномерной поперечной нагрузке представлено на рис. 5.

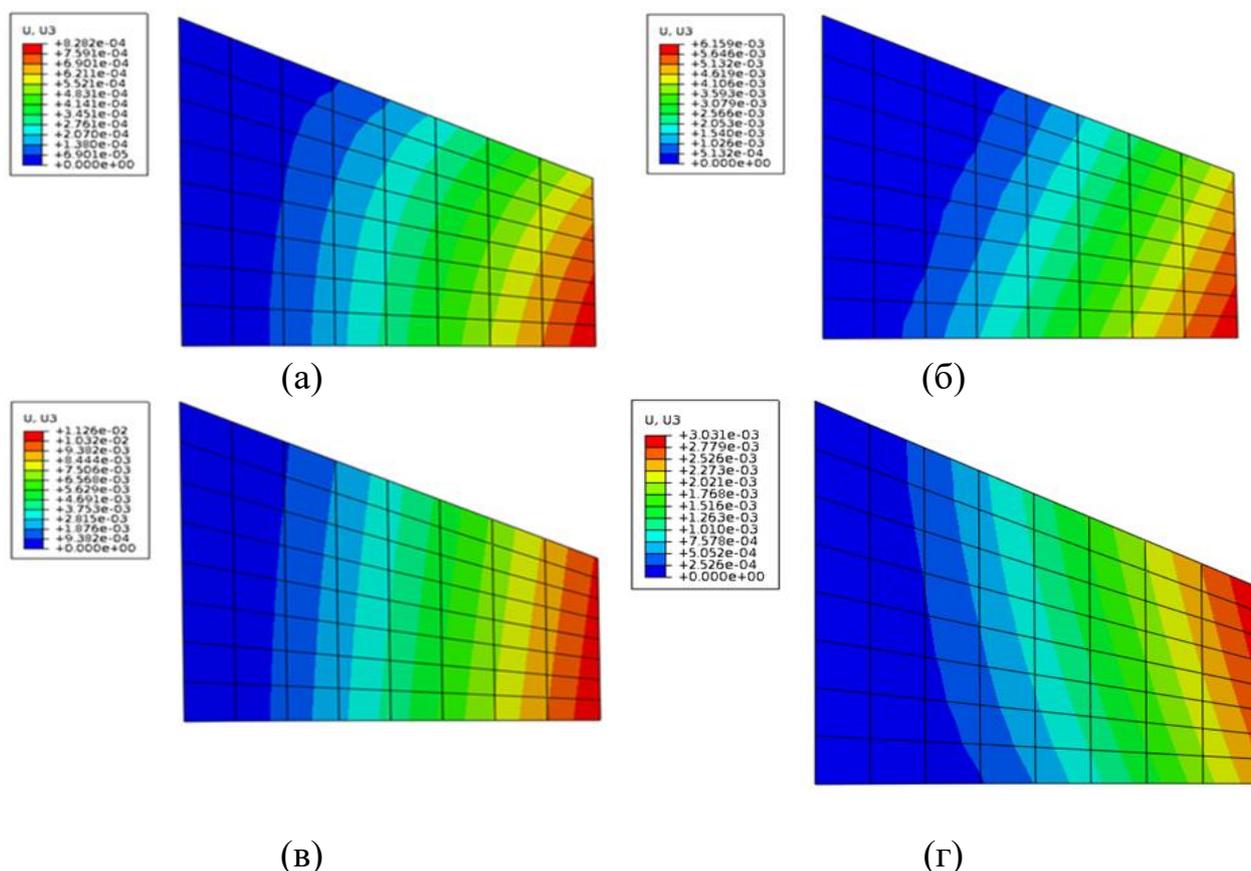


Рис. 5. Изгиб трапециевидных анизотропных армированных консольных пластин. Материал: углеродный эпоксид, направление волокон: а) 0° ; б) 45° ; в) 90° ; г) -45°

Вместе с этим в этой главе были исследованы изгиб консольных пластин в форме параллелограмма и крыла бабочки.

Пятая глава под названием “Расчет нелинейных колебаний и динамической устойчивости вязкоупругих слоистых армированных пластин и оболочек” посвящена исследованию динамического поведения вязкоупругой анизотропной армированной прямоугольной пластины под действием различных внешних нагрузок.

Первый параграф пятой главы посвящен исследованию колебания вязкоупругой анизотропной армированной шарнирно опертой пластины под действием поперечной статической нагрузки q .

На рис. 6 исследовано влияние вязкоупругих свойств материала на поведение анизотропной армированной пластины. Здесь кривая 1 представляет результат упругой задачи ($A = 0$), кривая 2 – вязкоупругой.

Процесс колебания пластины, рассматриваемая в вязкоупругой постановке, представляет собой затухающий со временем процесс со сдвигом фаз вправо, в то время как в упругой постановке амплитуда колебания со временем не меняется, а сам процесс выглядит как идеальное гармоническое колебание. Используемые *КАСТ-В* ($A = 0.0208$) и *ЭДФ* ($A = 0.0067$) представляют собой материалы, обладающие разными вязкоупругими свойствами. Затухание колебаний вязкоупругой пластины из *КАСТ-В* (рис. 6), обладающее более выраженными вязкими свойствами, происходит интенсивнее, чем пластины из *ЭДФ*.

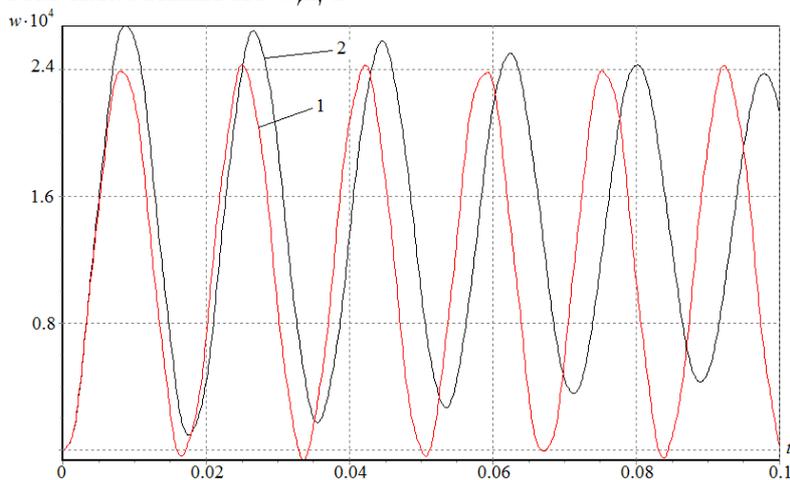


Рис. 6. Влияние вязкоупругих свойств материала на поведение армированной пластины из *КАСТ-В*
(1 – упругая задача, 2 – вязкоупругая задача)

На рис. 7 изображены изменения прогибов срединных точек вязкоупругих пластин при различных направлениях (1 – 0° ; 2 – 15° ; 3 – 30° ; 4 – 45°) армированных волокон. По мере увеличения угла направления волокон в пределах от 0° до 45° наблюдается уменьшение значений прогибов.

