

**MEXANIKA VA INSHOOTLAR SEYSMIK MUSTAHKAMLIGI
INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**MEXANIKA VA INSHOOTLAR SEYSMIK MUSTAHKAMLIGI
INSTITUTI**

ADILOV FARXADJAN FOZILJONOVICH

**PLASTIK DEFORMATSIYALANISHNI HISOBGA OLGAN HOLDA
YORIQLARGA EGA BO'LGAN MATERIALLARNI
MUSTAHKAMLIKKA HISOBLASH USULINI ISHLAB CHIQISH**

01.02.04 – Deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI

Toshkent – 2024

**Fizika - matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации
доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам**

**Contents of Dissertation Abstract of the Doctor of Philosophy (PhD)
on Physical-mathematical Sciences**

Adilov Farxadjan Foziljonovich

Plastik deformatsiyalanishni hisobga olgan holda yoriqlarga ega bo'lgan
materiallarni mustahkamlikka hisoblash usulini ishlab chiqish.....3

Адилов Фархаджан Фозилжонович

Разработка метода расчета на прочность трещиноватых материалов
с учетом пластического деформирования.....23

Adilov Farxadjan Foziljonovich

Development of a method for calculating the strength of cracked
materials taking into account plastic deformation43

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ
List of published works46

**MEXANIKA VA INSHOOTLAR SEYSMIK MUSTAHKAMLIGI
INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**MEXANIKA VA INSHOOTLAR SEYSMIK MUSTAHKAMLIGI
INSTITUTI**

ADILOV FARXADJAN FOZILJONOVICH

**PLASTIK DEFORMATSIYALANISHNI HISOBGA OLGAN HOLDA
YORIQLARGA EGA BO'LGAN MATERIALLARNI
MUSTAHKAMLIKKA HISOBLASH USULINI ISHLAB CHIQISH**

01.02.04 – Deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI

Toshkent – 2024

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2022.4.PhD/FM511 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi M.T. O'rozboyev nomidagi Mexanika va inshootlar seysmik mustahkamligi institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (www.instmech.uz) va "Ziyonet" axborot ta'lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:

Abirov Rustam Abdullayevich
fizika-matematika fanlari doktori

Rasmiy opponentlar:

Axmedov Akram Burxanovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Abdusattorov Abdusamat
texnika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot:

Toshkent arxitektura – qurilish universiteti.

Dissertatsiya himoyasi Mexanika va inshootlar seysmik mustahkamligi instituti huzuridagi fan doktori ilmiy darajasini beruvchi DSc.02/30.12.2019. T/FM.61.01 raqamli Ilmiy kengashning 2024 йил "21" "fevral" soat 14⁰⁰ dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100125, Toshkent, Do'rmon yo'li ko'chasi, 33, 1-majlislar zali. Tel: (99871) 262-71-52; Faks: (99871) 262-71-32, e-mail: instmech@academy.uz).

Dissertatsiya bilan Mexanika va inshootlar seysmik mustahkamligi institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (19 raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100125, Toshkent, Do'rmon yo'li ko'chasi, 33-uy. Тел.: (99871) 262-71-52).

Dissertatsiya avtoreferati 2024 yil «2» "fevral" kuni tarqatildi.
(2024 yil «2» "fevral" dagi 19 raqamli reester bayonnomasi).



M.M. Mirsaidov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash raisi, t.f.d., professor, O'zR FA akademigi

M.K. Usarov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash ilmiy kotibi, f-m.f.d., professor

B.E. Xusanov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash qoshidagi Ilmiy seminar raisi, f-m.f.d., k.i.x.

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissyertasiyasining annotasiyasi)

Dissertasiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda muhim ahamiyatga ega bo'lgan zilzilabardosh inshootlarni qurish, aviasiya sanoatida, mashinasozlik va boshqa sohalarida yoriqlar rivojlanishi bilan bog'liq masalalarni hal qilish dolzarb muammolardan biri bo'lib qolmoqda. Shu jihatdan yangi materiallarning hamda qattiq jismlarning mustahkamligi va buzilishi muammolarini o'rganish hozirgi kunda nazariy va amaliy jihatdan muhim vazifa hisoblanadi. Bu nafaqat nazariy tadqiqotlar, balki keng ko'lamli eksperimental tadqiqotlarni o'z ichiga olib, konstruksiyalarning mustahkamligini ta'minlashda muhim ahamiyat kasb etadi.

Jahonda yuklanish ta'sirida elastik yoki plastik muhitdagi yoriqlarning boshlanishi va tarqalishining matematik modellarini ishlab chiqish, shu bilan birga shikastlanishlar bilan bog'liq amaliy tadqiqotlar va maqsadli ilmiy ishlarni olib borishga alohida e'tibor qaratilmoqda. Yoriqlarning rivojlanishi qurilish, quvurlar o'tkazish, energetika va mashinasozlik sohalarida katta iqtisodiy yo'qotishlarga olib keladi. Yoriqlarning tarqalishini modellashtirishda yoriq frontida singulyarlikka ega bo'lgan kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini baholash, turli konstruksiyalarning mustahkamligini ta'minlashda zarur vazifalardan biri hisoblanadi. Ushbu muammolarni mazkur tadqiqotda taklif qilingan usullar yordamida qisman hal qilish mumkin.

Respublikamizda bugungi kunda aholining seysmik xavfsizligini ta'minlash va turli inshootlarning seysmik mustahkamligini oshirishning yangi usullarini joriy etishga katta e'tibor qaratilmoqda. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi PF-60-sonli «2022–2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida»gi Farmonida, jumladan, «...hududlarning “o'sish nuqtalari”dan kelib chiqib, muhandislik-kommunikatsiya va ijtimoiy infratuzilma ob'yektlarini qurishga alohida e'tibor qaratish...»¹ bo'yicha muhim vazifalar belgilab berilgan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda yangi turdagi fibrobeton, bazalt va boshqa materiallardan foydalangan holda ob'ektlarning yoriqbardoshligini ta'minlashning samarali usullarini ishlab chiqish bo'yicha tadqiqotlar o'tkazish zaruriy vazifalardan hisoblanadi.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 30 maydagi PF-144-son «O'zbekiston Respublikasining seysmik xavfsizligini ta'minlash tizimini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida»gi Farmoni, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023 yil 16 maydagi PQ-158-sonli «O'zbekiston Respublikasi aholisi va hududining seysmik xavfsizligini ta'minlash tizimini yanada takomillashtirishga oid qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida»gi, 2020 yil 30 iyuldagi PQ-4794-sonli «O'zbekiston Respublikasi aholisi va hududining seysmik xavfsizligini ta'minlash tizimini tubdan takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida»gi qarorlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishda ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi PF-60-son «2022–2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida»

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining IV. «Matematika, mexanika va informatika» ustuvor yo'nalishi doirasida bajarilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Hozirgi vaqtda plastik deformatsiyalanishni hisobga olgan holda yoriqlarga ega bo'lgan materiallarni mustahkamligini hisoblash bo'yicha bir qator ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilmoqda, shu jumladan V.M. Kornev, L.A. Kostireva, M.N. Perelmutter, A.V. Savinovskiy, E.A. Artamonovna, D.A. Pojarskiy, V.M. Mirsalimov, V.I. Smirnov, S.S. Mayer, A.A. Ashrabov, Yu.V. Zaysev, P. Bandil, D. Khan, W. Cao, Q. Lei, P. Fedelinski, B. Gommerstadt, L. Igumnov, W. Becker. H. Noguchi, Y. Furuya, S. Tanaka, H. Wong, H. Zhou va boshqalar bu yo'nalishda salmoqli ilmiy ishlar olib borib muayyan darajada natijalarga erishganlar.

Materiallardagi yoriqlarni ilmiy tadqiq etish va buzilish mexanikasi asoslari Griffithsning ishlaridan boshlangan. U o'z ishlarida shisha namunalarni sindirish bo'yicha tadqiqot natijalarini taqdim etdi. Tashqi kuchlar ta'sirida jismda elastik deformatsiyaning potensial energiyasi to'planadi va yorilish kengayganda esa potensial energiyaning ma'lum bir qismi ajralib chiqadi, deb taxmin qilingan. Griffiths o'z ishida yoriq o'sishidan hosil bo'ladigan yangi sirtga nisbatan yoriqning o'ziga (ya'ni, yoriq uchlaridagi atomlararo bog'lanishlarni uzish uchun) ko'proq energiya sarflansagina yoriq o'sishi mumkinligini ko'rsatdi. Bu yondoshuv mo'rt buzilish energetik kriteriyasi deb nom oldi. Aynan shu mo'rt buzilish yondoshuvi G.P. Cherepanov va uning ilmiy maktabi: Ye.F.Afanasyev, A.A.Borzix, A.S.Bikovsev, A.B.Kaplun, L.A.Kipnis, V.D.Kuliyev, V.M.Mirsalimov, Ye.M.Morozov. V.Z.Parton, V.M.Smolskiy, I.E.Esparragoza, Qin Ma va boshqalar ishlarida rivojlantirilgan.

G. R. Irwin, M.P. Wnuk, E. Orowan, J.R. Rice, H.D. Bui, Hutchinson, H. Liebowitz, Guy Pluvineage, S.V.Serensen, G.I. Barenblatt, Yu.N.Rabotnov, L.M.Kachanov, L.I. Slepian, Ye.I. Shemyakin, M.Ya. Leonov, N.F. Morozov, A. Ye. Andreykiv, V.R.Skalskiy, M.P. Savruk, N.A.Maxutov, S.N.Leonovich va boshqalar nazariy va amaliy buzilish mexanikasiga sezilarli hissa qo'shgan olimlar hisoblanadi.

Respublikamizda ushbu yo'nalishda A.S. Bikovsev, J.S. Tavbayev, D.B. Kramorovski va boshqa bir qator olimlar seysmologik masalalarni yechishda yoriqlarni paydo bo'lishi va tarqalishini tizimli o'rganish bo'yicha izlanishlar olib borishgan. Konstruksiya elementlarining past siklli yuklanishi natijasida shikastlanishning paydo bo'lishi bilan bog'liq masalalar E.I. Starovoytov va A. Abdusattarov tomonidan o'rganilgan. Umuman olganda, elastoplastik buzilish masalalarini yechish va yoriqlar mexanikasini rivojlantirish tizimli yondashuvni talab qiladi. Ko'p jihatdan yoriqlarning paydo bo'lishi va rivojlanishi bilan bog'liq bunday turdagi masalalarni hal qilish eksperimental laboratoriyalarda amalga oshiriladi. Bu sohada hozirgi vaqtda respublikamizda bo'shliq paydo bo'lgan.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Mexanika va inshootlarning seysmik mustahkamligi institutining tadqiqot rejasining №FA-F-4-

004 “Murakkab deformatsiya jarayonlarida konstruksion materiallarning elastoplastik deformatsiyasini eksperimental va nazariy o‘rganish” (2017-2020), №FA-Atex-2018-24 “To‘plangan shikastlanishlar mavjud bo‘lgan inshootlarning mustahkamligini hisoblashning amaliy usullarini ishlab chiqish va ularni mustahkamlash bo‘yicha takliflar tayyorlash” (2017-2020) mavzularidagi loyihalar doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi materiallarning haqiqiy xususiyatlarini, yoriqlar shaklida to‘plangan shikastlanishlarni hisobga olgan holda konstruksiya elementlarini hisoblash usulini ishlab chiqishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

yoriqlarga ega bo‘lgan plastinalarda kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini aniqlashning noxiziqli masalasini shakllantirish;

ko‘chishlarda fundamental yechim asosida kuchlanish konsentratorlari mavjud bo‘lgan materiallar uchun noxiziqli masalani yechish usulini ishlab chiqish;

noxiziqli deformatsiyalarni hisobga olgan holda uzlukli ko‘chish usuli asosida masalani shakllantirish va ishlab chiqilgan yechish usulini asoslash;

materialdagi kuchlanish konsentratsiyasi darajasini yoriq o‘lchamiga va chigaraviy shartlarga bog‘liqligini aniqlash;

jismlarda mavjud bo‘lgan muntazam yoriqlar tizimini matematik modellashtirish va masalani yechish usulini ishlab chiqish.

Tadqiqot ob‘yekti kuchlanish konsentratorlari yoki dastlabki yoriqlar mavjud bo‘lgan materiallarning holati va ularning mustahkamlik xossalari hisoblanadi.

Tadqiqot predmeti materialning xossalariga bog‘liq holda yoriqlarning rivojlanish jarayonlarining qonuniyatlari va xususiyatlarini o‘rganish, matematik modellarni va tekis masalada buzilish nazariyasi masalalarini yechish usullarini ishlab chiqish tashkil etadi.

Tadqiqot usullari. Tadqiqot jarayonida deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi usullari, chegaraviy integral tenglamalar usuli, chiziqli algebraning sonli usullari qo‘llanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilarni o‘z ichiga oladi:

yoriqlarga ega bo‘lgan plastinalarda kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini aniqlashning noxiziqli masalasi chegaraviy elementlar usulida shakllantirilgan va chekli soha uchun yechish usuli Papkovish-Neyberning fundamental yechimiga asosan ishlab chiqilgan;

ko‘chishlardagi elastiklik nazariyasi masalasini fundamental yechimi asosida kuchlanish konsentratorlari mavjud bo‘lgan materiallarning noxiziqli masalasini yechish uchun uzlukli ko‘chishlar usuli ishlab chiqilgan;

yoriqlarning rivojlanishiga oid tekis masala sonli yechimlariga asoslangan hisoblar natijasiga ko‘ra kuchlanish konsentratsiyasi qiymatining yoriq o‘lchamiga bog‘liqligining grafik ko‘rinishidagi qonuniyati taklif qilingan hamda boshlang‘ich yoriqqa ega bo‘lgan jismda chegaraviy shartlarning kuchlanish konsentratsiyasiga bog‘liqlik darajasi aniqlangan;

anizotrop muhit sifatida muntazam yoriqlar tizimiga ega bo'lgan jism modellashtirilgan, chegaraviy integral tenglamalar usuli asosida uni yechishning sonli sxemasi taklif qilingan va uning asosida chegaraviy masalani yechish uchun sonli natijalar olingan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

kuchlanish konsentratorlari mavjud bo'lgan elastik plastinalarni hisoblash usuli ishlab chiqilgan;

yoriqlarga ega bo'lgan plastik jismlarda yoriq atrofidagi kuchlanganlik holatini aniqlash usuli va dasturi ishlab chiqilgan;

ular asosida yoriqlar rivojlanishini cheklash uchun materiallarni mustahkamlash usullari taklif qilingan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi. Olingan natijalarning ishonchliligi singulyar integral tenglamalarni yechish usullaridan to'g'ri foydalanish, olingan natijalarni analitik yechimlar va eksperimental ma'lumotlar bilan solishtirish, shuningdek boshqa mualliflarning yechimlari bilan taqqoslash bilan asoslanadi. Tadqiqot natijalari bir qator xorijiy jurnallarda, shu jumladan Scopus va WoS xalqaro bazalariga kiritilgan maqolalar chop etilgan.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati materiallarning mustahkamlik xususiyatlarini hisoblash uchun uzlukli ko'chish usulidan foydalanish matematik asoslanganligi, shuningdek kuchlanish konsentratorlari ko'rinishidagi dastlabki shikastlanishlar mavjud bo'lgan jismlar uchun elastik, elastoplastik masalalarni hisoblash usullari ishlab chiqilganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati yoriq va yoriqlar tizimlarining materialning mustahkamlik xususiyatlariga ta'siri darajasini aniqlashdan iboratdir.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Plastik deformatsiyani hisobga olgan holda yoriq materiallarning mustahkamligini hisoblash usulini ishlab chiqish bo'yicha dissertatsiya ishida olingan natijalar asosida:

boshlang'ich yoriqlarga ega bo'lgan metall, temir-beton va kompozit panel materiallarda yoriqlar ta'sirini statik yuklanganlik holatini hisoblash usuli Farg'ona politexnika instituti qoshidagi "FARPI HITECH ENGINEER" UK tomonidan binolarini texnik holatini baholash uchun qo'llanilgan (O'zR qurilish va uy-joy kommunal xo'jaligi vazirligining 2023 yildagi 22 iyunidagi 24-06/6801-sonli ma'lumotnomasi). Ilmiy tadqiqot natijalari turar-joy binolarining texnik holatini baholash va ularning mustahkamligini ta'minlash uchun yoriqlarni hisobga olib ishlov berishda mehnat unumdorligi 1.2 baravar oshishiga va ob'yektlarning buzilishi ehtimoli kamayishiga erishilgan;

bino va inshootlarni tashkil etgan qurilish materiallarida boshlang'ich yoki paydo bo'lgan yoriqlarni tarqalishi, statik charchashlarini aniqlash va kechiktirilgan buzilishlarni oldini olish uchun ishlab chiqilgan usuli Farg'ona politexnika instituti qoshidagi "FARPI HITECH ENGINEER" UK tomonidan Farg'ona shahri, Sh.Rashidov MFY, S.Temirov ko'chasi, 57d-uyda joylashgan 5 qavatli turar joy binosini zilzilabardoshlik bo'yicha tekshiruvdan o'tkazish, konstruksiyalarining seysmik mustahkamligini baholashga joriy etilgan (O'zR qurilish va uy-joy kommunal xo'jaligi vazirligining 2023 yildagi 22 iyunidagi 24-

06/6801-sonli ma'lumotnomasi). Ilmiy tadqiqot natijalari kompozit materiallarning to'plangan shikastlanish darajasini hisoblash va uning parametrlarini nazariy usullar bilan aniqlash, eksperimental tajribalar o'tkazishga nisbatan iqtisodiy samaradorligini 18% oshirish imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobasiyasi. Mazkur tadqiqot natijalari 14 ta ilmiy konferensiyada, shu jumladan 11 ta xalqaro va 3 ta respublika ilmiy-texnik konferensiyalari va seminarlarida muhokama qilingan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 21 ta ilmiy ish chop etilgan. O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan falsafa fanlari doktorlik (PhD) dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini nashr etish uchun tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 16 ta ilmiy maqola chop etilgan, jumladan 5 ta respublika va 11 ta xorij va Scopus bazasiga kiritilgan jurnallarda chop etilgan.

Dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi. Dissertatsiya ishi kirish, uch bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiya hajmi 121 bet bo'lib, 70 ta rasm, 1 ta jadval va 185 nomdagi adabiyotlar ro'yxatidan tashkil topgan.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zaruriyati asoslangan, tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari taraqqiyotining ustuvor yo'nalishlariga mosligi ko'rsatilgan, tadqiqotning maqsad va vazifalari belgilab olingan, hamda tadqiqot ob'yekti va predmeti aniqlangan, olingan natijalarning ishonchliligi asoslangan, ishning yangiliklari, nazariy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalarini amaliyotga joriy etilganlik holati hamda nashr etilgan ishlar va dissertatsiya ishining tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning **“Shikastlangan materiallarning mustahkamligini aniqlash to'g'risida”** deb nomlangan birinchi bobida tutash muhit mexanikasi va yoriqlar mexanikasining mustahkamligi kriteriyalarining hozirgi zamon holati ko'rib chiqilgan. Ushbu mavzu bo'yicha ko'plab ilmiy ishlar tahlil qilingan. Shuningdek, kuchlanish konsentratori bo'lgan jismlar uchun tekis masalani yechish usullari keltirilgan.

Elastik masalalar uchun ko'chishlarga nisbatan yechim (fundamental yechim) Papkovich–Neyber yechimi asosida olingan. Koordinatalar yo'nalishi bo'yicha tekislik deformatsiya shartida bir jinsli, izotrop, chiziqli-elastik jismda x va y o'qlari bo'ylab ko'chish komponentalarini quyidagicha yozib olamiz:

$$\left. \begin{aligned} u_x &= B_x - \frac{1}{4(1-\nu)} \frac{\partial}{\partial x} (xB_x + yB_y + \beta) + \alpha_1, \\ u_y &= B_y - \frac{1}{4(1-\nu)} \frac{\partial}{\partial y} (xB_x + yB_y + \beta) + \alpha_2, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

bu yerda B_x , B_y va β - xajmiy kuchlarni xisobga olmaganda, Laplas tenglamasini qanoatlantiradiga Papkovich funksiyalari. Papkovich funksiyalar to'plamini ikkita

xususiyl shaklini tanlash qulay bo'radi, ulardan biri jismga ko'ndalang yuklardan xoli $y=0$ tekislikda mos keladigan, ikkinchisi esa o'sha tekislikda normal kuchlardan xoli. Bu ikkala aniq yechim (1.1) tenglamalarni tekis deformatsiya uchun kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik munosabatiga qo'yish yo'li bilan topiladi va B_x , B_y va β larni shunday tanlash kerakki, $y=0$ da yoki $\sigma_{xy}=0$, yoki $\sigma_{yy}=0$ bo'lsin. Papkovich funksiyalarini ushbu ko'rinishda tanlasak:

$$\left. \begin{aligned} B_x &= 0, \\ B_y &= 4(1-\nu)\frac{\partial\phi}{\partial y}, \\ \beta &= 4(1-\nu)(1-2\nu)\phi, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

bu yerda $\Delta\phi=0$, ko'chishlar va kuchlanishlarni quyidagi garmonik funksiya ko'rinishda ifodalanish mumkin:

$$\left. \begin{aligned} u_x &= -(1-2\nu)\frac{\partial\phi}{\partial x} - y\frac{\partial^2\phi}{\partial x\partial y} + \alpha_1, \\ u_y &= 2(1-\nu)\frac{\partial\phi}{\partial y} - y\frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} + \alpha_2, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx} &= 2G\left(\frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} + y\frac{\partial^3\phi}{\partial y^3}\right) - \sigma_{xx}^{pl}, \\ \sigma_{yy} &= 2G\left(\frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} - y\frac{\partial^3\phi}{\partial y^3}\right) - \sigma_{yy}^{pl}, \\ \sigma_{xy} &= -2Gy\frac{\partial^3\phi}{\partial x\partial y^2} - \sigma_{xy}^{pl}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Agar Papkovich funksiyalarini ushbu ko'rinishda kiritsak:

$$\left. \begin{aligned} B_x &= 0, \\ B_y &= 4(1-\nu)\frac{\partial\chi}{\partial x}, \\ \beta &= 8(1-\nu)^2\frac{\partial\chi}{\partial x}dy, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

bu yerda $\Delta\chi=0$, ko'chishlar va kuchlanishlarni quyidagi garmonik funksiya ko'rinishda ifodalanish mumkin:

$$\left. \begin{aligned} u_x &= 2(1-\nu)\frac{\partial\chi}{\partial y} + y\frac{\partial^2\chi}{\partial y^2} + \alpha_1, \\ u_y &= (1-2\nu)\frac{\partial\chi}{\partial x} - y\frac{\partial^2\chi}{\partial x\partial y} + \alpha_2, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx} &= 2G \left(2 \frac{\partial^2 \chi}{\partial x \partial y} + y \frac{\partial^3 \chi}{\partial x \partial y^2} \right) - \sigma_{xx}^{pl}, \\ \sigma_{yy} &= -2Gy \frac{\partial^3 \chi}{\partial x \partial y^2} - \sigma_{yy}^{pl}, \\ \sigma_{xy} &= 2G \left(\frac{\partial^2 \chi}{\partial y^2} + y \frac{\partial^3 \chi}{\partial y^3} \right) - \sigma_{xy}^{pl}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Yuqoridagi tenglamalarni va cheksiz muhit uchun yoriq atrofida ($y=0$ da $x=-a$ ba $x=a$) quyidagi chegaraviy shartlarni qanoatlantiradigan funksiyalar aniqlangan.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xy}(x,0) &= 0, \quad -\infty < x < \infty, \\ u_y(x,0) &= 0, \quad |x| > a, \\ \lim_{y \rightarrow 0_+} u_y(x,y) - \lim_{y \rightarrow 0_-} u_y(x,y) &= D_y, \quad |x| < a, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \phi(x,y) &= \frac{D_y}{4\pi(1-\nu)} \left[y \arctan\left(\frac{x+a}{y}\right) - y \arctan\left(\frac{x-a}{y}\right) + \right. \\ &\quad \left. (x+a) \ln \left[(x+a)^2 + y^2 \right]^{\frac{1}{2}} - (x-a) \ln \left[(x-a)^2 + y^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right], \end{aligned} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{yy}(x,0) &= 0, \quad -\infty < x < \infty, \\ u_x(x,0) &= 0, \quad |x| > a, \\ \lim_{y \rightarrow 0_+} u_x(x,y) - \lim_{y \rightarrow 0_-} u_x(x,y) &= D_x, \quad |x| < a, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \chi(x,y) &= \frac{D_x}{4\pi(1-\nu)} \left[y \arctan\left(\frac{x+a}{y}\right) - y \arctan\left(\frac{x-a}{y}\right) \right. \\ &\quad \left. + (x+a) \ln \left[(x+a)^2 + y^2 \right]^{\frac{1}{2}} - (x-a) \ln \left[(x-a)^2 + y^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

Birinchi bob chegaraviy integral tenglamalar yechimining mavjudligi va yonaligini isboti bilan tugagan.

Dissertatsiyaning “Uzlukli ko‘chishlar sonli usuli” deb nomlangan ikkinchi bobida sonli usulning qo‘llash algoritmi bilan birga olingan natijalarning ishonchliligini ta‘minlash uchun bir qancha mavjud analitik yechimlar bilan solishtirilgan. Turli chegaraviy shartlarda va turli o‘lchamdagi yoriqlarga ega bo‘lgan materiallarda yoriq uchidagi kuchlanishlar grafiklari qurilgan.

Yoriqlar bilan bog‘liq masalalarni ko‘rib chiqishda uzlukli ko‘chishlar usuli juda qulaydir, chunki u fazodagi birlik yoriqqa asoslangan fundamental yechimdan olingan. O‘zgarmas elementlar uchun (har bir element o‘zgarmas deb hisoblanadi), uzlukli ko‘chishlar usuli quyidagicha ifodalanadi:

$$\begin{aligned}
u_x &= D_x [2(1-\nu)f_{,y} - yf_{,xx}] + D_y [-(1-2\nu)f_{,x} - yf_{,xy}] + \alpha, \\
u_y &= D_x [(1-2\nu)f_{,x} - yf_{,xy}] + D_y [2(1-\nu)f_{,y} - yf_{,yy}] + \beta, \\
\sigma_{xx} &= 2GD_x [2f_{,xy} + yf_{,xyy}] + 2GD_y [f_{,yy} + yf_{,yyy}] - \sigma_{xx}^{pl}, \\
\sigma_{yy} &= 2GD_x [-yf_{,xyy}] + 2GD_y [f_{,yy} - yf_{,yyy}] - \sigma_{yy}^{pl}, \\
\sigma_{xy} &= 2GD_x [f_{,yy} + yf_{,yyy}] + 2GD_y [-yf_{,xyy}] - \sigma_{xy}^{pl}.
\end{aligned} \tag{12}$$

bu yerda D_i - uzlukli ko'chish, $f(x, y)$ quyidagicha ifodalanadigan funksiya:

$$\begin{aligned}
f(x, y) = & -\frac{1}{4\pi(1-\nu)} \left[y \left(\arctg \frac{y}{x-a} - \arctg \frac{y}{x+a} \right) - \right. \\
& \left. - (x-a) \ln \sqrt{(x-a)^2 + y^2} + (x+a) \ln \sqrt{(x+a)^2 + y^2} \right]
\end{aligned} \tag{13}$$

Yoriqlarning yo'nalishi tekislikda ixtiyoriy bo'lishi mumkinligi sababli, har bir chegaraviy elementda lokal koordinatalar sistemasidan foydalanilgan. Chegaradagi kuchlanish va ko'chishlarni hisoblashning umumiy formulasi quyidagicha lokal koordinatalar sistemasida yozib olingan:

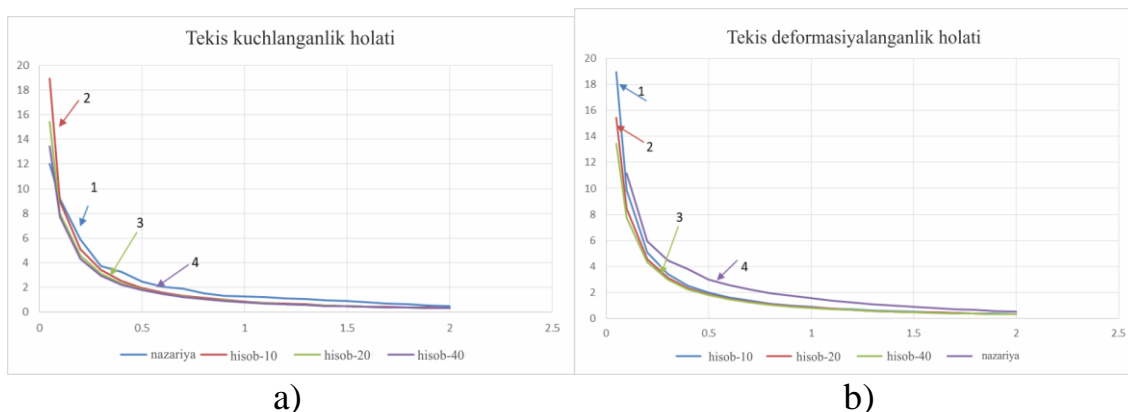
$$\left. \begin{aligned} \sigma_s^i &= \sum_{j=1}^N A_{ss}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N A_{sn}^{ij} D_n^j - \sigma_s^{i(pl)}, \\ \sigma_n^i &= \sum_{j=1}^N A_{ns}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N A_{nn}^{ij} D_n^j - \sigma_n^{i(pl)}, \end{aligned} \right\} \tag{14}$$

$$\left. \begin{aligned} u_s^i &= \sum_{j=1}^N B_{ss}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N B_{sn}^{ij} D_n^j + u_s^{i(o)}, \\ u_n^i &= \sum_{j=1}^N B_{ns}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N B_{nn}^{ij} D_n^j + u_n^{i(o)}. \end{aligned} \right\} \tag{15}$$

Masala yechimi (14) va (15) sistemalardan $2N$ tenglamalarni tanlash va ulardan noma'lum uzlukli ko'chishlarini aniqlash (agar ular masala shartlariga ko'ra berilgan bo'lmasa) yo'li bilan olinadi. Ko'rib chiqilayotgan jimsning chegarasi (va yoriqlar qirg'oqlari) bo'ylab uzlukli ko'chishlar topilib, qolgan qiymatlar chegaradagi va jismning ichki nuqtalaridagi kuchlanishlar va ko'chishlar sifatida aniqlanadi. Bu holda, ichki sohaning bo'laklarga ajratish hech qanday tarzda chegaradagi bo'laklarga bo'lishga bog'liq emas.

Usulni ishonchliligini sinab ko'rish uchun analitik yechimga ega bo'lgan ichki bosim (elastik) bilan yoriqni ochish masalasini ko'rib chiqamiz. Yechim Kolosov tomonidan Gursa formulasi asosida olingan.

(14) va (15) tenglamalar sistemasini $E=2$; $\nu=0.3$; $p=5$; $l=a=1$ (yoriq uzunligining yarmi) qiymatlarda sonli yechib va yoriqni $n=10, 20, 40$ o'zgarmas elementlarga bo'laklab, tekis kuchlanganlik holati va tekis deformatsiyalanganlik holatida yoriqning davom etish chizig'i bo'ylab kuchlanish taqsimoti keltirilgan.

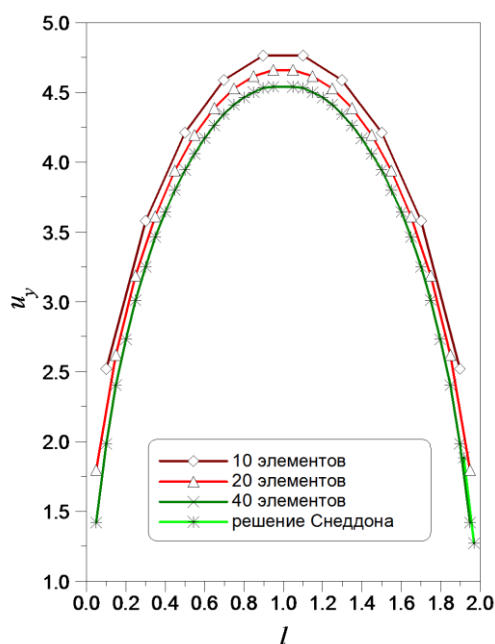


1-rasm. Yoriqning davom etish chizig'i bo'ylab σ_{yy} kuchlanish o'zgarishi

1-rasmdan ko'rinib turibdiki, yoriqning uzunligiga teng masofada bo'laklarning turli zichligida sonli hisob-kitoblar deyarli farq qilmaydi. Yoriq uchi yaqinida (0,11 masofada) tafovutlar sezilarli (30% gacha) va bo'laklar soniga bog'liq. Bo'laklarning zichligi oshishi bilan qiymatlar Gursa hisob-kitoblariga yaqinlashadi (farq 5% gacha).

Shuningdek, olingan yechimning ishonchliligini tekshirish uchun yoriq qirg'oqlarining ko'chishi topilgan. Tekis deformatsiya holatida Sneddon yechimiga asoslangan quyidagi analitik yechim olingan:

$$u_y(x, y=0) = \pm p \frac{1-\nu}{G} \sqrt{2xl - x^2}, \quad 0 \leq x \leq 2l. \quad (16)$$

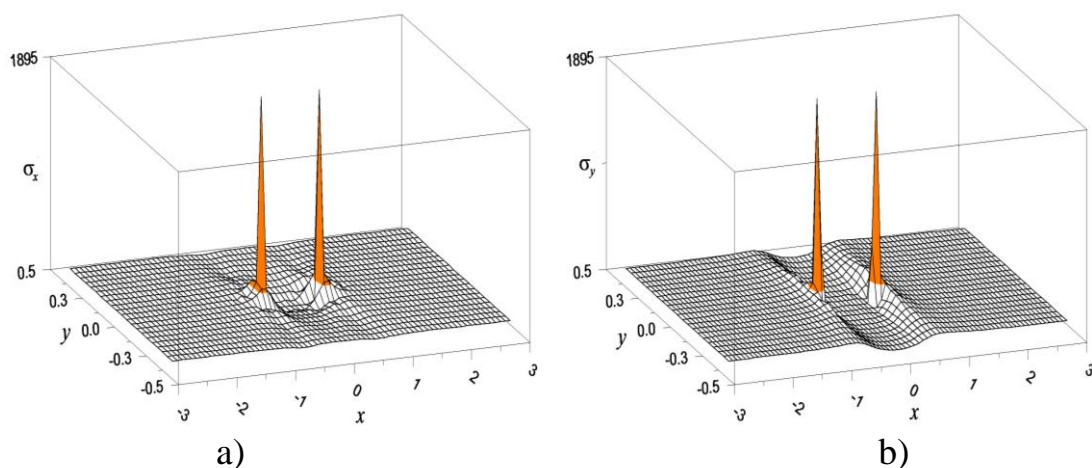


2-rasm. Yoriq qirg'og'ining ko'chishi

Yechimning aniqligi ko'p jihatdan bo'laklashga bog'liq. Yoriqni 40 ta elementga bo'laklasak Sneddonning analitik yechimidan qiymatlar farqi 1% dan oshmasligi, 10 ta elementga bo'linganda, bu farq 4% ni tashkil etishi ko'rsatilgan (2-rasm).

Ko'rib chiqilgan algoritm asosida kuchlarning haqiqiy qiymatlari berilganda cheksiz sohada yoriq masalasi uchun yechim olingan. Cheksizlikda OX va OY o'qlari yo'nalishi bo'yicha 100 MPa cho'zuvchi kuch qo'yilgan. Muhit materiali uchun quyidagi qiymatlar berilgan: $\nu=0.3$, $E=2.00E+5$ MPa. Masala mo'rt buzilish konsepsiyasi (chiziqli buzilish mexanikasi) asosida yechiladi. 3-rasmda tekis kuchlanganlik holatida kuchlanish sirti

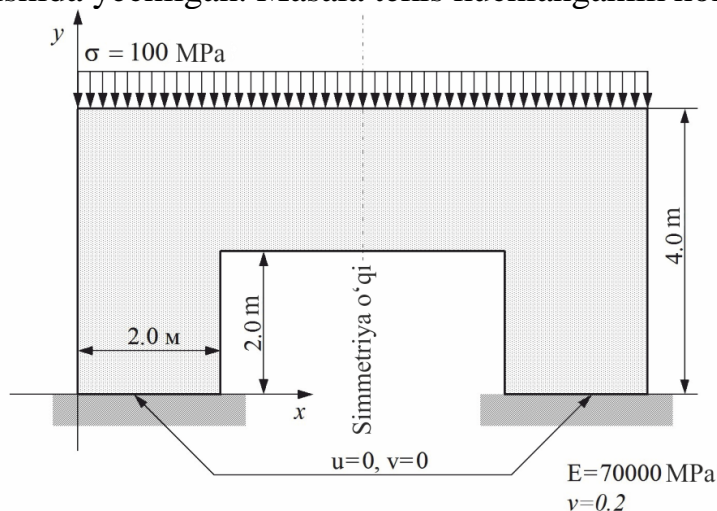
ko'rsatilgan. Kuchlanish taqsimoti yoriq atrofidagi 1×6 m o'lchamdagi sohada berilgan. Yoriq uzunligi 1 m deb qabul qilingan.



3-rasm. Yoriq atrofidagi kuchlanishlar tarqalishi

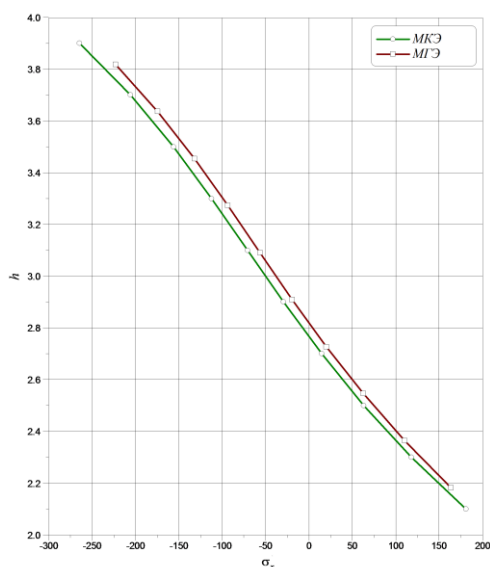
Olingan natijada yoriq chetidagi (kuchlanish konsentratori) oquvchanlik chegarasidan oshib ketadigan kuchlanishning asimptotik o'sishi ko'rsatilgan. Kuchlanish komponentlarining o'sishi yoriq uchida asimptotik tarzda oshishi mo'rt buzilish mexanikasining qoidalariga mos keladi.

To'rtburchaklar devor-ramasi uchun chegaraviy elementlar va chekli elementlar usullari asosida olingan yechimlarni taqqoslaymiz (4-rasm). Bu masala Zenkevich ilmiy ishida yechilgan. Masala tekis kuchlanganlik holatida yechilgan.

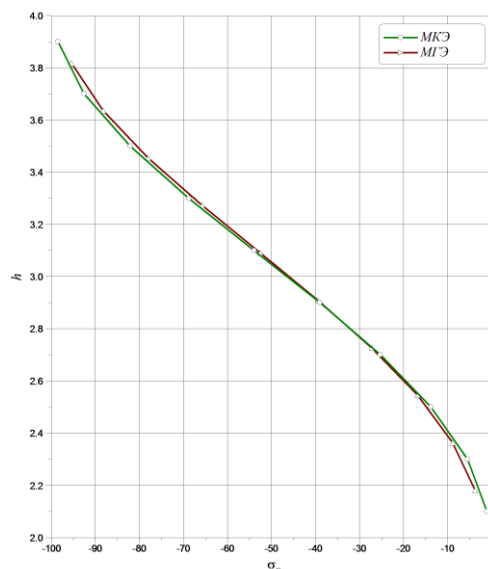


4-rasm. Rama uchun masalani qo'yilishi

Olingan qiymatlar solishtirib aytishimiz mumkinki, natijalar amaliy maqsadlar uchun qoniqarli va farq 10% dan oshmaydi. Shu bilan birga, kesma yaqinidagi farqlar katta nisbiy farqlarga ega, ammo mutlaq ma'noda, grafiklardan ko'rinib turibdiki, ular sezilarli emas (5-rasm).



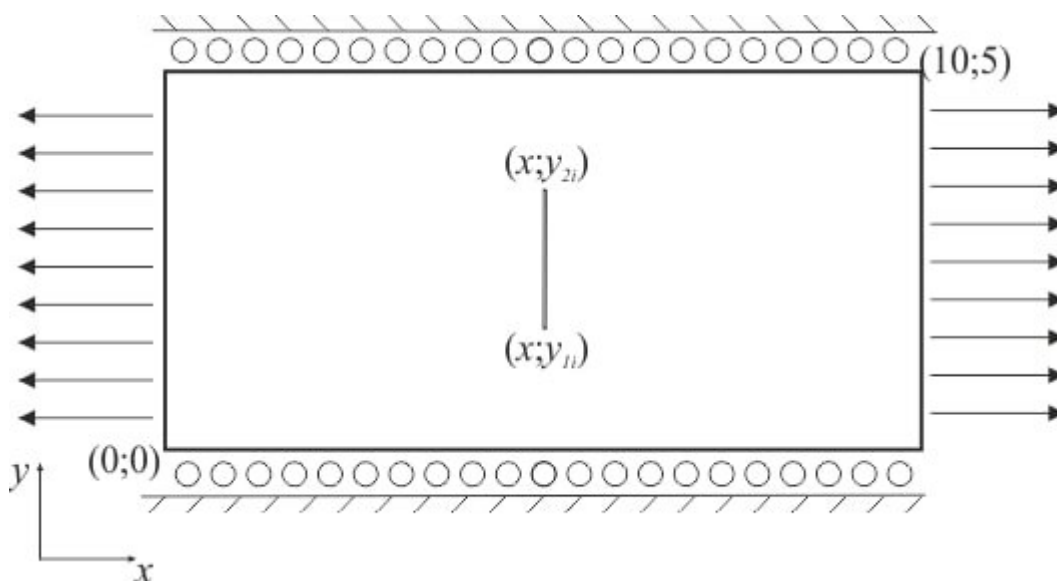
a)



b)

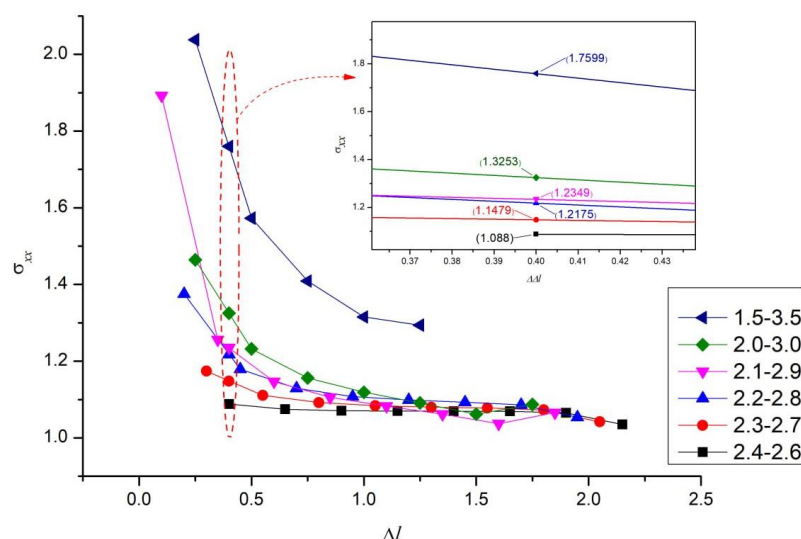
5-rasm. Simmetriya o'qi bo'yicha kuchlanishlar

Kuchlanish konsentratsiyasining yoriq o'lchamiga bog'liqligini ko'rsatish uchun turli uzunlikdagi yoriqlarga ega bo'lgan ($x=5$; $y=l$, $l=0.2$; 0.4 ; 0.6 ; 0.8 ; 1 ; 2) quyidagi masala ko'rilgan (6-rasm).



6-rasm. Dastlabki yoriqqa ega bo'lgan yuklangan plastina

7-rasmda aniq ko'rinib turibdiki, yoriqdan $\Delta l=1$ masofadagi kuchlanishning qiymatlari bir-biriga yaqinlashadi va yoriqning kattaligi ma'lum bir zonadagi kuchlanishlarning taqsimlanishiga ta'sir qilmaydi (Sen Venan prinsipi). Yoriq plastinaning vertikal o'lchamini 40 % ni tashkil etganda, ya'ni yoriq uzunligi $l=2$ bo'lganda istesto xolati kuzatilyapdi. Bunday holda, yoriq allaqachon materialning berilgan o'lchamlari uchun magistral hisoblanadi va uning ta'siri butun jismning kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini taqsimlashda ustunlik qiladi. 20% gacha bo'lgan yoriq o'lchamini chegara deb hisoblash mumkin, uning ta'siri lokal xarakterga ega.



7-rasm. Yoriq uchida normal kuchlanish qiymatining oshishi

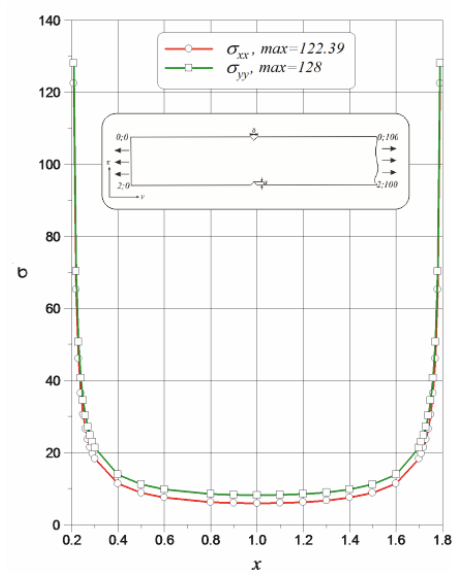
Yoriq uchiga yaqin bo‘lgan kuchlanish qiymatlariga kelsak, bu yerda yoriq hajmining ta’siri kutilganidek muhim rol o‘ynaydi. Yoriq o‘lchami ikki baravar ko‘payganda normal kuchlanish qiymati 5.5% dan 7.7% gacha oshadi (yoriq uchigacha bo‘lgan masofa $\Delta l = 0.4$).

Dissertasiyaning “**Yoriqning siljishiga ta’sir qiluvchi omillarni aniqlash**” nomli uchinchi bobida ishlab chiqilgan uzlukli ko‘chish usuli asosida olingan sonli natijalar keltirilgan. Ushbu usulni amalga oshirish yoriqlar mavjud bo‘lgan materiallarning asosiy xususiyatini ifodalovchi – kuchlanish intensivligi koeffitsientini taxminiy baholashga imkon beradi. Shuningdek, uzlukli ko‘chish usuli ham elastik, ham elastoplastik masalalarni, shu jumladan yoriqlar mexanikasi va tog‘ jinslari mexanikasi masalalarini hal qilishga imkon beradi.

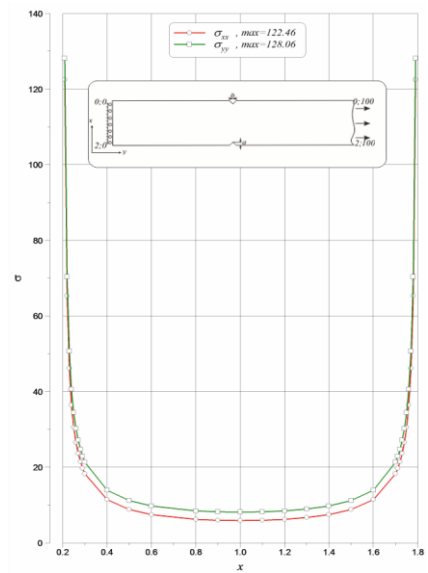
Kuchlanish intensivligi koeffitsientini aniqlashning sonli usuli yoriqning davom etish chizig‘i bo‘ylab kuchlanish qiymatlarini qurish va yoriqning oxiriga yaqinlashganda uning asimptotasini topishga keltiriladi.

Kuchlanish intensivligi koeffitsientini (KIK) aniqlash uchun M. Siratorining ilmiy ishlarida yechilgan quyidagi masala qaraymiz. Masalani (klassik) na’munaning quyidagi fizik va geometrik parametrlari bilan ko‘rib chiqamiz: $P=1$, $E=2$, $\nu=0.27$; $a=0.2$ – qirqim chuqurligi; $\delta=0.1$ – qirqim kengligi. Turli chegaraviy shartlar qo‘llanilgan.

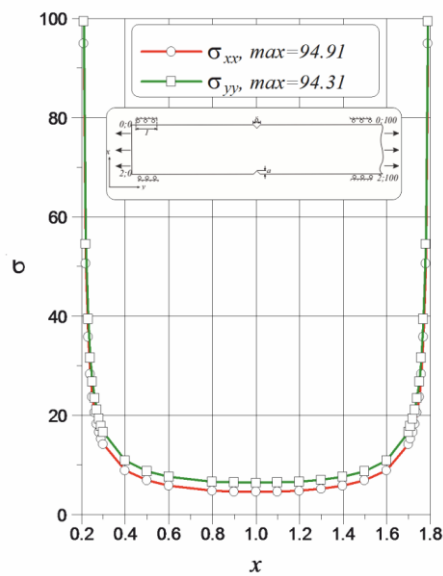
Grafiklardan ko‘rinib turibdiki, yon tarafida bog‘lanish sharnirli bo‘lgan hol yoriqning uchi yaqinidagi kuchlanish (8-rasm) taqsimotiga sezilarli ta’sir qiladi. Umuman olganda, yoriqlar ochilishiga yo‘l qo‘ymaslik uchun, bu mustahkamlash usuli amaliyotda buzilish muammosini vaqtinchalik hal qilish uchun ishlatiladi. 9-rasmda har ikkala normal kuchlanish qiymatlariga asosan uzlukli ko‘chish usuli bilan hisoblangan KIKning qiymatlari va M.Siratori tomonidan olingan yechim keltirilgan.



a)

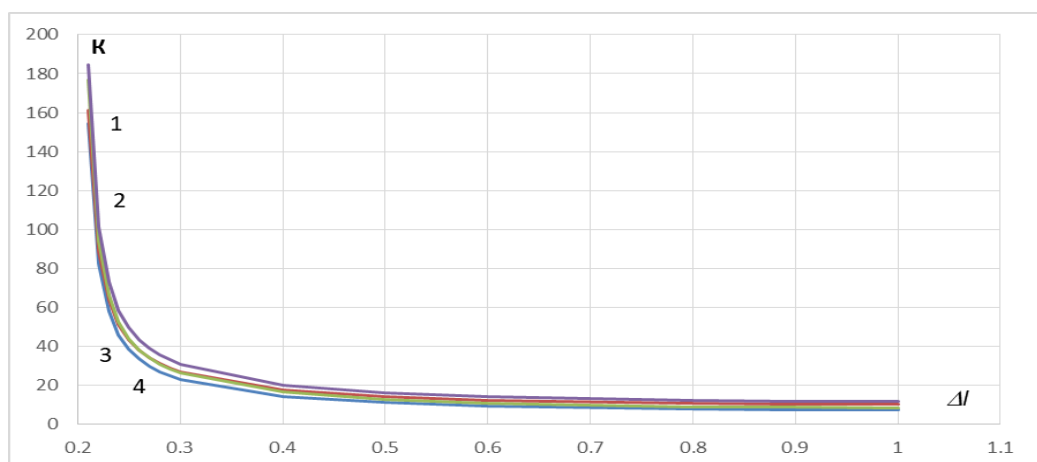


b)