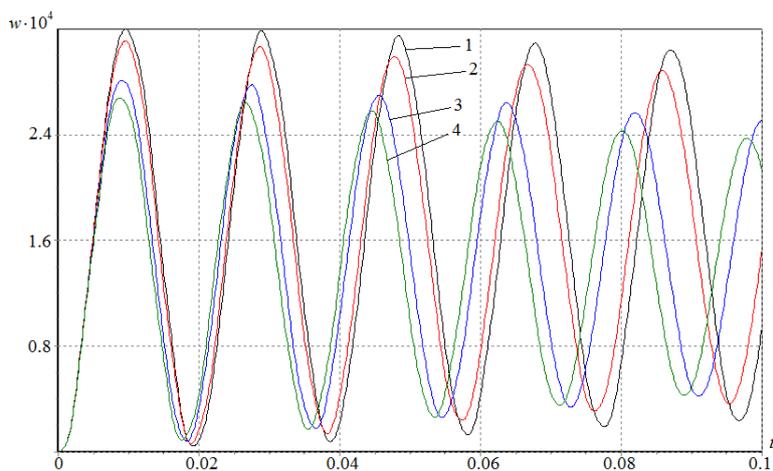


Рис. 7. Изменения прогибов срединной точки вязкоупругой анизотропной пластин при различных направлениях армированных волокон
(1 – 0° ; 2 – 15° ; 3 – 30° ; 4 – 45°)

Кроме этого, исследованы влияния изменения различных геометрических и физико-механических параметров армированной пластины.

Современные армированные композиты представляют собой набор из нескольких армированных слоёв, каждая из которых, имеет свойственные ей механические свойства. Таким образом, меняя структуру композита возможно создавать конструкции, поведение которых можно спрогнозировать заранее в зависимости от различных факторов (нагрузок, температур, влажности и др.). В связи с этим исследование поведения слоистых армированных пластин с различными направлениями волокон имеет особый интерес.

На рис.8 приведены изменения прогибов срединных точек вязкоупругих слоистых армированных пластин, изготовленных из *КАСТ-В*. Первая кривая, соответствует случаю однослойной пластины с направлением волокон в 45° относительно оси *OX*. Вторая кривая соответствует случаю двухслойной пластины, первый слой которой, имеет волокна с направлением 0° , а второй слой с направлением 90° относительно оси *OX*. Третья кривая – почти совпадающая с первой кривой, представляет собой двухслойную пластину, волокна которой, имеют направления в 45° и -45° соответственно. Причем все эти пластины имеют одинаковую толщину. Результаты показывают, что у слоистых пластин с волокнами, расположенными параллельно и перпендикулярно оси *OX* значения прогиба больше, чем у других пластин с аналогичными механическими свойствами.

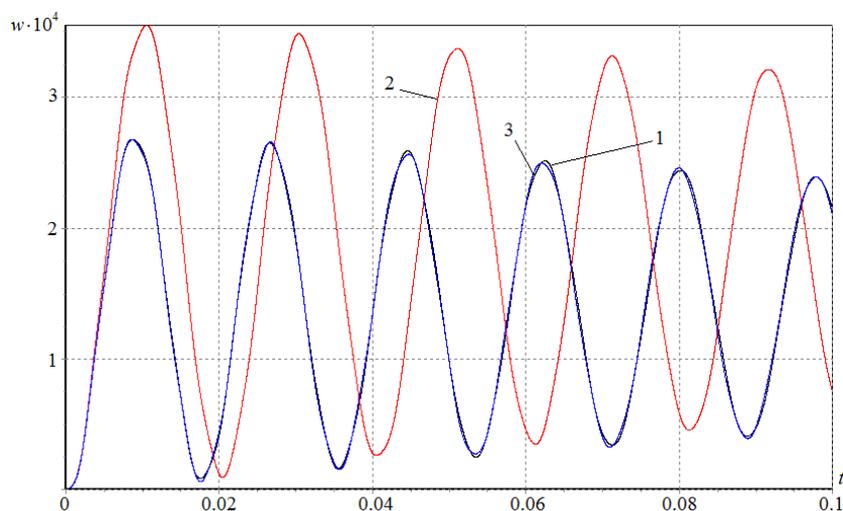


Рис. 8. Изменения прогибов срединных точек вязкоупругих слоистых армированных пластин (1 – однослойная пластина, армированная волокнами под углом в 45° ; 2 – двухслойная пластина, армированная волокнами в 0° в первом слое и 90° во втором; 3 – двухслойная пластина, армированная волокнами в 45° в первом слое и -45° во втором слое.

Исследованию выпучивания вязкоупругой анизотропной армированной пластины при быстро возрастающих сжимающих нагрузках посвящен второй параграф пятой главы.

Рассмотрим вязкоупругую прямоугольную армированную пластину со сторонами a и b , сжатую в одном направлении вдоль стороны a . Примем, что усилия сжатия возрастают пропорционально времени по закону $P(t) = P_0 \cdot t$ (P_0 – скорость нагружения).

Как и в предыдущем случае, здесь приводятся исследования влияния вязкоупругих свойств материала на поведение армированных пластин, изготовленных из стеклопластиков *КАСТ-В* и *ЭДФ*. В целом, *КАСТ-В* и *ЭДФ* – материалы, обладающие различными вязкоупругими свойствами. Как следует из приведенных на рис. 9 графиков, учет вязкоупругих свойств материала конструкции приводит к уменьшению критического времени. Особенно это заметно в пластинах из *КАСТ-В* ($A = 0.0208$), которые обладают более вязкими свойствами, чем *ЭДФ* ($A = 0.0067$). Разница в значениях критического времени для пластин из упругого и вязкоупругого *КАСТ-В* достигает 21%, тогда как для пластин из *ЭДФ* эта разница составляет 2.4%. Из этого следует, что при решении таких типов задач крайне важно учитывать вязкоупругие свойства материала конструкции.

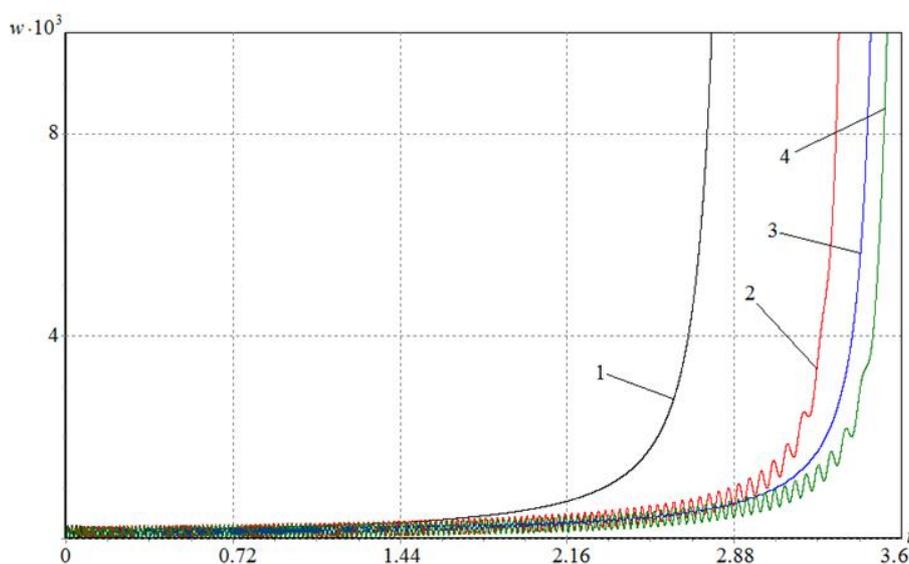
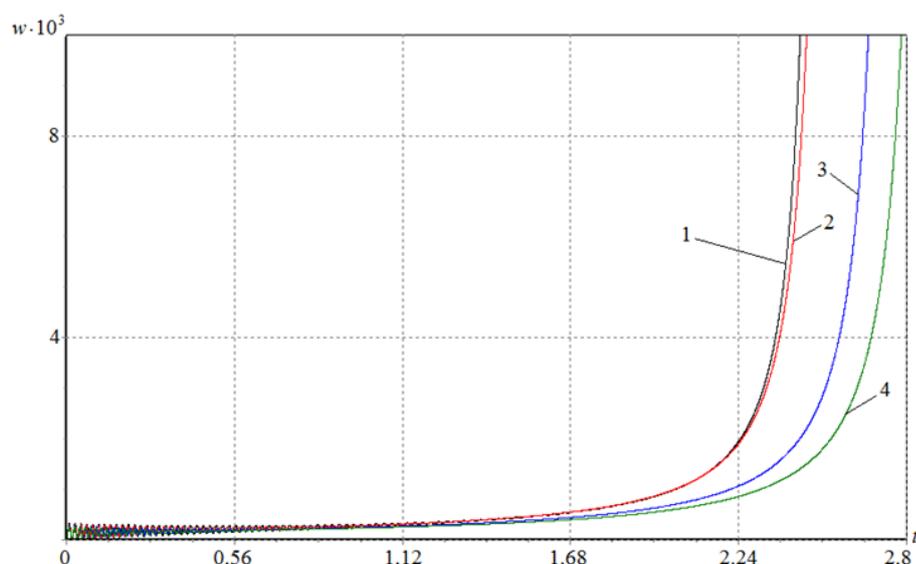


Рис. 9. Влияние вязкоупругих свойств материала конструкции на поведение армированной пластины из *КАСТ-В* (1 – вязкоупругий, 2 – упругий) и *ЭДФ* (3 – вязкоупругий, 4 – упругий)

В композитных материалах ориентация волокон может сильно повлиять на прочность элементов конструкции. Ориентация волокон обеспечивает макроскопическую жесткость и прочность, что играет жизненно важную роль в улучшении механических свойств элементов конструкции. Поэтому вопрос влияния изменений направления волокон армированной пластины на динамический процесс является актуальной.

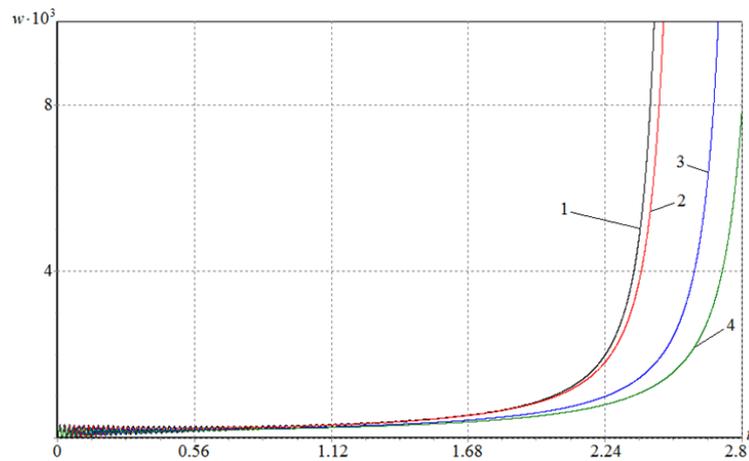


**Рис. 10. Зависимость прогиба от времени для пластин с различными направлениями армированных волокон:
1 – 0°; 2 – 15°; 3 – 30°; 4 – 45°**

На рис.10 показано, что по мере увеличения угла направления волокон от 0° до 45° наблюдается увеличение критического времени. Это означает, что среди всех однослойных армированных пластин из *КАСТ-В* наиболее устойчивой является пластина с направлением волокон в 45°. Разница между значениями критического времени для однослойных пластин с направлением волокон от 0° до 45° составляет 12%.

Как упоминалось ранее, армированные композиты представляют собой набор из нескольких армированных слоев, каждая из которых обладает свойственными ей механическими свойствами. Таким образом, изменяя структуру композита, можно создавать конструкции, поведение которых можно предсказать заранее.

В связи с этим особый интерес представляет исследование поведения многослойных армированных пластин с различным направлением волокон в них под воздействием осевого сжатия. На рис. 11 показаны изменения прогибов срединных точек многослойных армированных пластин, изготовленных из *КАСТ-В*. Более того, хотя все эти пластины имеют разные направления волокон, их толщина одинакова. Результаты показывают, что для двухслойных пластин с волокнами, расположенными под углом -45° относительно оси *OX* в одном слое и 45° в другом, значения критического времени выше, чем для других. Слоистая волокнистая пластина, параллельная и перпендикулярная оси *OX*, имеет меньшее критическое время (т.е. она менее стабильна), чем другие пластины с аналогичными механическими свойствами. Разница между значениями критического времени для вышеуказанных двухслойных пластин составляет 13.3 %.



**Рис. 11. Зависимость прогиба от времени двухслойных пластин с различными направлениями армированных волокон:
1 – 0°/90°; 2 – 15°/-15°; 3 – 30°/-30°; 4 – 45°/-45°**

Результаты исследований поведения армированных пластин при широком диапазоне изменения их механических, физических и геометрических параметров при динамическом сжатии одной из их сторон приведены в табл. 7.

Таблица 7

Значения критического времени в зависимости от различных геометрических и физико-механических параметров пластины.

№	Геометрические параметры пластины			Физические параметры		Количество слоев	Направление волокон	Значения критического времени		
	<i>a, м</i>	<i>b, м</i>	<i>h, см</i>	<i>q, Па</i>	<i>P₀, МПа/с</i>			Упругая задача	Вязко-упругая задача	разница (в %)
1	0.5	0.5	0.5	100	2	1	45 ⁰	3.2798	2.7117	21
2	0.6	0.5	0.5	100	2	1	45 ⁰	3.3358	2.7338	22
3	0.7	0.5	0.5	100	2	1	45 ⁰	3.5262	2.8604	23.3
4	0.5	0.5	0.4	100	2	1	45 ⁰	2.0238	1.6522	22.5
5	0.5	0.5	0.3	100	2	1	45 ⁰	0.9192	0.7680	19.7
6	0.5	0.5	0.5	200	2	1	45 ⁰	3.2110	2.5986	23.6
7	0.5	0.5	0.5	300	2	1	45 ⁰	3.1422	2.4982	25.8
8	0.5	0.5	0.5	100	2.5	1	45 ⁰	2.6268	2.1806	20.5
9	0.5	0.5	0.5	100	3	1	45 ⁰	2.1858	1.8248	19.8
10	0.5	0.5	0.5	100	2	1	0 ⁰	2.5984	2.3884	8.8
11	0.5	0.5	0.5	100	2	1	15 ⁰	2.7640	2.4038	15
12	0.5	0.5	0.5	100	2	1	30 ⁰	3.1046	2.6044	19.2
13	0.5	0.5	0.5	100	2	2	0°/90°	2.5984	2.3830	9
14	0.5	0.5	0.5	100	2	2	15°/-15°	2.7860	2.4152	15.4
15	0.5	0.5	0.5	100	2	2	30°/-30°	3.1396	2.6344	19.2
16	0.5	0.5	0.5	100	2	2	45°/-45°	3.3242	2.7496	20.9
17	0.5	0.5	0.5	100	2	3	45°/-45°/45°	3.2900	2.7168	21.1