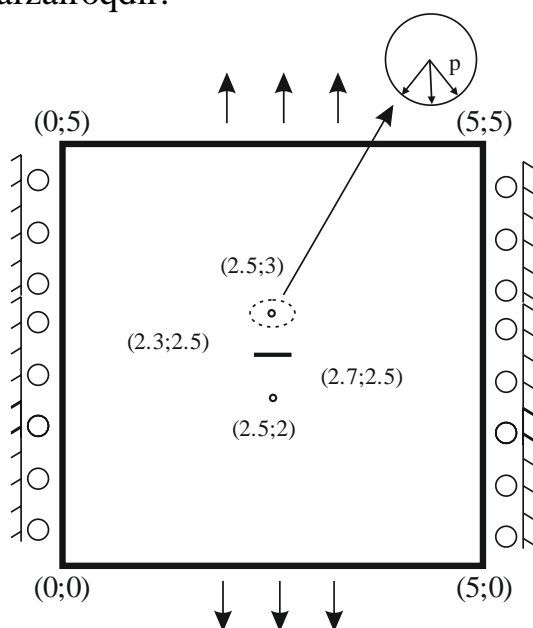
c)

8-rasm. Yoriq chizig'i bo'ylab normal kuchlanishlar



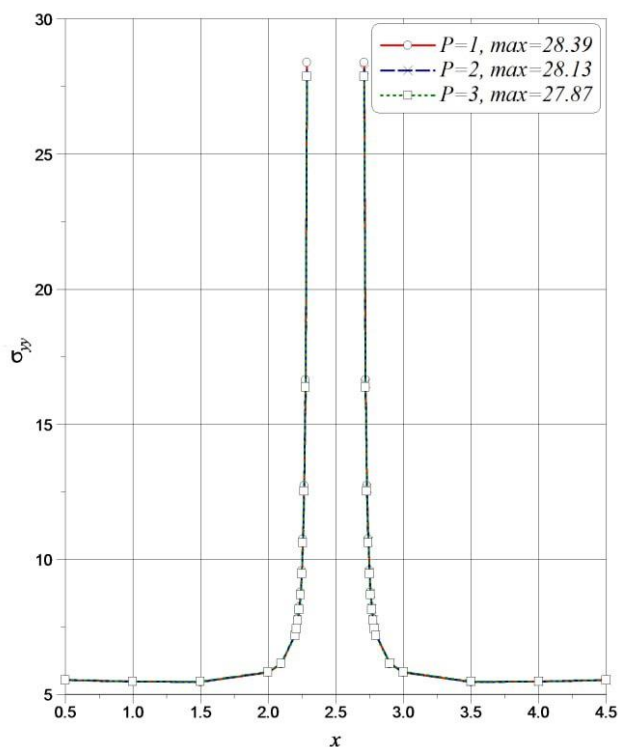
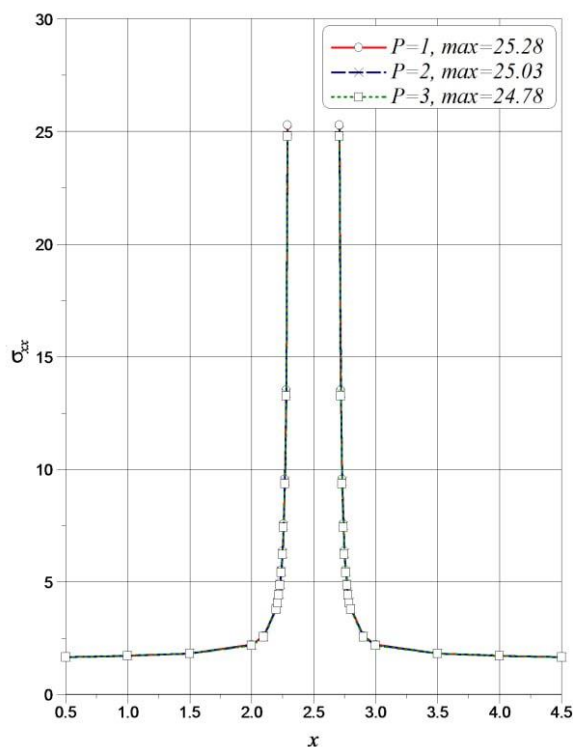
9-rasm. 1- σ_x ni qiymatlaridan formula yordamida topilgan KIK. 2- σ_y ni qiymatlaridan formula yordamida topilgan KIK. 3- σ_x ni qiymatlaridan sonli usulda topilgan KIK. 3- σ_y ni qiymatlaridan sonli usulda topilgan KIK.

Ko'rib turganingizdek, M.Siratori formulasiga asosan olingan natijalar, hisob-kitoblardan olingan qiymatlardan biroz ustundir. Buning sababi shundaki, uzluksiz ko'chishlar usulida kuchlanishlarni hisobga olish ko'chishlarni hisobga olgandan ko'ra kamroq aniqlikka ega va KIK ni ko'chish qiymatlari yordamida topish afzalroqdir.



10-rasm. Bitta markaziy yoriqqa ega bo'lgan na'munaning yuklanishi

Yuqorida keltirilgandek, yon tomonidan sharnir vositasida maxkamlanish cho'zilish (yoki siljish)da kuchlanish konsentratsiyasini kamaytirar ekan, lekin bu yondashuvni doim xam qo'llay olmaymiz. Boshqa yo'lni ko'rib chiqamiz va yoriqning rivojlanishini sekinlashtiradigan qurilmalarni yaratishning umumiy prinsipini aniqlaymiz (10-rasm). Quyida yon tomoni sharnir vositasida bog'langan va yoriq ochilmaslik uchun siquvchi kuch berilgan holatni ko'ramiz. Masalani ushbu fizik va geometrik kattaliklarda ko'rib chiqamiz: $P=5$, $E=2$, $\nu=0.3$; $r=0.1$ – teshik radiusi; p – teshikdagi taqsimlangan siquvchi kuch ($\Delta\alpha=\pi/3$).



11-rasm. p ning turli qiymatlarida solishtirma grafik

11-rasmdan ko'rishimiz mumkinki, tashqi yukning $p=P \cdot 20\%$ miqdorida, taqsimlangan siquvchi kuch oshgani bilan kuchlanish konsentratsiyasining qiymati

sezilarli darajada kamaymayapdi. Bundan teshiklardagi siquvchi kuchning qiymati $p=P \cdot 20\%$ bo'lganda (stringerlar o'rnatiladigan joyda) kuchlanish konsentratsiyasining qiymatlari barqarorlashishi xulosa qilingan. Agar yoriqlar nazariyasi masalalarini yechishda asosiy omil yoriq rivojlanishi boshlanishidagi kuchlanish intensivligi koefitsientini aniqlash bo'lsa, plastik buzilishda yoriq atrofidagi katta plastik zona tufayli to'liq masshtabli parametr - J integral qo'llaniladi. Kichik masshtabdagi oquvchanlik xolatida J - integral va KIK orasidagi bog'lanishni quyidagicha keltirish mumkin:

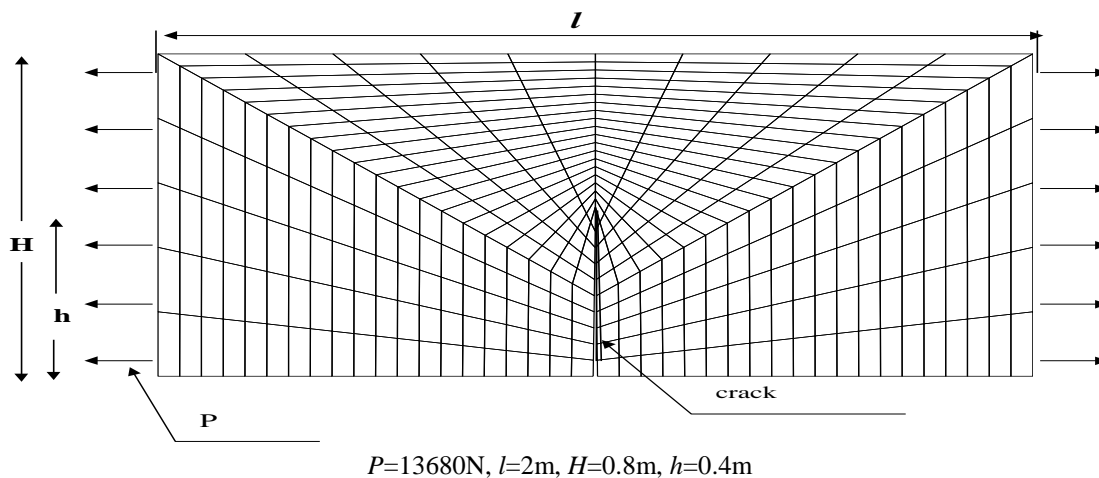
$$\text{TDH uchun } J = \frac{K_I^2}{E} (1 - \nu^2) \text{ va TKH uchun } J = \frac{K_I^2}{E}, \quad (17)$$

Bu yerdan J -integral orqali yoriqning ochilish qiymatlarini topish mumkin

$$\delta = \frac{J}{\sigma_t} = \frac{K_I^2}{E \sigma_t} \text{ yoki } \delta = \frac{4K_I^2}{\pi E \sigma_t}, \quad (18)$$

Tekis taqsimlangan yuklanish ta'siridagi bitta chegaraviy yoriqqa ega bo'lgan na'munani cho'zilishi masalasini ko'ramiz (12-rasm):

$$\sigma = \frac{E \cdot \sigma_t (\varepsilon + C)}{\sigma_t + E \cdot C} \text{ bu yerda } C=0.2333, E=206 \text{ ГПа } (2.1 \cdot 10^6 \text{ КГ/см}^2), \nu=0.3, \sigma_t=480 \text{ МПа } (4900 \text{ КГ/см}^2).$$



12-rasm. Yoriqqa ega bo'lgan plastina sxemasi

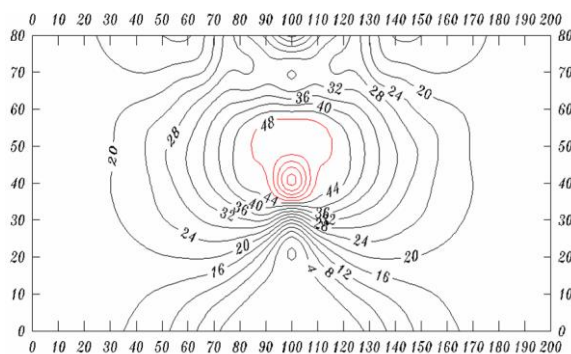
Bu hol uchun ham KIK M.Siratori ishlarida jadval ko'rinishida keltirilgan:

$$K_I = F(l/H) p \sqrt{\pi l} \quad (19)$$

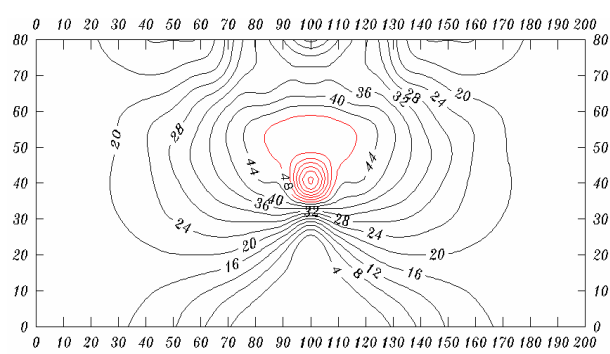
$$\text{bu yerda } F = 1.12 - 0.231 \frac{l}{H} + 10.55 \left(\frac{l}{H} \right)^2 - 21.72 \left(\frac{l}{H} \right)^3 + 30.39 \left(\frac{l}{H} \right)^4.$$

Yoriqning uchida plastik oquvchanlik kuzatiladi. Yuqoridagi formuladan $K_I=43343.17 \text{ N/m}^{1.5}$ KIK hisoblangan.

$$J = \frac{K_I^2}{E} \approx 9.11 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/м}^2, \delta = \frac{J}{\sigma_t} = \frac{K_I^2}{E \sigma_t} \approx 19 \cdot 10^{-6} \text{ m (ruxsat etilgan chegara 0.2mm)}.$$



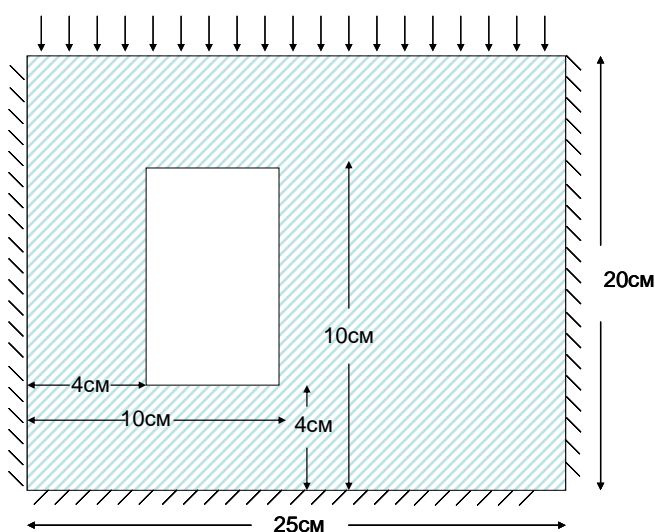
13-rasm. Kuchlanish intensivligi izolinasi (Prandtl nazariyasi)



14-rasm. Kuchlanish intensivligi izolinasi (Ilyushin nazariyasi)

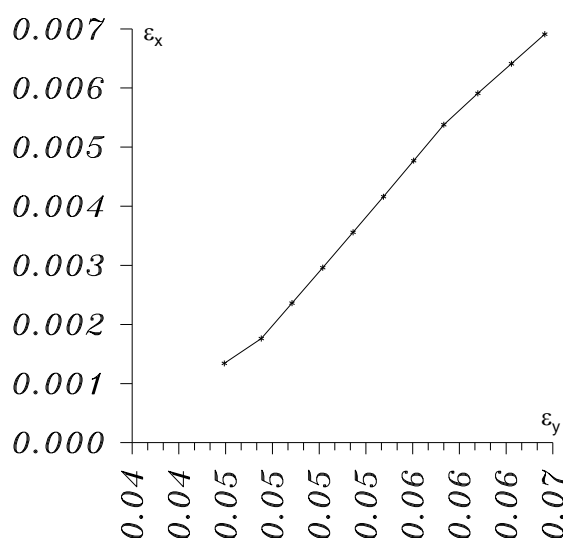
Prandtl-Reyss, Prager nazariyalari bo'yicha va Ilyushinning plastiklikning deformatsiya nazariyasi bo'yicha hisob-kitoblar ularning farqini ko'rsatdi va shuning uchun bu masalada oddiy yuklanish shartlari kuzatilmaydi (13-14-rasm).

Keyingi masala sifatida muntazam parallel yoriqlarga ega bo'lgan tog' jinslari qarang. Ishlab chiqilgan metodika asosida masala yechiladi va anizotrop muhit sifatida qaranganda jismdagi kuchlarning taqsimlanishi ko'rsatilgan. Masalada quyidagi qiymatlar qabul qilinadi: $E_x=10^4\text{MPa}$, $E_y=1.2\cdot 10^4\text{MPa}$, $\nu_{xy}=0.2$, $G_{xy}=5000\text{MPa}$, anizotropiya o'qi og'ish burchagi 45° (15-rasmda ko'rsatilganidek), $p_y=-5000\text{ KPa}$. Barcha anizotropiya bo'ylab urunma moduli bir xil $G_k=0.1G_{xy}$, $\sigma_t=100\text{MPa}$.

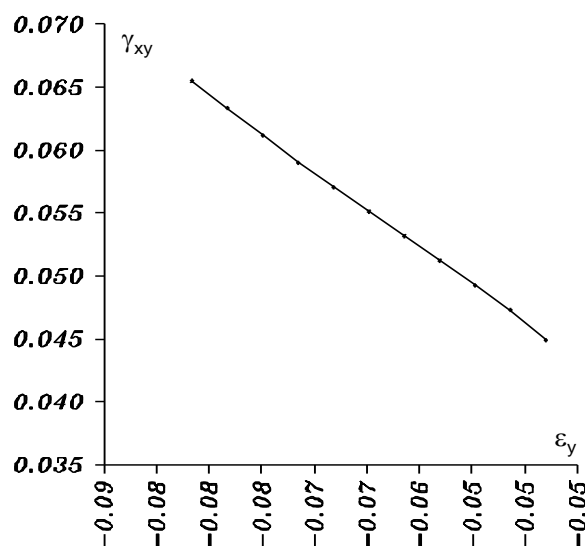


15-rasm. Muntazam yoriqlar tizimiga ega bo'lgan massiv

Masalada bir parametrlı yuklanish bo'lgani uchun, deformatsiya trayektoriyalari oddiy yuklashga yaqin bo'ladi. Hisoblash natijalarini 16-17 rasmlarda ko'rish mumkin ($x=3.8$, $y=3.8$, deformatsiya qiymatlari modul bo'yicha olinadi). Qirqim bo'lishiga qaramay, yuklanish trayektoriyasi oddiy yuklanishga yaqin ekanligini ko'rish mumkin.