Анализ численных результатов, приведенных в таблице, показывает, что учет вязкоупругих свойств конструкционных материалов приводит к значительному снижению значения критического времени. В некоторых случаях различия в результатах, полученных при решении упругой и вязкоупругой задач, отличаются друг от друга более чем на 20%. Также показано, что направление волокон в структурах также существенно влияет на величину критического времени. Например, в двухслойных пластинах, волокна которых имеют направления под углом 45° и -45° , значения критического времени больше, чем в однослойной пластине той же толщины, волокна которой расположены под углом в 45° . Это означает, что, изменяя структуру композитного материала, можно создавать конструкции, более устойчивые к тем или иным динамическим и статическим нагрузкам.

В третьем параграфе пятой главы рассматривается задача о динамической устойчивости вязкоупругой анизотропной армированной пластины при динамическом сдвиге. Примем, что сдвиговые усилия возрастают пропорционально времени по закону $P(t) = P_0 \cdot t$ (P_0 – скорость нагружения).

Для начала, с целью обоснования точности полученных результатов была исследована сходимость метода Бубнова-Галеркина (рис. 12). Результаты, приведенные ниже, были получены на основе одночленной и многочленной аппроксимаций. Из рисунка видно, что при вычислении прогиба достаточно в аппроксимирующей функции удержания четырех первых гармоник ($M = N = 2$). Дальнейшее увеличение количества членов не оказывает существенного влияния на динамический процесс.

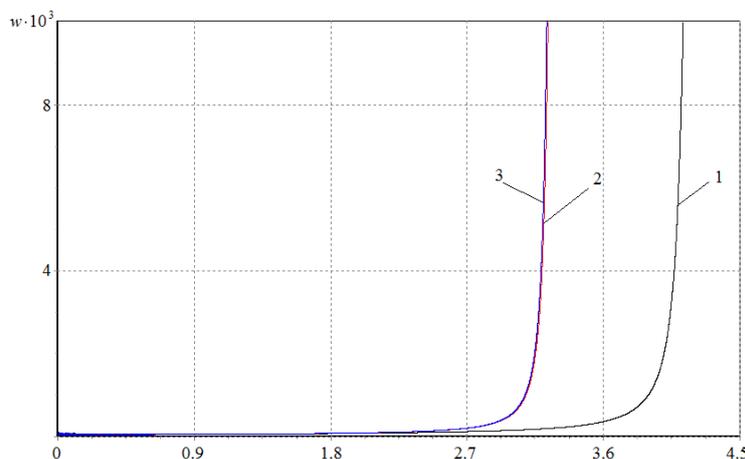


Рис. 12. Сходимость метода Бубнова-Галеркина
(1 - $M = N = 1$, 2 - $M = N = 2$, 3 - $M = N = 3$)

Рис. 13а и 13б иллюстрируют форму деформируемой жестко защемленной пластины при воздействии сдвиговых усилий. Заметим, что при таких нагрузках на пластине появляются области, как с положительными, так и с отрицательными прогибами. Здесь необходимо отметить, что линии соприкосновения этих областей - узловые линии или линии нулевого отклонения не возникают при равномерных сжимающих нагрузках анизотропных пластин.

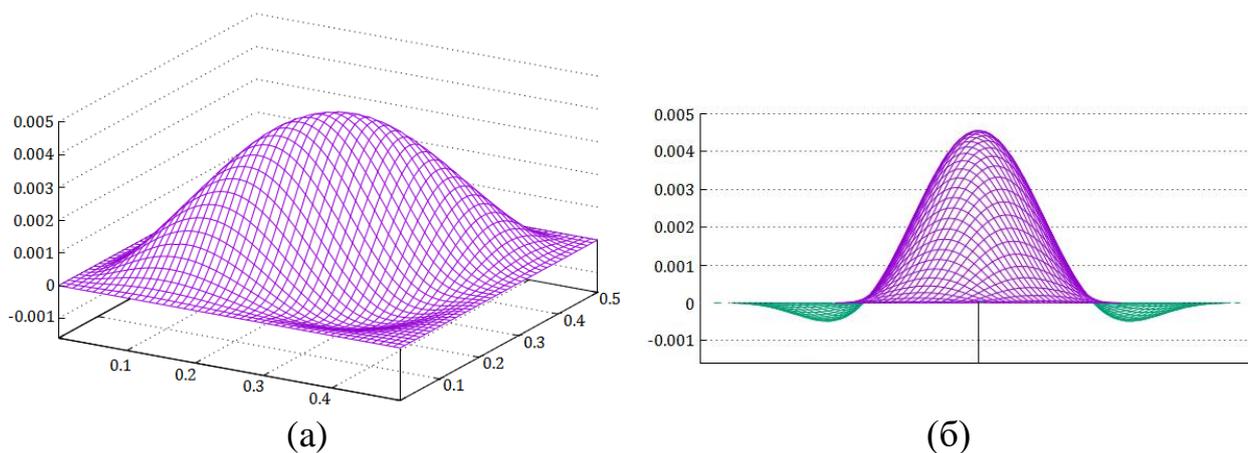


Рис. 13. Изогнутая форма деформируемой пластины

При решении задач об устойчивости пластин под воздействием сжимающих динамических нагрузок в качестве критерия, определяющего критическое время и критическую нагрузку, в большинстве случаев принимается условие, что стрела прогиба не должна превышать величину, равную толщине пластины. При таких деформациях пластины, области с отрицательными прогибами отсутствуют.

В работе, из-за наличия в деформируемой пластине как областей с положительными, так и с отрицательными прогибами, при расчетах, будем считать критическую динамическую нагрузку достигнутой в тот момент, когда разница между значениями прогибов в самой верхней и самой нижней точке (здесь и далее – критические точки) пластины достигает величины, равной её толщине. Здесь необходимо отметить, что в отличие от местоположения самой верхней точки пластины (оно неизменно будет находиться на пересечении диагоналей – срединной точке) местоположение самой нижней точки будет меняться в зависимости от изменения физических и геометрических параметров пластины.

Влияние вязкоупругих свойств материала на поведение армированной пластины проиллюстрировано на рис. 14. Здесь кривые 1 и 2 представляют результаты вязкоупругой задачи, кривые 3 и 4 – упругой ($A = 0$). Из рисунков видно, что учет вязкоупругих свойств материала конструкции приводит к уменьшению критического времени. Разница в значениях критического времени для упругих и вязкоупругих пластин, в зависимости от изменения геометрических и физических параметров пластины, достигает более 15%. Также видно, что армированная пластина из ЭДФ ($A = 0.0067$) более устойчива к воздействию сдвиговых усилий по сравнению с армированной пластиной из КАСТ-В ($A = 0.0208$) (рис. 14). Это объясняется тем, что вторая обладает более вязкими свойствами по сравнению с первым.

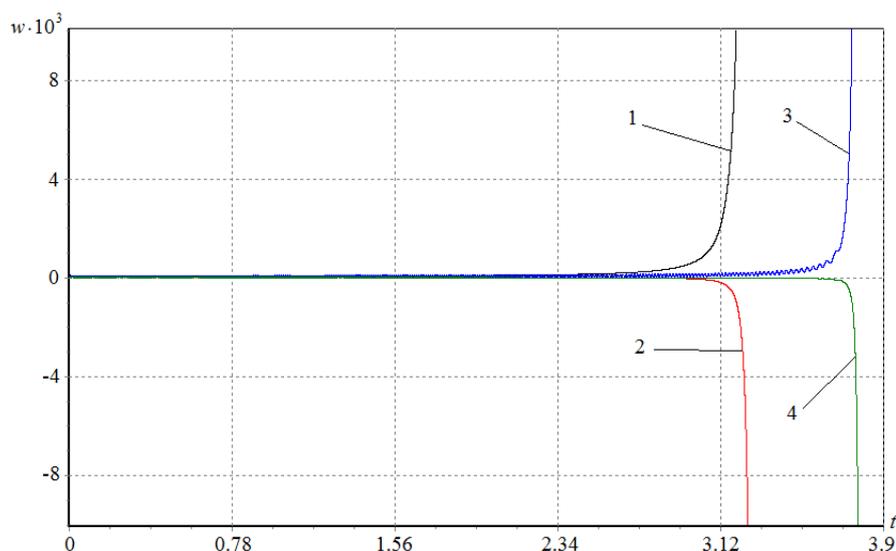


Рис. 14. Изменение прогибов пластины из *КАСТ-В* в критических точках.

Далее приведены численные результаты значений критического времени анизотропной армированной пластины из *КАСТ-В* при воздействии на нее динамических быстро возрастающих сдвиговых нагрузок (табл. 8). Эти результаты были получены при широком диапазоне изменения её геометрических и физических параметров. При этом приведенные в таблице значения являются результатами как упругой, так и вязкоупругой задач.

Как упоминалось ранее, учет вязкоупругих свойств материала конструкции значительно влияет на численные результаты. Особенно это ощутимо при воздействии на анизотропную пластину помимо сдвиговых нагрузок внешней статической нагрузки q .

Современные слоистые композиты, представляющие собой чередование армирующих слоев, каждая и которых отличается друг от друга механическими свойствами, в последнее время успешно применяются во многих отраслях промышленности. Они позволяют значительно снизить вес конструкции, увеличить КПД двигателей, а также создавать новые конструкции, обладающие высокой работоспособностью и надежностью. Исходя из этого, было исследовано влияние количества слоев и направление армированных волокон в слоях на изучаемый динамический процесс. Результаты показывают, что двухслойные пластины более устойчивы к сдвиговым нагрузкам, чем однослойные. К примеру, в двухслойной вязкоупругой пластине с направлением волокон 45^0 и -45^0 значения критического времени в более чем 1.2 раза больше, чем в однослойной с направлением волокон 45^0 . Дальнейшее увеличение количества слоев не всегда является оправданной. Трехслойные вязкоупругие пластины из *КАСТ-В* с направлением волокон $45^0/-45^0/45^0$ менее устойчивы, чем двухслойные, но устойчивее, чем однослойные. При этом толщины всех этих трех конструкций взятыми равными.

Таблица 8

Значения критического времени при различных значениях геометрических и физических параметров анизотропной армированной пластины из *КАСТ-В*

№	Геометрические параметры			Физические параметры		Кол-во слоев	Направление волокон	Значения критического времени		
	$a, м$	$b, м$	$h, см$	$q, Па$	$P_0, МПа/с$			Упругая задача	Вязкоупругая задача	Разница (в %)
1	0.5	0.5	0.5	100	5	1	45 ⁰	3.7325	3.1629	15.3
2	0.6	0.5	0.5	100	5	1	45 ⁰	3.2155	2.7211	15.4
3	0.7	0.5	0.5	100	5	1	45 ⁰	2.9677	2.5129	15.3
4	0.5	0.5	0.4	100	5	1	45 ⁰	2.3838	2.0194	15.3
5	0.5	0.5	0.3	100	5	1	45 ⁰	1.3292	1.1240	15.4
6	0.5	0.5	0.5	200	5	1	45 ⁰	3.7136	3.1246	15.9
7	0.5	0.5	0.5	300	5	1	45 ⁰	3.7009	3.0946	16.4
8	0.5	0.5	0.5	100	6	1	45 ⁰	3.1141	2.6452	15.1
9	0.5	0.5	0.5	100	7	1	45 ⁰	2.6711	2.2743	14.9
10	0.5	0.5	0.5	100	5	1	0 ⁰	4.2618	3.9568	7.2
11	0.5	0.5	0.5	100	5	1	15 ⁰	3.9175	3.4630	11.6
12	0.5	0.5	0.5	100	5	1	30 ⁰	3.7667	3.2287	14.3
13	0.5	0.5	0.5	100	5	2	0 ⁰ /90 ⁰	4.2861	3.9712	7.3
14	0.5	0.5	0.5	100	5	2	15 ⁰ /-15 ⁰	4.3527	3.8456	11.7
15	0.5	0.5	0.5	100	5	2	30 ⁰ /-30 ⁰	4.5252	3.8704	14.5
16	0.5	0.5	0.5	100	5	2	45 ⁰ /-45 ⁰	4.6053	3.8919	15.5
17	0.5	0.5	0.5	100	5	3	45 ⁰ /-45 ⁰ /45 ⁰	3.7993	3.2184	15.3

Последний параграф пятой главы посвящен сравнительному анализу результатов, полученных по классической и уточненной теориям оболочек при решении задач динамики вязкоупругих анизотропных армированных элементов конструкций.

Полученные результаты показали, что при рассмотрении задач динамики вязкоупругих анизотропных армированных элементов конструкций толщина играет важную роль. Различия в результатах, полученные по этим теориям, возникают лишь при увеличении толщины элементов конструкции. Во всех рассмотренных случаях в начальный момент времени, результаты, полученные по этим теориям, по амплитудным значениям мало отличаются друг от друга. Однако со временем различия только возрастают.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по диссертации доктора наук (DSc) на тему: «Математические модели и численные методы для оценки напряженно-деформированного и динамического состояния слоистых армированных композитных оболочек» были сделаны следующие выводы:

1. Разработаны теоретические предпосылки и общие математические модели для оценки динамики вязкоупругих слоистых анизотропных армированных элементов конструкций с учетом геометрической нелинейности.

2. Получены системы нелинейных интегро-дифференциальных уравнений в частных производных для оценки динамики вязкоупругих слоистых анизотропных армированных пластин, панелей и оболочек с использованием классической и уточненной теорий оболочек.

3. Получены с использованием метода Бубнова-Галеркина, системы обыкновенных нераспадающихся интегро-дифференциальных уравнений для исследования задач о нелинейных колебаниях и динамической устойчивости вязкоупругих анизотропных армированных пластин и оболочек с учетом динамических быстро возрастающих сжимающих и сдвиговых нагрузок.