16-rasm. $\varepsilon_y \sim \varepsilon_x$ deformatsiya traektoriyasi



17-rasm. $\varepsilon_y \sim \gamma_{xy}$ deformatsiya traektoriyasi

Bu shuni ko'rsatadiki, bu ko'rinishdagi yuklanish ostida kuchlanish konsentratorining mavjudligi deformatsiya trayektoriyasiga kam ta'sir qiladi.

XULOSA

“Plastik deformatsiyani hisobga olgan holda yoriqlarga ega bo'lgan materiallarni mustahkamligini hisoblash usulini ishlab chiqish” mavzusi falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi bo'yicha olib borilgan tadqiqotlar natijalari asosida quyidagi xulosalar taqdim etildi:

1. Yoriqlarga ega bo'lgan plastinalarda kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini aniqlashga doir noxiziqli masala shakllantirilgan va chikli soha uchun yechish usuli ishlab chiqilgan hamda unga asoslangan chegaraviy integral tenglamaning mavjudligi va yagonaligi to'g'risidagi teorema isbotlangan;

2. Uzlukli ko'chishlar usuliga asoslangan elastoplastik masalalarni yechishning sonli usuli takomillashtirildi. Takomillashtirilgan usul cheksiz ikki o'lchovli muhitda yoriq tizimlarini modellashtirish algoritmining tavsifini berish imkonini berdi.

3. Kuchlanish konsentratsiyasining yoriq uzunligiga bog'liqligi asoslandi va dastlabki yoriq (kuchlanish konsentratori) mavjud bo'lgan hol uchun chegaraviy shartlarining kuchlanish konsentratsiyasiga ta'siri aniqlangan.

4. Olingan natijalarga asosan bitta markaziy yoriqqa ega bo'lgan materiallarni mustahkamlash usuli taklif qilindi va kichik o'lchamdagi oquvchanlikda J -integralni sonli baholash amalga oshirildi.

5. Elastoplastik masala uzlukli ko'chish usuli asosida yechildi va murakkab yuklanishning deformatsiya traektoriyalari qurildi. Olingan natijalar

asosida kuchlanish konsentratori yaqinidagi yuklash jarayonlarining murakkablik darajasi ko'rsatildi.

6. Anizotrop muhit sifatida muntazam yoriqlar tizimiga ega bo'lgan materiallarni hisoblash usuli keltirildi. Keltirilgan usul tog' tunnellari misolida yangi kuchlanish konsentratorining paydo bo'lishi umumiy konstruksiyaning kuchlanish taqsimotiga ta'sirini baholash imkonini beradi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ МЕХАНИКИ И
СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ**

ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ И СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ

АДИЛОВ ФАРХАДЖАН ФОЗИЛЖОНОВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ
ТРЕЩИНОВАТЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ПЛАСТИЧЕСКОГО
ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)
ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент – 2024

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована Высшей аттестационной комиссией при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за № B2022.4.PhD/FM511

Диссертация выполнена в Институте механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева Академии наук Республики Узбекистан.

Афтореферат диссертации на трех языках (узбекском, русском, английском) размещен на веб-странице Научного совета (www.instmech.uz) и информационно-образовательном портале "Ziyonet" (www.ziyonet.uz).

Научный руководитель:

Абиров Рустам Абдуллаевич
доктор физико-математических наук, с.н.с.

Официальные оппоненты:

Ахмедов Акрам Бурханович
доктор физико-математических наук,
профессор

Абдусатторов Абдусамат
доктор технических наук, профессор

Ведущая организация:

Ташкентский архитектурно-строительный университет

Защита диссертации состоится «21» февраль 2024 года в 14⁰⁰ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019. T/FM.61.01 при Институте механики и сейсмостойкости сооружений Адрес: 100000, г. Ташкент, ул. Дурман йули, 33, зал заседаний – 1. Тел.:(99871) 262-71-52; факс:(99871) 262-71-32, e-mail: instmech@academy.uz.

С диссертацией (PhD) можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института механики и сейсмической стойкости сооружений (регистрационный номер -19). Адрес: 100000, г. Ташкент, ул. Дурман йули, 33. Тел. (99871) 262-71-32.

Автореферат диссертации разослан «2» февраль 2024 года.
(реестр Протокола рассылки № 19 от «2» февраль 2024 года)



М.М. Мирсаидов
Председатель Научного совета по
присуждению ученых степеней,
д.т.н., профессор, академик АН РУз

М.К. Усаров
Ученый секретарь Научного совета
по присуждению ученых степеней,
д.ф.-м.н., профессор

Б.Э. Хусанов
Председатель Научного семинара при
Научном совете по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., с.н.с.

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире в сфере сейсмостойкого строительства, авиастроении, машиностроении и др. встречается проблемы, связанные с решением задач накопления повреждений и развития трещин в материалах. Исследование проблем прочности и разрушения твердых тел, трещиностойкости новых материалов в настоящее время представляется важной проблемой как в теоретическом, так и в прикладном аспектах. Во многом это связано не только с теоретическими изысканиями, но и широким набором проводимых экспериментальных исследований.

В мире особое внимание уделяется проведению научно-исследовательских работ по построению, а также обоснованию математических моделей возникновения и распространения трещин в упругой или пластической средах под воздействием внешней нагрузки, а также численных методов решения этих задач. Развитие трещин в строительстве, трубопроводном транспорте, энергетическом секторе, машиностроении приводит к колоссальным экономическим потерям. Оценка напряженно-деформированного состояния тел, имеющих особенность на фронте трещины, при моделировании распространения трещины является одной из необходимых задач, требующих своего решения при обеспечении прочности конструкции. Отчасти эти задачи могут быть решены с помощью методов предлагаемых в данном исследовании.

В нашей республике на сегодняшний день большое внимание уделяется внедрению новых методов обеспечения сейсмической безопасности населения и повышению сейсмостойкости различных сооружений. В указе Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года УП-60 “О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы”², в том числе с учетом « ...”точек роста” регионов особое внимание уделяется строительству объектов инженерно-коммуникационной и социальной инфраструктуры...», определены важнейшие задачи. При их реализации из необходимых задач рассматриваются исследования по разработке эффективных методов обеспечения герметичности объектов с использованием нового типа фибробетона, базальта и других материалов.

Данное диссертационное исследование в определенной степени отвечает УП № 144 от 30 мая 2022 года “О мерах по дальнейшему совершенствованию системы сейсмической безопасности Республики Узбекистан”, ПП-158 от 16 мая 2023 года “О дополнительных мерах по дальнейшему совершенствованию системы сейсмической безопасности населения и территории Республики Узбекистана”, а также служит в реализации задач, поставленных в ПП-4794 от 30 июля 2020 года “О мерах по коренному совершенствованию системы обеспечения сейсмической безопасности

² Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года УП-60 «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы»

населения и территории Республики Узбекистан” и других нормативно-правовых актах, связанных с данной деятельностью.

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

Степень изученности проблемы. В настоящее время ведется ряд научно-исследовательских работ по расчету прочности материалов с трещинами с учетом пластической деформации, в том числе такими учеными: В.М. Корнев, Л.А. Костырева, М.Н. Перельмутер, А.В. Савиновский, Е.А. Артамонова, Д.А. Пожарский, В.М. Мирсалимов, В.И. Смирнов, А.А. Ашрабов, Ю.В. Зайцев, S.S. Mayer, P. Bandil, D. Khan, W. Cao, Q. Lei, P. Fedelinski, B. Gommerstadt, L. Igumnov, W. Becker. H. Noguchi, Y. Furuya, S. Tanaka, H. Wong, H. Zhou и другие провели значительную научную работу и достигли определенного уровня научных результатов.

Начало научному изучению трещин в материалах и основам механики разрушения была заложен в пионерской работе Гриффитса (A. Griffith). Он в своей работе представил результаты исследования разрушения стеклянных образцов. Предполагалось, что под действием внешней нагрузки в теле запасается потенциальная энергия упругой деформации, а при срабатывании трещины некоторая часть потенциальной энергии освобождается. Гриффитс в своей работе показал, что рост трещины возможен только в том случае, если при её росте выделится больше энергии, чем требуется для образования новых поверхностей при росте трещины (то есть для разрыва межатомных связей в вершине трещины). Этот подход получил название энергетического критерия хрупкого разрушения. Именно этот подход хрупкого разрушения был развит в работах Г.П. Черепанова и его научной школы: Е.Ф. Афанасьев, А.А. Борзых, А.С. Быковцев, А.Б. Каплун, Л.А. Кипнис, В.Д. Кулиев, В.М. Мирсалимов, Е.М. Морозов, В.З. Партон, В.М. Смольский, I.E. Esparragoza, Qin Ma и др.

Значительный вклад в теорию и практику механики разрушения внесли G.R. Irwin, M.P. Wnuk, E. Orowan, J.R. Rice, H.D. Bui, Hutchinson, H. Liebowitz, Guy Pluvinage, C.B. Серенсен, Г.И. Баренблатт, Ю.Н. Работнов, Л.М. Качанов, Л.И. Слепьян, Е.И. Шемякин, М.Я. Леонов, Н.Ф. Морозов, А.Е. Андрейкив, В.Р. Скальский, М.П. Саврук, Э.И. Старовойтов, Н.А. Махутов, С.Н. Леонович и др.

В нашей республике работы в изучении системы возникновения и распространении трещин в сейсмологических задачах проводились Быковцевым А.С., Тавбаевым Ж.С., Краморовским Д.Б. и др. Задачи с возникновением повреждений при малоцикловом нагружении элементов конструкций исследованы Старовойтовым Э.И. и Абдусаттаровым А. В общем и целом, развитие механики трещин и решение задач упругопластического разрушения требуют системного подхода. Во многом решение данного рода задач с возникновением и развитием трещин проводят

в экспериментальных лабораториях, в коих в нашей республике на данный момент есть пробел.

Связь диссертационной работы с планом научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где она выполнена. Диссертационное исследование выполнено в рамках плана научно-исследовательских работ Института механики и сейсмостойкости сооружений по темам: ФА-Ф-4-004 «Экспериментальное и теоретическое исследование упругопластического деформирования конструкционных материалов при процессах сложной деформации» (2017-2020), ФА-Атех-2018-24 «Разработка прикладных методов расчета на прочность сооружений с наличием накопленных повреждений и подготовка предложений по их укреплению» (2017-2020).

Целью исследования является разработка методов расчета элементов конструкций с учетом реальных свойств материалов, накопленных повреждений в виде трещин. Намечено создание и реализация моделей по расчету трещиноватых конструкций в условиях сложного напряженного состояния и сложного нагружения, характерных для материалов с накопленными повреждениями и скальных пород.

Задачи исследования:

постановка нелинейной задачи по определению напряженно-деформированного состояния пластин с трещинами;

разработка метода расчета нелинейной задачи, сформулированной для материалов с концентраторами напряжений на основе фундаментального решения в перемещениях;

формулировка задачи на основе метода разрывных смещений с учетом нелинейных деформаций и обоснование разработанного метода решения задачи;

определить зависимости уровня концентрации напряжений от размера трещины и граничных условий;

смоделировать метод решения задачи при наличии в нем системы регулярных трещин.

Объектом исследования является поведение материалов с наличием концентраторов напряжений или начальных трещин, а также их прочностные свойства.

Предметом исследования является исследование закономерностей и особенностей процессов развития трещины в зависимости от свойств материала, развитие математических моделей и методов решения задач теории разрушения в плоской постановке.

Методы исследования В процессе исследований были использованы методы механики деформируемого твердого тела, методы граничных интегральных уравнений, численные методы линейной алгебры.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

сформулирована нелинейная задача определения напряженно-деформированного состояния пластин с трещинами и разработан метод

решения задач на основе метода граничных элементов на основе фундаментального решения Папковича-Нейбера;

впервые сформулирована постановка метода разрывных смещений и его численная реализация с учетом нелинейного деформирования на основе фундаментального решения задачи теории упругости в перемещениях;

по результатам расчетов, основанных на численном решении плоской задачи о развитии трещин, предложена графически зависимость величины концентрации напряжений от размера трещины, а также определена степень зависимости граничных условий на концентрацию напряжений в теле в окрестности кончика трещины;

тело с наличием системы регулярных трещин смоделировано как анизотропная среда, предложена численная схема ее решения на основе метода граничных интегральных уравнений и на ее основе получены численные результаты решения краевой задачи.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

разработаны методы расчета плоских задач при наличии в них концентраторов напряжений;

разработан метод и программа определения напряженного состояния с учетом пластического деформирования материалов в телах с наличием трещин;

на основе результатов расчетов предложены методы укрепления материалов с наличием концентраторов напряжений с целью ограничения развития трещин.

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных результатов обосновывается корректным использованием методов решения сингулярных интегральных уравнений, сравнением полученных результатов с аналитическими решениями и экспериментальными данными, а также сопоставлением с решениями других авторов. Результаты исследований опубликованы в ряде зарубежных статей, в том числе входящих в международные базы Scopus и WoS.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость диссертационной работы определяется следующим: математически обосновано применение метода разрывных смещения для расчета прочностных свойств материалов;

разработаны методы расчета упругих, упругопластических задач для тел с наличием начальных повреждений в виде концентраторов напряжений.

Практическая значимость работы заключается в определении степени влияния наличия трещин и систем трещин на прочностные свойства материала.

Внедрение результатов исследований.

На основе полученных в диссертационной работе результатов по разработке метода расчета на прочность трещиноватых материалов с учетом пластического деформирования предложены следующие практические рекомендации:

разработана методика прочностного расчета материалов с наличием начальных трещин и концентраторов напряжений, в том числе в бетоне, металлах, композитных панелях и т.д. При применении разработанной методики оценки технического состояния жилых объектов и их укреплении трудовые затраты снижены в 1.2 раза и снижена вероятность возможного разрушения данных объектов;

методика и расчеты применены для недопущения распространения начальных или возникших усталостных трещин при постоянно действующих статических нагрузках;

расчет степени накопленной поврежденности композиционных материалов и расчет их параметров теоретическими способами позволили повысить экономическую эффективность на 18% по сравнению с исследованиями путем проведения экспериментов;

результаты исследований внедрены в УП «FARPI NITECH ENGINEER» при Ферганском политехническом институте при оценке сейсмостойкости конструкций 5-этажного жилого дома, расположенного на улице С. Темирова МФЙ Ш.Рашидова дом №57 в городе Фергана. (Справка министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Республики Узбекистан от 22 июня 2023 года № 24-06 / 6801).

Апробация результатов исследования. Результаты исследований были апробированы на 14 научных конференциях, в том числе обсуждены на 11 международных и 3 республиканских научно-технических конференциях и семинарах.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликованы всего 21 научных работ. Из них 16 научных статей, в том числе 5 в республиканских и 11 в зарубежных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций доктора философии (PhD).

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Объем диссертации составляет 121 страниц и включает 70 рисунков, 1 таблицу и список цитируемой литературы из 185 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, показано соответствие исследования с приоритетными направлениями развития науки и техники республики, определены цели и задачи, а также объект исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведена информация о состоянии внедрения результатов, об опубликованных работах и структуре диссертационной работы.

В первой главе диссертационной работы «**Об определении прочности поврежденных материалов**» рассматривается современное состояние критериев прочности механики сплошной среды и механики трещин. По этой

теме было проанализировано множество научных работ. Также приведены методы решения плоских задач для тел с концентраторами напряжений.