4. Разработана эффективная численная методика и вычислительный алгоритм решения, на основе которых на алгоритмическом языке Delphi создан комплекс прикладных программ, позволяющий решать широкий круг задач динамики вязкоупругих систем. Показано, что данный комплекс программ позволяет оценить и спрогнозировать поведение слоистых анизотропных армированных элементов конструкций при различных физико-механических и геометрических параметрах композиционного материала.

5. Для обоснования адекватности математических модели и точности численных методов, алгоритмов и полученных результатов решена тестовая задача. Полученные результаты показали, что погрешность предлагаемого численного метода совпадает с погрешностью использованных квадратурных формул и имеет тот же порядок малости относительно шага интерполяции. Доказана адекватность разработанных математических моделей, преимущество и эффективность выбранного метода решение задачи динамики и устойчивости для слоистых анизотропных армированных тонкостенных элементов конструкций.

6. При исследовании напряженно-деформированного состояния анизотропных армированных четырехугольных пластин в виде крыла летающих аппаратов (консольные пластины с различными геометрическими конфигурациями) впервые введено понятие коэффициента перегиба. Проведен анализ значений перегиба в зависимости от физико-механических и геометрических параметров пластин, а также направления армированных волокон.

7. При исследовании динамического поведения слоистых анизотропных армированных элементов конструкций при различных статических и динамических нагрузках показана важность учета вязкоупругих свойств материала конструкции.

8. Выявлено, что при исследовании свободных колебаний вязкоупругих анизотропных армированных элементов конструкций с использованием классической и уточненной теорий оболочек, значительное отличие в полученных результатах появляется при оценке динамики слоистых армированных нетонких элементов конструкций.

9. По результатам исследования опубликована 1 монография, 2 свидетельства о праве интеллектуальной собственности, 20 статей в международных журналах (18 в изданиях индексируемых в базе данных Scopus и 13 в базе данных Web of Science).

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.03/31.03.2022.T/FM.10.04 AWARDED
THE SCIENTIFIC DEGREE UNDER INSTITUTE OF FUNDAMENTAL
AND APPLIED SCIENCES AT NRU «TIAME»**

**«TASHKENT INSTITUTE OF IRRIGATION AND AGRICULTURAL
MECHANIZATION ENGINEERS»
NATIONAL RESEARCH UNIVERSITY**

ESHMATOV BAKHTIYOR KHASANOVICH

**MATHEMATICAL MODELS AND NUMERICAL METHODS FOR
ESTIMATING THE STRESS-STRAIN AND DYNAMIC STATE OF
LAYERED REINFORCED COMPOSITE SHELLS**

**05.01.07 – Mathematical modeling. Numerical methods and software packages
01.02.04 – Mechanics of deformable solid**

**ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION (DSc)
ON PHYSICAL-MATHEMATICAL SCIENCES**

Tashkent – 2024

The theme of dissertation of doctor of science (DSc) on physical and mathematical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission at the Ministry of Higher Education Science and Innovations of the Republic of Uzbekistan under number B2024.2.DSc/FM255.

Dissertation has been prepared at “Tashkent institute of irrigation and agricultural mechanization engineers” National Research University.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (uzbek, russian, english (resume)) on the website (<http://tiame.uz>, info@ifar.uz) and the “Ziyonet” Information and educational portal (www.ziyonet.uz).

Scientific adviser:

Mirsaidov Mirziyod

Academician AS RUz, doctor of technical sciences, professor

Abdikarimov Rustamkhan Alimkhanovich

Doctor of physical and mathematical sciences, professor

Official opponents:

Safarov Ismoil Ibrohimovich

Doctor of physical and mathematical sciences, professor

Ravshanov Normahmad

Doctor of physical and mathematical sciences, professor

Nuraliev Faxriddin Murodillaevich

Doctor of technical sciences, professor

Leading organization:

Samarkand state architecture and construction university

The defense will take place «__» _____ 2024 at ___ at the meeting of the Scientific council DSc.03/31.03.2022.T/FM.10.04 at the Institute of fundamental and applied sciences at NRU «TIAME» (Address: 39, Q.Niyaziy str., Tashkent, 100000, Uzbekistan, Institute of fundamental and applied sciences, Hall №108; Tel. (+99871) 237-09-61; Fax: (+99871) 237-48-67, e-mail: info@ifar.uz).

The doctoral dissertation can be found at the Information Resource Centre of the “Tashkent institute of irrigation and agricultural mechanization engineers” National research university (registered with № __). (Address: 39, Q.Niyaziy str., Tashkent, 100000, Uzbekistan. Tel. (+99871) 237-09-61.

Abstract of dissertation out on «__» _____ 2024.
(Mailing report № __ on «__» _____ 2024).

B.J. Ahmedov

Chairman of the scientific council
for awarding scientific degrees,
Academician AS RUz,
doctor of physical and mathematical sciences, professor

D.R. Rayimbaev

Scientific secretary of the scientific council
for awarding scientific degrees,
doctor of physical and mathematical sciences

A.R. Hayotov

Chairman of the scientific seminar under scientific council
for awarding scientific degrees,
doctor of physical and mathematical sciences, professor

INTRODUCTION (abstract of the DSc dissertation)

The aim of the research is to develop theoretical foundations, develop mathematical models and methods for solving problems of statics and dynamics of elements of thin-walled anisotropic reinforced structural elements made of composite materials, taking into account geometric nonlinearity and dissipative properties of the material within the framework of Kirchhoff-Love and Timoshenko theories.

The object of the research work is layered anisotropic thin-walled reinforced structural elements used in various areas of industries and construction.

The subject of the research is the development of theory, mathematical models, methods, algorithms and software tools for evaluating internal force factors and dynamic behavior of anisotropic reinforced thin-walled structural elements under various loads.

Research methods. The dissertation uses the Bubnov-Galerkin method, methods for solving systems of nonlinear integro-differential equations with weakly singular relaxation kernels, the method of quadrature formulas, numerical experiments, the Gauss method, the finite element method.

The scientific novelty of the research is as follows:

- improved theoretical prerequisites for evaluating the dynamics of viscoelastic anisotropic plates, panels and shells, taking into account the layering of composite structural elements;

- mathematical models of problems of dynamics of viscoelastic anisotropic reinforced layered structural elements have been developed within the framework of the Kirchhoff-Love and Timoshenko theories, allowing to take into account the directions of reinforced fibers in each layer;

- systems of ordinary non-decaying integro-differential equations have been obtained for the study of problems of nonlinear vibrations and dynamic stability of viscoelastic anisotropic reinforced plates and shells, taking into account dynamic rapidly increasing compressive and shear loads;

- a computational algorithm has been developed for the numerical solution of systems of ordinary nonlinear integro-differential equations for problems of nonlinear vibrations and dynamic stability of viscoelastic elements of thin-walled reinforced structures;

- based on the developed software in the algorithmic language Delphi, the dynamic behavior of anisotropic reinforced viscoelastic thin-walled plates under various loads, boundary conditions and directions of reinforced fibers is investigated;

- using the ABAQUS engineering software package, the stress-strain state of anisotropic reinforced quadrangular wing-shaped plates has been studied.

Implementation of research results. Based on the developed mathematical models, computational methods and algorithms for numerical analysis of the statics and dynamics of thin-walled laminated reinforced structures, mathematical calculations of structural elements made of composite materials for strength under various loads were carried out. These calculations have been implemented in

“Kimyoviy texnologiya” LLC, “Real Lion Houses” LLC, “New World Star” LLC and “Nurobod House” LLC (“Uzpromstroyaterial” reference no. 02/15-1336 dated June 3, 2024). The introduction of research results made it possible, by reducing the weight of the structure, to save consumables by more than 20 million soums.