Решение для упругой задачи получено в перемещениях (фундаментальное решение) на основе решения Папковича–Нейбера В условиях плоской деформации для направления координаты y компоненты перемещения по осям x и y в однородном, изотропном, линейно-упругом теле запишем следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} u_x &= B_x - \frac{1}{4(1-\nu)} \frac{\partial}{\partial x} (xB_x + yB_y + \beta) + \alpha_1, \\ u_y &= B_y - \frac{1}{4(1-\nu)} \frac{\partial}{\partial y} (xB_x + yB_y + \beta) + \alpha_2, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где ν - коэффициент Пуассона, α_i – добавочные коэффициенты, а B_x , B_y и β - функции Папковича, которые при отсутствии объемных сил удовлетворяют уравнению Лапласа. Будет удобно выбрать две частные формы функции множества Папковича, один набор соответствует телу с плоскостью $y = 0$, свободной от поперечной нагрузки, а другой к телу с той же плоскостью, свободной от нормальных усилий. Эти два конкретных решения находятся путем подстановки уравнений (1) в соотношение напряжение-деформация для плоской деформации и выбирая B_x , B_y и β так, что либо $\sigma_{xy}=0$, либо $\sigma_{yy}=0$ на $y=0$. Опуская подробности, это приводит к следующим результатам: если функции Папковича выбрать в виде:

$$\left. \begin{aligned} B_x &= 0, \\ B_y &= 4(1-\nu) \frac{\partial \phi}{\partial y}, \\ \beta &= 4(1-\nu)(1-2\nu)\phi, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $\Delta\phi=0$, перемещения и напряжения могут быть выражены через гармоническую функцию в виде:

$$\left. \begin{aligned} u_x &= -(1-2\nu) \frac{\partial \phi}{\partial x} - y \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} + \alpha_1, \\ u_y &= 2(1-\nu) \frac{\partial \phi}{\partial y} - y \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \alpha_2, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx} &= 2G \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + y \frac{\partial^3 \phi}{\partial y^3} \right) - \sigma_{xx}^{pl}, \\ \sigma_{yy} &= 2G \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} - y \frac{\partial^3 \phi}{\partial y^3} \right) - \sigma_{yy}^{pl}, \\ \sigma_{xy} &= -2Gy \frac{\partial^3 \phi}{\partial x \partial y^2} - \sigma_{xy}^{pl}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Если функции Папковича принять в виде:

$$\left. \begin{aligned} B_x &= 0, \\ B_y &= 4(1-\nu) \frac{\partial \chi}{\partial x}, \\ \beta &= 8(1-\nu)^2 \frac{\partial \chi}{\partial x} dy, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $\Delta \chi = 0$, перемещения и напряжения могут быть выражены через гармоническую функцию в виде:

$$\left. \begin{aligned} u_x &= 2(1-\nu) \frac{\partial \chi}{\partial y} + y \frac{\partial^2 \chi}{\partial y^2} + \alpha_1, \\ u_y &= (1-2\nu) \frac{\partial \chi}{\partial x} - y \frac{\partial^2 \chi}{\partial x \partial y} + \alpha_2, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx} &= 2G \left(2 \frac{\partial^2 \chi}{\partial x \partial y} + y \frac{\partial^3 \chi}{\partial x \partial y^2} \right) - \sigma_{xx}^{pl}, \\ \sigma_{yy} &= -2Gy \frac{\partial^3 \chi}{\partial x \partial y^2} - \sigma_{yy}^{pl}, \\ \sigma_{xy} &= 2G \left(\frac{\partial^2 \chi}{\partial y^2} + y \frac{\partial^3 \chi}{\partial y^3} \right) - \sigma_{xy}^{pl}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Определены функции, удовлетворяющие приведенным выше уравнениям и следующим граничным условиям вокруг трещины для бесконечных сред ($x=-a$ и $x=a$, при $y=0$).

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xy}(x,0) &= 0, \quad -\infty < x < \infty, \\ u_y(x,0) &= 0, \quad |x| > a, \\ \lim_{y \rightarrow 0_+} u_y(x,y) - \lim_{y \rightarrow 0_-} u_y(x,y) &= D_y, \quad |x| < a, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\phi(x,y) = \frac{D_y}{4\pi(1-\nu)} \left[y \arctan\left(\frac{x+a}{y}\right) - y \arctan\left(\frac{x-a}{y}\right) + \right. \\ \left. (x+a) \ln \left[(x+a)^2 + y^2 \right]^{\frac{1}{2}} - (x-a) \ln \left[(x-a)^2 + y^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right], \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{yy}(x,0) &= 0, \quad -\infty < x < \infty, \\ u_x(x,0) &= 0, \quad |x| > a, \\ \lim_{y \rightarrow 0_+} u_x(x,y) - \lim_{y \rightarrow 0_-} u_x(x,y) &= D_x, \quad |x| < a, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\chi(x, y) = \frac{D_x}{4\pi(1-\nu)} \left[y \arctan\left(\frac{x+a}{y}\right) - y \arctan\left(\frac{x-a}{y}\right) + (x+a) \ln\left[(x+a)^2 + y^2\right]^{\frac{1}{2}} - (x-a) \ln\left[(x-a)^2 + y^2\right]^{\frac{1}{2}} \right] \quad (11)$$

Первая глава заканчивается доказательством существования и единственности решения граничных интегральных уравнений.

Во второй главе диссертации под названием **“Численный метод разрывных смещений”** представлен алгоритм применения численного метода, при этом он сравнивается с несколькими доступными аналитическими решениями для обеспечения достоверности полученных результатов. Построены графики напряжений на вершине трещины для материалов с разными граничными условиями и разными размерами трещин.

Влияние трещин и разломов (геологических разрывов) можно моделировать с помощью метода разрывных смещений. Метод разрывных смещений очень удобен при рассмотрении задач с трещинами, так как использует фундаментальное решение, полученное на основе единичного разрыва в пространстве. Для постоянных элементов (по каждому элементе полагаются постоянными) метод разрывных смещений имеет вид:

$$\begin{aligned} u_x &= D_x [2(1-\nu)f_{,y} - yf_{,xx}] + D_y [-(1-2\nu)f_{,x} - yf_{,xy}] + \alpha, \\ u_y &= D_x [(1-2\nu)f_{,x} - yf_{,xy}] + D_y [2(1-\nu)f_{,y} - yf_{,yy}] + \beta, \\ \sigma_{xx} &= 2GD_x [2f_{,xy} + yf_{,xyy}] + 2GD_y [f_{,yy} + yf_{,yyy}] - \sigma_{xx}^{pl}, \\ \sigma_{yy} &= 2GD_x [-yf_{,xyy}] + 2GD_y [f_{,yy} - yf_{,yyy}] - \sigma_{yy}^{pl}, \\ \sigma_{xy} &= 2GD_x [f_{,yy} + yf_{,yyy}] + 2GD_y [-yf_{,xyy}] - \sigma_{xy}^{pl}. \end{aligned} \quad (12)$$

где D_i - разрывы смещений, $f(x, y)$ – функция, выражаемая следующим образом:

$$\begin{aligned} f(x, y) = & -\frac{1}{4\pi(1-\nu)} \left[y \left(\arctg \frac{y}{x-a} - \arctg \frac{y}{x+a} \right) - \right. \\ & \left. - (x-a) \ln \sqrt{(x-a)^2 + y^2} + (x+a) \ln \sqrt{(x+a)^2 + y^2} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

Так как ориентация трещин может быть произвольная в плоскости, то удобнее пользоваться локальной системой координат на каждом граничном элементе. Общая формула для расчета напряжений и перемещений на границе записывается в локальной системе координат следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_s^i &= \sum_{j=1}^N A_{ss}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N A_{sn}^{ij} D_n^j - \sigma_s^{i(pl)}, \\ \sigma_n^i &= \sum_{j=1}^N A_{ns}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N A_{nn}^{ij} D_n^j - \sigma_n^{i(pl)}, \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} u_s^i &= \sum_{j=1}^N B_{ss}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N B_{sn}^{ij} D_n^j + u_s^{i(o)}, \\ u_n^i &= \sum_{j=1}^N B_{ns}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N B_{nn}^{ij} D_n^j + u_n^{i(o)}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Решение задачи получается для выборки $2n$ уравнений из систем (14)-(15) и проводится определение из них неизвестных разрывов смещений (если они не заданы согласно условиям задачи). Зная разрывы смещений вдоль границы (и берегов трещин) рассматриваемого тела определяются остальные значения как напряжений, так и смещений на границе и во внутренних точках тела. При этом разбивку внутренней области можно никак не связывать с плотностью разбивки границы.

Для апробации метода, рассмотрим задачу о расклинивании трещины внутренним давлением (упругость), имеющую аналитическое решение. Решение было получено Колосовым на основе формулы Гурса.

Численное решение получим решая системы (14) и (15) при значениях $E=2$; $\nu=0.3$; $p=5$; $l=a=1$ (полудлина трещины) и разбивки трещины на $n=10, 20, 40$ постоянных элементов. Рассмотрены случаи ПДС и ПНС. Ниже (рис. 1) приведены распределения напряжений вдоль линии продолжения трещины.

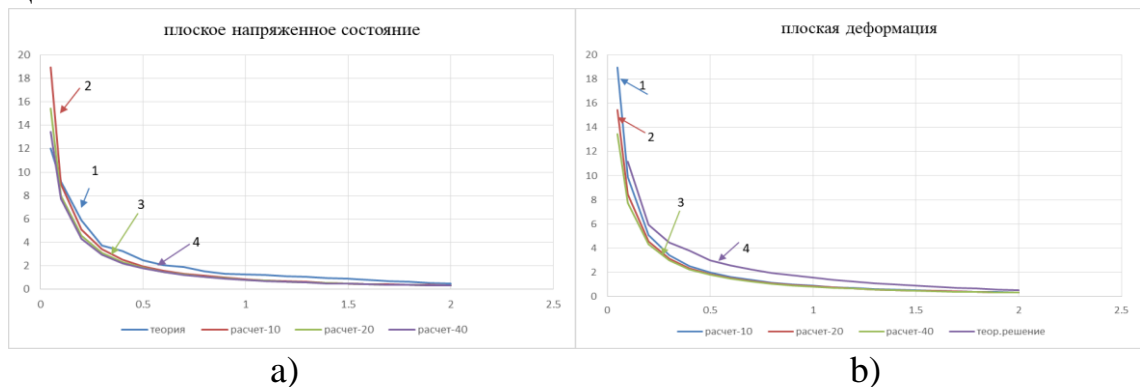


Рис. 1. Изменение напряжений σ_{yy} вдоль линии продолжения трещины

Как можно видеть на расстоянии равном длине самой трещины численные расчеты при различной плотности разбивки практически не имеют отличия. Вблизи кончика трещины (на расстоянии $0.1l$) расхождения значительны (до 30%) и зависят от плотности разбивки. С увеличением плотности разбивки значения сближаются с расчетами Гурса (отличие до 5%).

Также для проверки достоверности полученного решения найдем перемещения берегов трещины. Аналитические решения можно получить на основе решения Снеддона которое для случая плоской деформации имеет вид:

$$u_y(x, y=0) = \pm p \frac{1-\nu}{G} \sqrt{2xl - x^2}, \quad 0 \leq x \leq 2l, \quad (16)$$

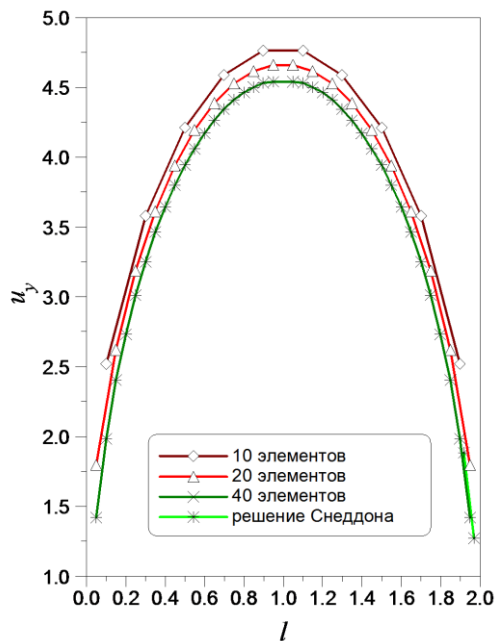


Рис. 2. Смещение берега трещины

характеристики: $\nu=0.3$, $E=2.00E+5$ МПа. Задача решается, основываясь на концепции хрупкого разрушения (линейная механика разрушения). На рис.3 представлены поверхности напряжений в условиях плоского напряженного состояния. Даны распределения напряжений в окрестности трещины 1х6 м. Длина трещины полагалась равной 1м.

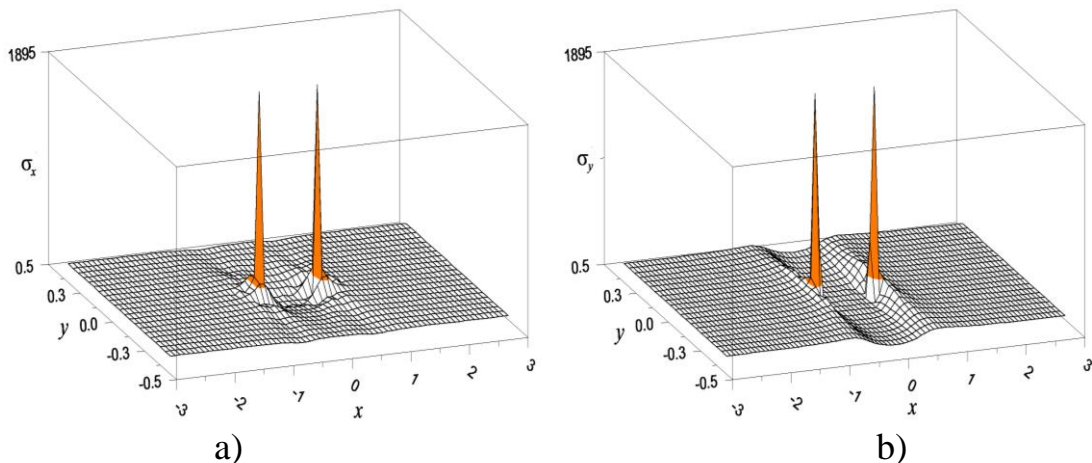


Рис. 3. Распределение напряжений в окрестности трещины

Анализ напряженного состояния показывает асимптотический рост напряжений у кромки трещины (концентратора напряжений) превышающий величину предела текучести. Рост компонент напряжений, асимптотически возрастающий у вершины трещины, соответствует правилам механики хрупкого разрушения.

Сравним решения, полученные на основе МГЭ и МКЭ для прямоугольной рамы-стенки (рис. 4). Данная задача решена в работе Зенкевича. Задача решалась в условиях плоского напряжённого состояния.

Точность решения во многом зависит от разбивки. Отличия значений от аналитического решения Снеддона составляет не более 1% при разбивке нашей трещины на 40 элементов. При разбивке на 10 элементов это отличие доходит до 4%. В целом даже относительная не густая разбивка дает приемлемые результаты (рис. 2).

Далее на основе рассмотренного алгоритма построим решение для задачи с трещиной в бесконечной области с реальными значениями сил. На бесконечности приложим усилия как в направлении оси OX так и оси OY . Величина приложенных сил на бесконечности 100МПа. Материал среды имеет следующие

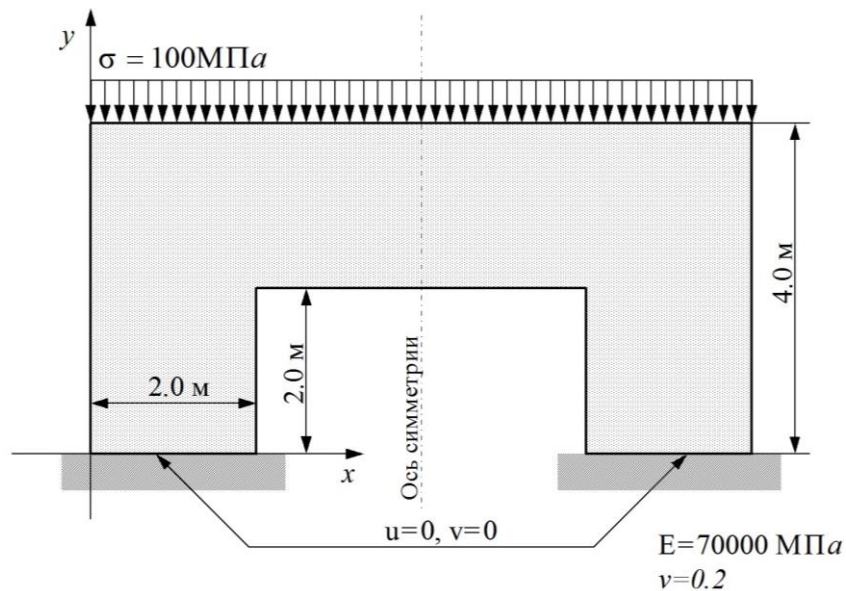
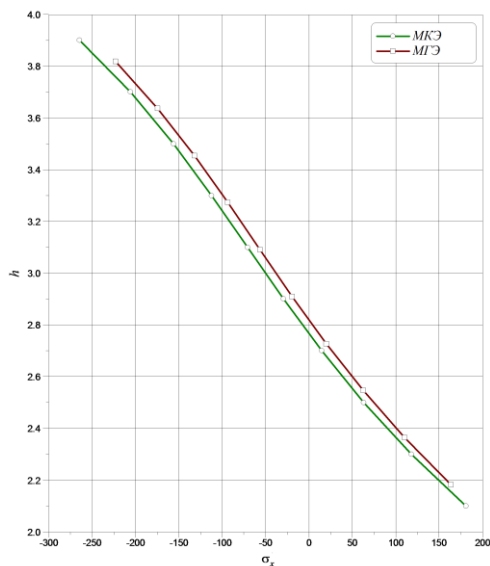
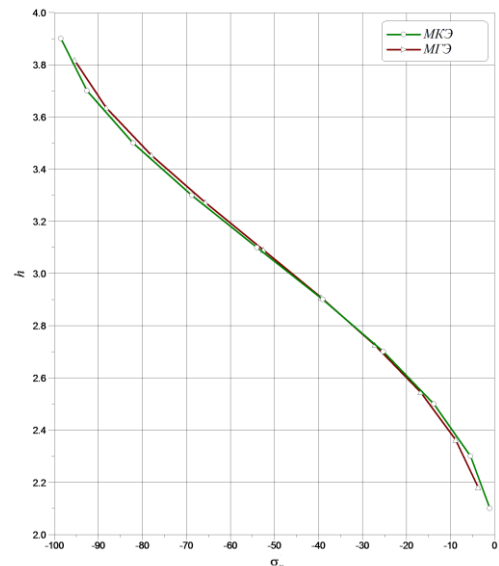


Рис. 4. Постановка задача для рамы



a)



b)

Рис. 5. Значения напряжения по оси симметрии рамы

Значения взяты не в идентичных узлах так как разбивка задач не предполагала совмещение узлов. Сравнивая их, можно сказать, что результаты удовлетворительны для практических целей и составляют отличие не более 10%. При этом отличия вблизи выреза имеют большие относительные отличия, но в абсолютном выражении как видно из графиков они незначительны (рис. 5).

Чтобы показать зависимость концентрации напряжений от размера трещины, рассматривалась следующая задача с трещинами разных размеров ($x=5$; $y=l_i$, $l=0.2$; 0.4 ; 0.6 ; 0.8 ; 1 ; 2) (рис. 6).

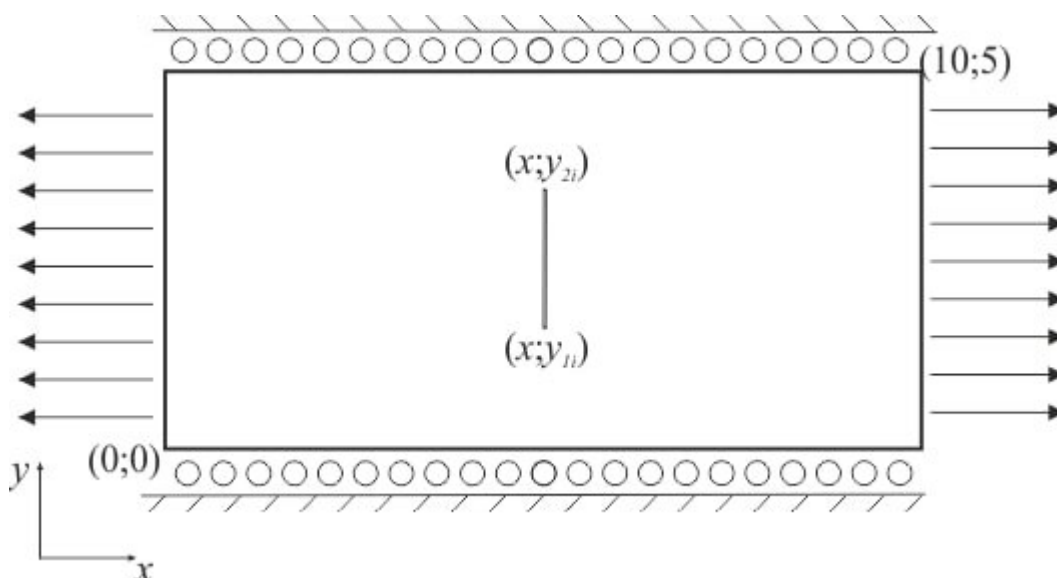


Рис. 6. Нагруженная пластина с начальной трещиной

На рисунке (рис.7) отчетливо видно, что величины напряжений на расстоянии $\Delta l = 1$ от трещины становятся близкими друг к другу и размер трещины не влияет на распределение напряжений в данной зоне (принцип Сен Венана). Исключение составляет случай когда длина трещины $l=2$, что составляет 40% от характерного размера пластины. В данном случае трещина уже является для данных размеров материала магистральной и ее влияние доминирует при распределении НДС всего тела. Пределом можно считать размер трещины (линейной) до 20% влияние которой имеет локальный характер.

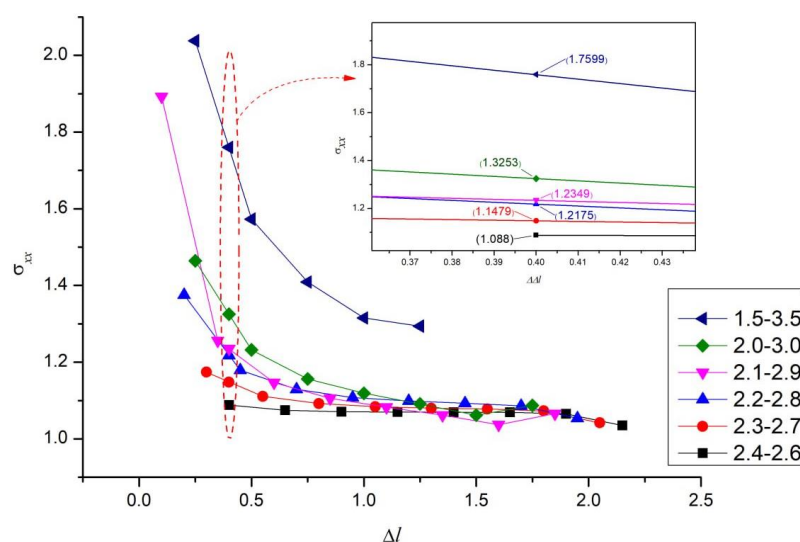


Рис. 7. Рост значения нормального напряжения у кончика трещины

Что касается значений напряжений в непосредственной близости от кончика трещины, то тут влияние размера трещины играет существенную роль как и следовало ожидать. При удвоении размера трещины величина нормального напряжения увеличивается от 5.5% до 7.7% (расстояние до кончика трещины $\Delta l = 0.4$). На этом расстоянии от кончика трещины можно

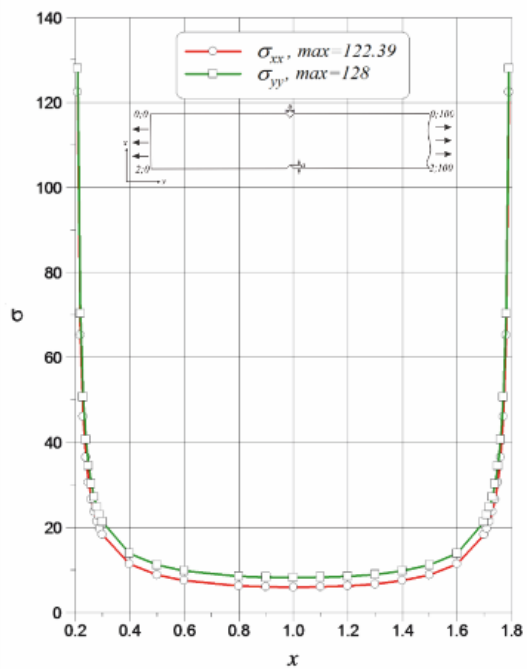
считать допустимыми расчеты по теории хрупкого разрушения (линейные задачи).

В третьей главе диссертации **“Определение факторов, влияющих на страгивание трещины”**, представлены численные результаты, полученные на основе реализованного метода разрывных смещений. Реализация данного метода дает возможность дать приближенную оценку коэффициента интенсивности напряжений (КИН) – основной характеристики материалов с наличием трещин. Также метод разрывных смещений позволяет решать как упругие так и упругопластические задачи, в том числе задачи механики трещин и горной механики.

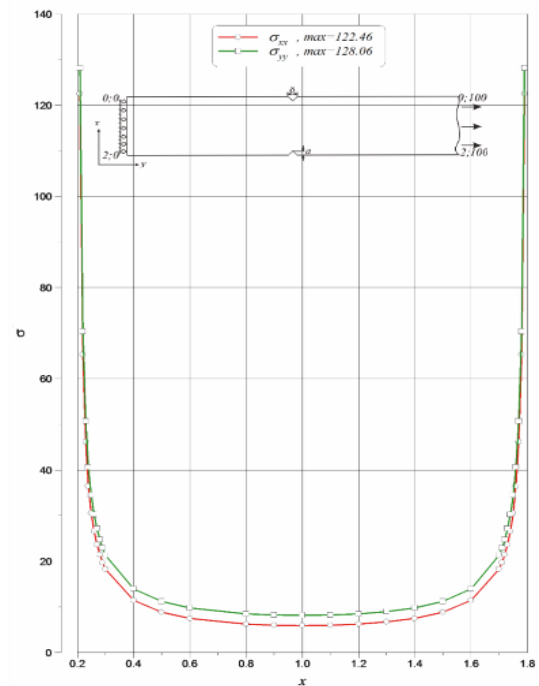
Численный метод определения КИН сводиться к построению значений напряжений вдоль линии продолжения трещины и нахождение ее асимптоты при сближении к концу трещины.

Рассмотрим задачу (классическая) при следующих физических и геометрических параметрах образца: $P=1$, $E=2$, $\nu=0.27$; $a=0.2$ – глубина выточки; $\delta=0.1$ – ширина выточки. Приняты различные граничные условия. Решение данной задачи приведено в работе Сиратори и др.

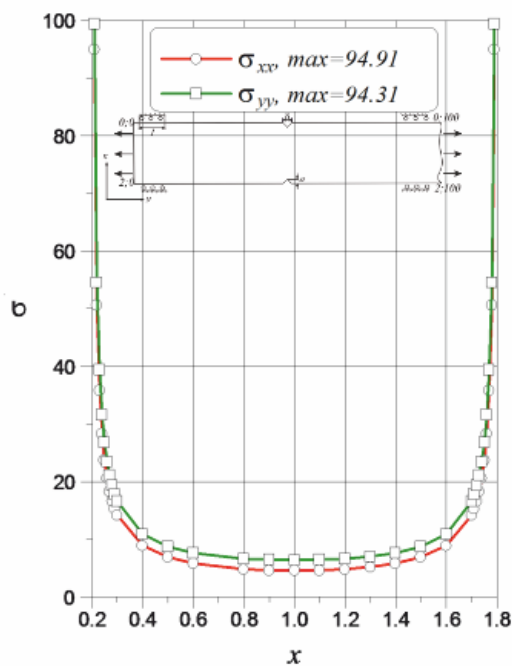
Как можно видеть из графиков наличие боковых шарниров значительно влияет на распределение напряжений (рис. 8) вблизи кончика трещины. В целом для избегания раскрытия трещины такой подход укрепления применяется в практике как временное решение проблемы страгивания. На графике ниже (рис. 9) приведены значения коэффициентов интенсивности напряжений, вычисленные на основе метода разрывных смещений из значений обоих нормальных напряжений и решения, полученного М.Сиратори.



a)



b)



с)

Рис. 8. Нормальные напряжения вдоль линии трещины

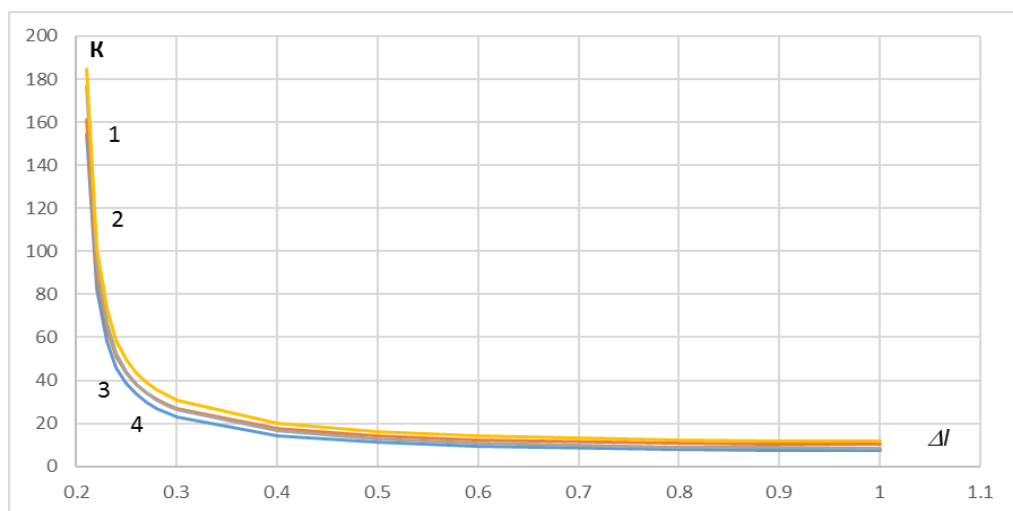


Рис. 9. 1-КИН найденный по формуле из значений σ_x , 2-КИН найденный по формуле из значений σ_y , 3-КИН найденный из значений σ_x , 4-КИН найденный из значений σ_y

Как можно видеть из них значения вычисленные согласно табличной формуле М. Сиратори немного превосходят значения, полученные из расчетов. Это связано с тем что в методе разрывных смещений учет напряжений имеет меньшую точность, чем учет смещений и находить КИН предпочтительнее по значениям смещений.

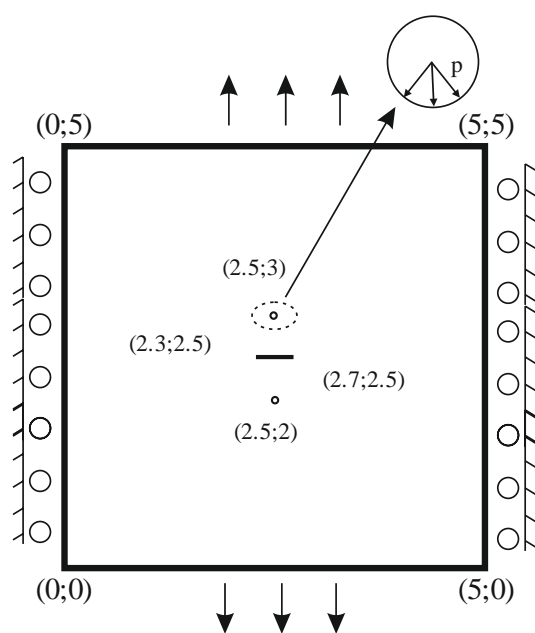


Рис. 10. Нагружение образца с одной центральной трещиной

Как было показано выше наличие боковых шарниров позволяет снизить концентрацию напряжений при растяжении (или сдвиге), но не всегда данный подход применим. Рассмотрим иной путь и определим общий принцип для создания устройств, позволяющих притормозить развитие (страгивание) трещины (рис. 10). Ниже рассмотрена задача с боковыми шарнирами, где сжимающая сила приложена перпендикулярно направлению трещины, чтобы трещина не открывалась. Рассмотрим задачу при следующих физических и геометрических параметрах образца: $P=5$, $E=2$, $\nu=0.3$; $r=0.1$ – радиус выемки; p –

распределенная нагрузка сжатия в выемках ($\Delta\alpha=\pi/3$).

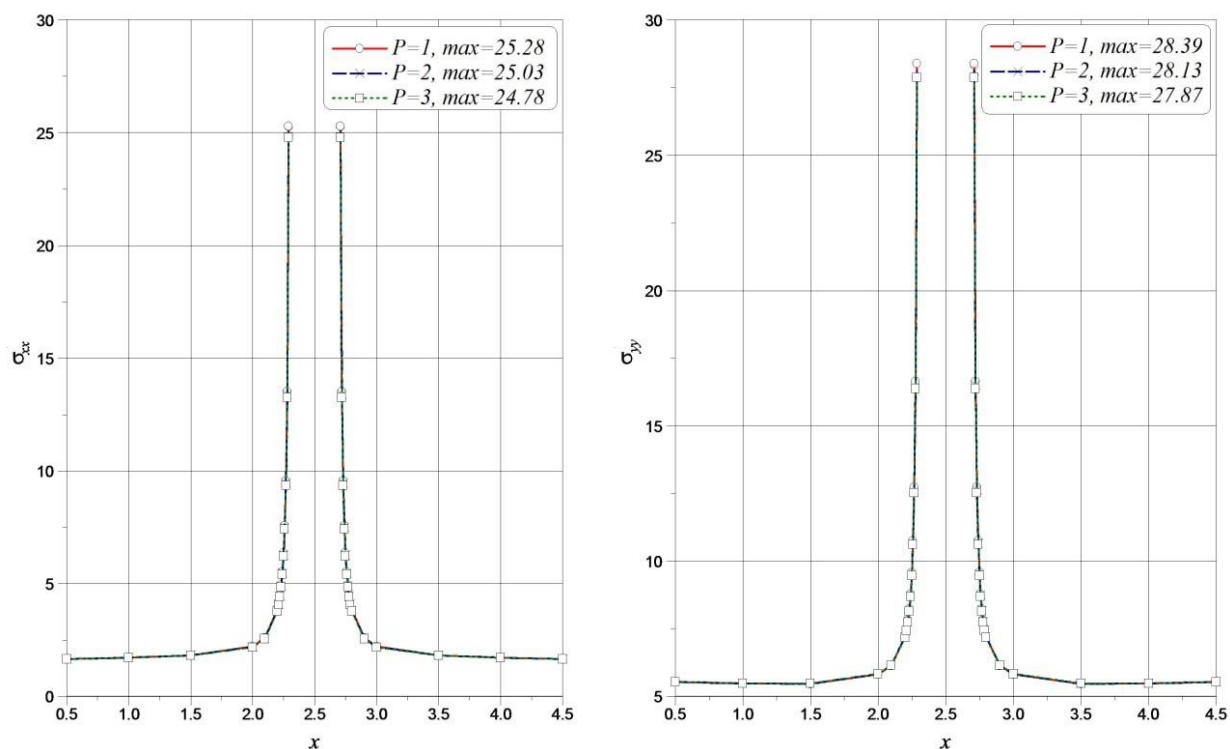


Рис. 11. Сравнительные графики при различных значениях p

Как можно видеть из графиков (рис. 11) при величине $p=20\%$ от внешней нагрузки значения концентрации напряжений не уменьшаются существенно при увеличении распределенной нагрузки сжатия. Вывод - при величине нагрузки сжатия в выемках (где могут быть установлены стрингеры) $p=20\%$ значения концентрации напряжений стабилизируется.