Publications on the research results. A total of 43 scientific papers have been published on the topic of the dissertation. In particular, 1 monograph, 2 certificates of intellectual property, 26 articles in scientific publications recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of basic scientific results, including 6 publications in republican and 20 publications in international journals (18 in publications indexed in the SCOPUS database and 13 articles in the Web of Science database).

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. Эшматов Б.Х. О методе замораживания систем нелинейных интегральных уравнений типа Вольтера // Доклады АН РУз. Ташкент – 2004. - №3. – с. 12-16. (01.00.00; № 7).
2. Эшматов Б.Х. Математическое моделирование задач о нелинейных колебаниях вязкоупругих ортотропных пластин из композиционных материалов // Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики». Ташкент. – 2004. - №5. – с. 46-52. (05.00.00; №5).
3. Верлань А.Ф., Эшматов Б.Х. Математическое моделирование колебаний ортотропных вязкоупругих пластин с учетом геометрической нелинейности // НАН Украины «Электронное моделирование». Киев. – 2005. – Т.27. - №4. – с.3-17.
4. Эшматов Б.Х. Математическая модель задачи о нелинейных колебаниях и динамической устойчивости вязкоупругих ортотропных оболочек с учетом деформации сдвига и инерции вращения // Доклады АН РУз. Ташкент. – 2005. - №1. – с. 27-30. (01.00.00; № 7).
5. Эшматов Б.Х. Алгоритмизация задачи о нелинейном колебании вязкоупругой ортотропной круговой цилиндрической оболочки с учетом деформации сдвига и инерции вращения // Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики». Ташкент. – 2005. - №3. – с. 109-116. (05.00.00; №5).
6. Эшматов Б.Х. Нелинейное колебание вязкоупругих пластин по уточненной теории Тимошенко // НАН Украины “Прикладная механика». Киев. – 2006. – Т.42. - №5. – с. 120-131. DOI: 10.1007/s10778-006-0127-7. (№3; Scopus; IF=0.7).
7. Эшматов Б.Х. Динамическая устойчивость вязкоупругих пластин при возрастающих сжимающих нагрузках // Сибирское отделение РАН, «Прикладная механика и техническая физика». Новосибирск. – 2006. – Т.47. - №2. – с. 165-175. DOI: 10.1007/s10808-006-0055-7. (№3; Scopus; IF=0.6).
8. Эшматов Б.Х. Задача о динамической устойчивости вязкоупругой ортотропной круговой цилиндрической оболочки с учетом деформации сдвига и инерции вращения // Доклады АН РУз. Ташкент. – 2006. - №1. – с. 34-37. (01.00.00; № 7).
9. Eshmatov B.Kh. Nonlinear vibrations and dynamic stability of viscoelastic orthotropic rectangular plates // Journal Sound and Vibration (Elsevier) – 2007. - №300. – p. 709-726. DOI: 10.1016/j.jsv.2006.08.024. (№1; Scopus; IF=4.8).
10. Eshmatov B.Kh. Nonlinear vibrations of viscoelastic cylindrical shells taking into account shear deformation and rotatory inertia // Nonlinear Dynamics

- (Springer) – 2007. – 50(1,2). – p. 353-361. DOI: 10.1007/s11071-006-9163-4. (№1; Scopus; IF=5.7).
11. Eshmatov B.Kh. Dynamic stability of viscoelastic circular cylindrical shells taking into account shear deformation and rotatory inertia // *Applied Mathematics and Mechanics* (Springer) – 2007. – 28(10). – p. 1319-1330. DOI: 10.1007/s10483-007-1005-y. (№1; Scopus; IF=4.4).
 12. Eshmatov B.Kh., Mukherjee S. Nonlinear vibrations of viscoelastic composite cylindrical panels // *Journal of Vibration and Acoustics* (American Society of Mechanical Engineering) – 2007. - №129. – p. 285-296. DOI: 10.1115/1.2730532. (№2; Scopus; IF=2.0).
 13. Eshmatov B.Kh., Khodjaev D.A. Nonlinear vibration and dynamic stability of a viscoelastic cylindrical panel with concentrated mass // *Acta Mechanica* (Springer). The Netherland. – 2007. – 190(1-4). – p. 165-183. DOI: 10.1007/s00707-006-0418-4. (№2; Scopus; IF=2.6).
 14. Ходжаев Д.А., Эшматов Б.Х. Нелинейные колебания вязкоупругой пластины с сосредоточенными массами // *Сибирское отделение РАН, «Прикладная механика и техническая физика»*. Новосибирск – 2007. – Т.48. - №6. – с.158-169. DOI: 10.1007/s10808-007-0115-7. (№3; Scopus; IF=0.6).
 15. Эшматов Б.Х. Динамическая устойчивость вязкоупругих ортотропных цилиндрических панелей // *Известия НАН Армении, Механика*. Ереван. – 2007. – Т.60. - №2. – с. 80-92.
 16. Эшматов Б.Х., Ходжаев Д.А. Динамическая устойчивость вязкоупругой пластины с сосредоточенными массами // *НАН Украины “Прикладная механика”*. Киев. – 2008. – Т.44. - №2. – с. 109-118. DOI: 10.1007/s10778-008-0028-z. (№3; Scopus; IF=0.7)
 17. Эшматов Б.Х., Ходжаев Д.А. Динамическая устойчивость вязкоупругой цилиндрической панели с сосредоточенными массами // *НАН Украины “Проблемы прочности”*. Киев. – 2008. – Т.40. - №4. – с. 132-147. DOI: 10.1007/s11223-008-9061-8. (№3; Scopus; IF=0.7)
 18. Эшматов Б.Х. Нелинейные колебания и динамическая устойчивость вязкоупругой круговой цилиндрической оболочки с учетом деформации сдвига и инерции вращения // *Известия РАН. Механика твердого тела*. Москва. – 2009. - №3. – с. 102-117. DOI: 10.3103/S002565440903011X. (№3; Scopus; IF=0.7).
 19. Верлань А.Ф., Эшматов Х., Эшматов Б.Х., Бобаназаров Ш.П., Кучаров О.Р., Ходжаев Д.А. Математическое моделирование нелинейных колебаний и исследование динамической устойчивости вязкоупругих прямоугольных пластин и цилиндрических панелей, часть I // *НАН Украины «Электронное моделирование»* – Киев, 2009 – Т.31 - №3 – С.3-19.
 20. Верлань А.Ф., Эшматов Х., Эшматов Б.Х., Бобаназаров Ш.П., Кучаров О.Р., Ходжаев Д.А. Математическое моделирование нелинейных колебаний и исследование динамической устойчивости вязкоупругих

- прямоугольных пластин и цилиндрических панелей, часть II // НАН Украины «Электронное моделирование» – Киев, 2009 – Т.31 - №4 – С.17-32.
21. Верлань А.Ф., Эшматов Х., Ходжаев Д.А., Эшматов Б.Х. Модели и методы математического моделирования нелинейных задач динамики вязкоупругих конструкций из композиционных материалов // НАН Украины «Электронное моделирование» – Киев, 2010 – Т.32 - №4 – С.3-15.
 22. Эшматов Х., Ходжаев Д.А., Эшматов Б.Х., Кучаров О.Р. Компьютерное моделирование задачи о нелинейном флаттере вязкоупругой пластины из композиционного материала с сосредоточенными массами // НАН Украины «Электронное моделирование» – Киев, 2010 – Т.32 - №5 – С.3-10.
 23. Эшматов Б.Х., Эшматов Х., Ходжаев Д.А. Нелинейный флаттер вязкоупругих прямоугольных пластин и цилиндрических панелей из композиционного материала с сосредоточенными массами // Сибирское отделение РАН, «Прикладная механика и техническая физика». Новосибирск. – 2013. – Т.54. - №4. – с. 74-85. DOI: 10.1134/S0021894413040081. (№3; Scopus; IF=0.6).
 24. Эшматов Б.Х. Нелинейные колебания вязкоупругой анизотропной армированной пластины // Известия РАН. Механика твердого тела. Москва. – 2018. - №5. – с. 106-111. DOI: 10.3103/S0025654418080101. (№3; Scopus; IF=0.7).
 25. Eshmatov B.Kh., Abdikarimov R.A., Amabili M., Vatin N.I. Nonlinear vibrations and dynamic stability of viscoelastic anisotropic fiber reinforced plates // Magazine of Civil Engineering. Sankt Petersburg. – 2023. – 118(2). – Article No.11811. DOI: 10.34910/MCE.118.11. (№3; Scopus; IF=1.84).
 26. Мирсаидов М., Эшматов Б.Х., Абдикаримов Р.А. Изгиб анизотропной армированной прямоугольной консольной пластины // Композиционные материалы. Ташкент. – 2024. - №1. – с. 237-239. (05.00.00; №13).

II бўлим (II часть; part II)

27. Eshmatov B.Kh. Buckling, bending and vibrations of anisotropic wing-like structures // Монография. Ташкент, из-во Ташкентский институт ирригации и мелиорации, 2015, 86 с.
28. Эшматов Х., Эшматов Б.Х., Бобаназаров Ш.П. Программа для расчета нелинейного колебания и динамической устойчивости вязкоупругих ортотропных композитных структур // Государственное патентное ведомство Республики Узбекистан. Свидетельство №DGU 00899. 2.02.2005 г.
29. Эшматов Х., Эшматов Б.Х., Юсупов М. Программа для исследования поведения вязкоупругих ортотропных композитных структур с учетом деформации сдвига и инерции вращения // Государственное патентное

ведомство Республики Узбекистан. Свидетельство №DGU 00898.
2.02.2005 г.

30. Эшматов Б.Х. Нелинейные колебания вязкоупругих ортотропных цилиндрических оболочек с учетом распространения упругих волн // Материалы XVII сессии Международной школы по моделям механики сплошной среды, 4-10 июля 2004 года, Казань (Россия). С.186-191.
31. Эшматов Б.Х., Эшматов Х. Математическое моделирование задач о колебаниях вязкоупругих ортотропных пластин с учетом распространения упругих волн // Доклады и тезисы международной конференции “Инфокоммуникационные и вычислительные технологии в науке, технике и образовании”, 28-30 сентября 2004 года, Ташкент (Узбекистан). С. 292-296.
32. Эшматов Б.Х. Математическое моделирование задачи о нелинейных колебаниях вязкоупругих ортотропных пластин // Материалы международной конференции “Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании”, 7-9 октября 2004 года, Алма-Ата (Казахстан). С. 359-366.
33. Эшматов Б.Х. Математическое моделирование задач о нелинейных колебаниях и динамической устойчивости вязкоупругих ортотропных пластин с учетом начальных неправильностей // V Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям с участием иностранных ученых”, 1-3 ноября 2004 года, Новосибирск (Россия). С. 34-35.
34. Эшматов Б.Х. Математическое моделирование задачи о колебаниях и динамической устойчивости вязкоупругих ортотропных пластин // Труды международной научной конференции “Дифференциальные уравнения с частными производными и родственные проблемы анализа и информатики”, 16-19 ноября 2004 года, Ташкент (Узбекистан). С. 112-117.
35. Эшматов Б.Х. Задача о нелинейном колебании вязкоупругой ортотропной пластинки по теории Тимошенко // Труды международной конференции “Современные проблемы математической физики и информационных технологий” 18-24 апреля 2005 года, Ташкент (Узбекистан). С. 246-250.
36. Eshmatov B.Kh. Nonlinear vibrations of viscoelastic orthotropic plates of composite materials // Compilation of Abstracts for the Third M.I.T. (Massachusetts Institute of Technology) Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, June 14-17, 2005. P.93.
37. Эшматов Б.Х. Нелинейные колебания и динамическая устойчивость вязкоупругой цилиндрической оболочки с учетом температуры по уточненной теории Тимошенко // Материалы Международной научно-технической конференции «Современные проблемы и перспективы механики», 17-18 мая 2006 года, Ташкент (Узбекистан). С. 442-444.
38. Эшматов Б.Х. Математическая модель задачи о нелинейном колебании вязкоупругой ортотропной цилиндрической панели по обобщенной

- теории Тимошенко // Тезисы международной конференции «Интегральные уравнения-2009», 26-29 января 2009 г., Киев (Украина). С. 150-152.
39. Eshmatov V.Kh. Mathematical modeling of the nonlinear problems of vibrations and dynamical stability of viscoelastic anisotropic fiber reinforced plates // Compilation of Abstracts for the 7th Ariel Conference on Functional Differential Equations and Applications, September 22-27, 2017. P.5.
40. Эшматова З.Б., Эшматов Б.Х. Математическое моделирование нелинейного колебания вязкоупругой анизотропной армированной пластины // Материалы VI Международной научно-практической конференции «Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук», 21-23 апреля 2020 г., Тольятти (Россия). С. 475-481.
41. Эшматова З.Б., Эшматов Б.Х. Математическое моделирование задачи о динамической устойчивости анизотропной армированной пластины // Материалы VII Международной научно-практической конференции «Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук», 22-24 апреля 2021 г., Тольятти (Россия). С. 237-242.
42. Eshmatov V.Kh., Abdikarimov R.A., Komilova Sh., Safarbayeva N. Dynamic stability of anisotropic fiber-reinforced plate // CONMECHYDRO-2021, E3S Web of Conferences 264, 05016, 2022. DOI: 10.1051/e3sconf/202126405016. (№4; Scopus; IF=0.38).
43. Eshmatov V.Kh., Mirsaidov M., Abdikarimov R.A. Dynamic buckling of plate made of glass reinforced plastic under rapidly increasing shear load // CONMECHYDRO-2023, E3S Web of Conferences 401, 03009, 2023. DOI: 10.1051/e3sconf/202340103009. (№4; Scopus; IF=0.38).

Бичими 60x84 1/16. Ризограф босма усули. Times гарнитураси.

Шартли босма табоғи: 4,25. Адади 100. Буюртма № 27.
Баҳоси келишилган нархда.

«ЎзР Фанлар Академияси Асосий кутубхонаси» босмахонасида чоп этилган.
Босмахона манзили: 100170, Тошкент ш., Зиёлилар кўчаси, 13-уй.