Если при решении задач теории трещин основным фактором является определение коэффициента интенсивности напряжений при котором

начинается развитие трещины, то при пластическом разрушении, вследствие большой зоны пластичности вокруг трещины, используется полномасштабный параметр – J интеграл. При маломасштабной текучести связь между J – интегралом и КИН можно представить, как:

$$J = \frac{K_I^2}{E}(1 - \nu^2) \text{ для ПДС и } J = \frac{K_I^2}{E} \text{ для ПНС} \quad (17)$$

Отсюда можно найти и величины раскрытия трещины через J -интеграл

$$\delta = \frac{J}{\sigma_t} = \frac{K_I^2}{E\sigma_t} \text{ или } \delta = \frac{4K_I^2}{\pi E\sigma_t}, \quad (18)$$

Рассмотрим задачу о растяжении образца с одной краевой трещиной (рис. 12) при действии равномерно распределённой нагрузки:

$\sigma = \frac{E \cdot \sigma_t (\varepsilon + C)}{\sigma_t + E \cdot C}$, где $C=0.2333$, $E=206 \text{ ГПа}$ ($2.1 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$), $\nu=0.3$, $\sigma_t=480 \text{ МПа}$ (4900 кг/см^2).

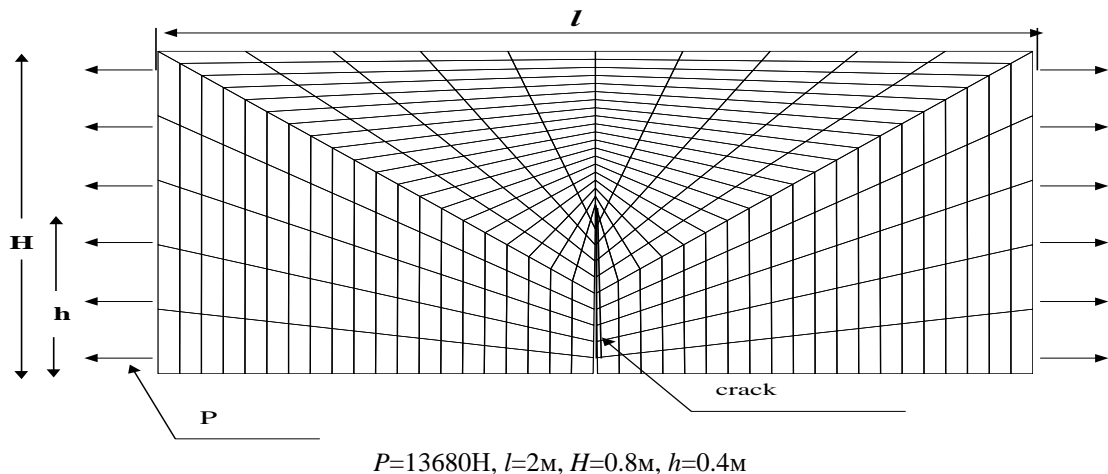


Рис. 12. Расчетная схема пластины с трещиной

Как можно видеть в данном случае коэффициенты интенсивности напряжений приведены таблично в работе Сиратори и др.:

$$K_I = F(l/H) p \sqrt{\pi l}, \quad (19)$$

где $F = 1.12 - 0.231 \frac{l}{H} + 10.55 \left(\frac{l}{H} \right)^2 - 21.72 \left(\frac{l}{H} \right)^3 + 30.39 \left(\frac{l}{H} \right)^4$.

У кончика трещины наблюдается пластическое течение. Вычислим коэффициенты интенсивности напряжений согласно вышеприведенным формулам: $K_I=43343.17 \text{ Н/м}^{1.5}$.

$$J = \frac{K_I^2}{E} \approx 9.11 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/м}^2, \quad \delta = \frac{J}{\sigma_t} = \frac{K_I^2}{E\sigma_t} \approx 19 \cdot 10^{-6} \text{ м} \quad (\text{предельно}$$

допустимыми считаются 0.2мм).

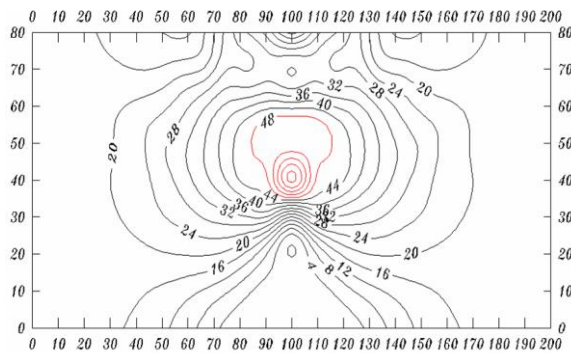


Рис. 13. Изолинии интенсивности напряжений (теория Прандтля)[КПа]

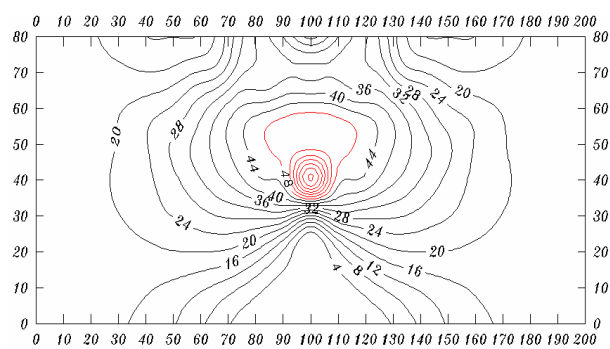


Рис. 14. Изолинии интенсивности напряжений (теория Ильюшина) [КПа]

Расчёты по теориям Прандтля-Рейсса, Прагера и по деформационной теории пластичности Ильюшина показали их отличия и таким образом условия простого нагружения в данной задаче не наблюдаются (рис. 13-14).

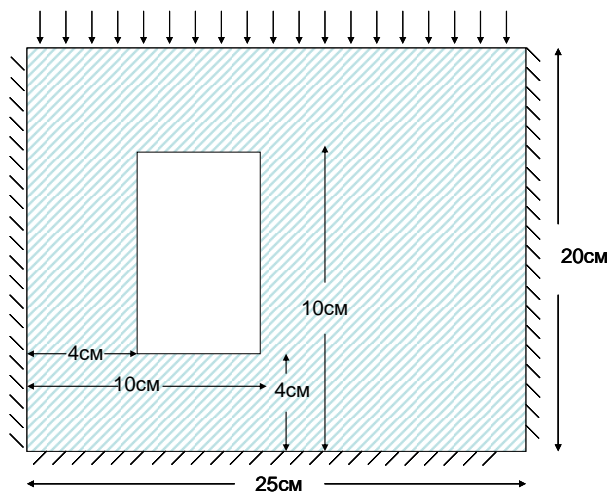


Рис. 15. Массив с системой регулярных трещин

$G_{xy}=5000$ МПа, угол наклона оси анизотропии 45° (как показано на рис.15), $p_y=-5$ МПа. Касательный модуль во всех плоскостях анизотропии одинаковый $G_k=0.1G_{xy}$, $\sigma_T=100$ МПа.

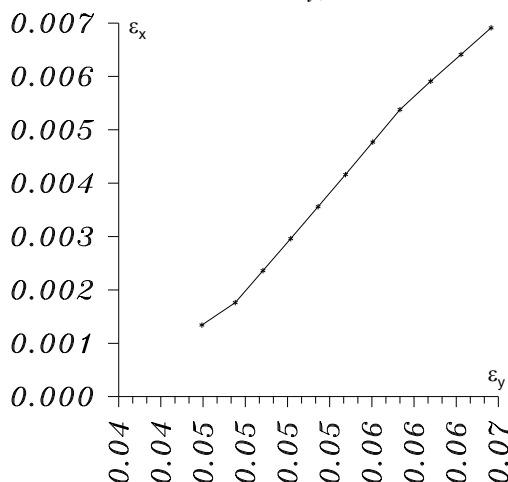


Рис. 16. Траектория деформирования $\varepsilon_y \sim \varepsilon_x$

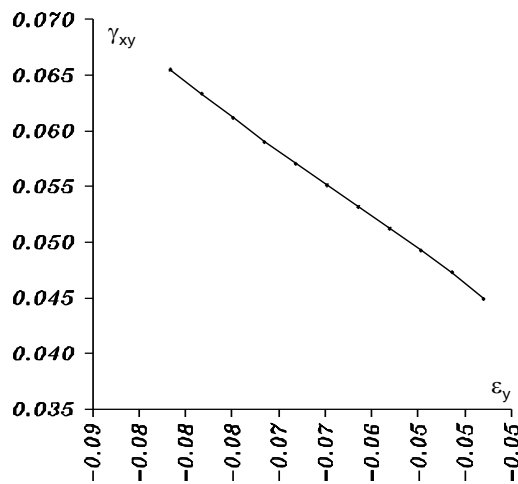


Рис. 17. Траектория деформирования $\varepsilon_y \sim \gamma_{xy}$

Так как в задаче однопараметрическое нагружение, то траектории деформации получаются близкие к простому нагружению. Результаты расчетов можно видеть из рис.16-17 ($x=3.8$, $y=3.8$, значения деформаций взяты по модулю). Как можно видеть траектории нагружения близки к простому нагружению несмотря на наличие выреза. Это говорит о том, что наличие концентратора напряжений при таком виде нагружения слабо влияет на траекторию деформирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по диссертации доктора философии на тему: «Разработка методов расчета на прочность трещиноватых материалов с учетом пластического деформирования» представлены следующие выводы:

1. Сформулирована нелинейная задача определения напряженно-деформированного состояния в пластинах с трещинами, разработан метод решения для конечной области и на его основе доказана теорема о существовании и единственности решения граничного интегрального уравнения.
2. Реализован численный метод решения упругопластических задач на основе метода разрывных смещений. Реализованный метод позволил описать алгоритм моделирования систем трещин в бесконечной двумерной среде.
3. Была обоснована зависимость концентрации напряжения от длины трещины и определено влияние граничных условий на концентрацию напряжений при наличии в ней начальной трещины (концентратора напряжений).
4. На основе полученных результатов был предложен путь к укреплению материалов с одной центральной трещиной и проведена численная оценка J-интеграла при маломасштабной текучести.
5. Решена упругопластическая задача на основе метода разрывных смещений и построены траектории деформаций сложного нагружения. На основании полученных результатов показана степень сложности процессов нагружения в окрестности концентратора напряжений.
6. Реализован метод расчета материалов с системой регулярных трещин как анизотропной среды. Представленный метод позволяет оценить влияние возникновения нового концентратора напряжений на распределение напряжений общей конструкции на примере горного тоннеля.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc. 02/30.12.2019.T/FM.61.01 AWARDING THE
SCIENTIFIC DEGREE AT THE INSTITUTE OF MECHANICS AND
SEISMIC STABILITY OF STRUCTURES**

**INSTITUTE OF MECHANICS AND SEISMIC STABILITY
OF STRUCTURES**

ADILOV FARXADJAN FOZILJONOVICH

**DEVELOPMENT OF A METHOD FOR CALCULATING THE
STRENGTH OF CRACKED MATERIALS TAKING INTO ACCOUNT
PLASTIC DEFORMATION**

01.02.04 – Mechanics of Deformable Rigid Bodies

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD)
ON PHYSIC AND MATHEMATICS SCIENCES**

Tashkent – 2024

The theme of doctor of philosophy (PhD) was registered at the Supreme Attestation Commission at the Ministry of Higher Education, Science and innovations of the Republic of Uzbekistan under number № B2022.4.PhD/FM511

The dissertation has been prepared in the Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures after M.T. Urazbaev of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of Scientific Council (www.instmech.uz) and on the information- educational portal "ZiyoNet" at the address (www.ziynet.uz).

Scientific supervisor:

Abirov Rustam Abdullayevich
Doctor of Physical and Mathematical
Sciences, Senior Researcher

Official opponents:

Axmedov Akram Burxanovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Abdusattorov Abdusamat
Doctor of Technical Sciences, Professor

Leading organization:

**Tashkent University of Architecture and Civil
Engineering**

Defense will take place «21» February 2024 at 2.00pm the meeting of the Scientific Council DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 at the Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures (Address 100125, Tashkent, Durman yuli street, 33, Conference hall – 1. Tel: (99871) 262-71-52; fax: (99871) 262-71-32, e-mail: instmech@academy.uz).

Dissertation is possible to review in Information-resource center of the Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures (registration number № 19). (Address: 100125, Tashkent, st. Durmon Yuli, 33. Tel. (99871) 262-71-52).

Abstract of the dissertation sent out on «2» February 2024 year.
(mailing report №. 19 on «2» February 2024 year)



M.M. Mirsaidov
Chairman of the Scientific Council
for awarding scientific degrees, doctor
of technical sciences, professor, academician

M.K. Usarov
Scientific secretary of Scientific Council
for awarding degrees, doctor of Physical and
mathematical sciences, professor

B.E. Khusanov
Chairman of the council seminar at the
Scientific Council for the awarding
degrees, doctor of Physical and
mathematical sciences

INTRODUCTION (abstract of PhD. thesis)

The aim of the study is to develop methods for calculating structural elements taking into account the real properties of materials, accumulated damage in the form of cracks. It is planned to create and implement models for the calculation of fractured structures in conditions of complex stress and complex loading, characteristic of materials with accumulated damage and rocks.

The object of the study is the behavior of materials with the presence of stress concentrators or initial cracks, as well as their strength properties.

The scientific novelty of the dissertation research is as follows:

a nonlinear problem of determining the stress-strain state of plates with cracks was formulated and a method for solving problems based on the boundary element method was developed;

the formulation of the discontinuous displacement method and its numerical implementation taking into account nonlinear deformation based on the fundamental solution of the problem in displacements were formulated for the first time;

As a result of numerical calculations, a dependence of the magnitude of the stress concentration in a plane problem on the length of the crack was proposed, and the degree of influence of boundary conditions on the stress concentration in the body in the presence of an initial crack was numerically determined;

a body with a system of regular cracks is modeled as an anisotropic medium, and numerical results for solving the boundary value problem are obtained.

Implementation of research results. Based on the results obtained in the dissertation work on the development of a method for calculating the strength of cracked materials taking into account plastic deformation, the following practical recommendations are proposed:

a methodology has been developed for strength calculations of materials with the presence of initial cracks and stress concentrators, including concrete, metals, composite panels, etc. When using the developed methodology for assessing the technical condition of residential facilities and strengthening them, labor costs are reduced by 1.2 times and the likelihood of possible destruction of these facilities is reduced;

the methodology and calculations are used to prevent the propagation of initial or emerging fatigue cracks under constantly acting static loads;

calculating the degree of accumulated damage of composite materials and calculating its parameters using theoretical methods made it possible to increase economic efficiency by 18% compared to research through experiments;

the research results were introduced into the UE "FARPI HITECH ENGINEER" at the Fergana Polytechnic Institute when assessing the seismic resistance of structures of a 5-story residential building located on S. Temirov Street, MFY Sh. Rashidov building No. 57 in the city of Fergana. (Certificate of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Republic of Uzbekistan dated June 22, 2023 No. 24-06 / 6801).

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, three chapters, a conclusion, a list of references and an appendix. The volume of the dissertation is 121 pages and includes 70 figures, 1 table and a list of cited literature sources of 185 references.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I-бўлим (I часть; I part)

1. Галиаскаров В.А., Адилов Ф.Ф., Абиров Р.А. К усовершенствованию методов проведения экспериментальных исследований на сложное нагружение // Узбекский журнал “Проблемы механики”. Ташкент, 2018. №1. – С. 80–82. (01.00.00; № 4)
2. Миралимов М.Х., Адилов Ф.Ф., Абиров Р.А. Исследования устойчивости дорог, укрепленных габионными конструкциями // Узбекский журнал “Проблемы механики”. Ташкент, 2019. №1. –С. 69-70. (01.00.00; № 4)
3. Адилов Ф., Махмудова Ш., Сагдуллаева Д. и Абиров Р. Некоторые экспериментальные данные по сложной разгрузке // Узбекский журнал “Проблемы механики”. Ташкент, 2019. №2. –С. 41-44. (01.00.00; № 4)
4. Адилов Ф.Ф., Абиров Р.А. О разрешимости интегрального уравнения в теории пластичности // Узбекский журнал “Проблемы механики”. Ташкент, 2021. №1. – С. 40-46. (01.00.00; № 4)
5. Адилов Ф.Ф. К расчету плоского тела с начальной трещиной // Узбекский журнал “Проблемы механики”. Ташкент, 2021. №4. – С. 72-79. (01.00.00; № 4)
6. Adilov F., Yuldoshev B., Abirov R., Miralimov M. Numerical approach for estimation of stress strain state of deep tunnels // XXII International Scientific Conference on Advanced in Civil Engineering construction the formation of living environment form 2019, April 18-21, Tashkent, Uzbekistan. (Scopus № 3, WOS № 1)
7. Sagdullayeva D.A., Maxmudova Sh.A., Adilov F.F, Abirov R.A., Khazratkulov I.O., Nasirov I.A. On stability of slopes in mountain zones. Case study // Journal of Physics: Conference Series, Volume 1425, Modelling and Methods of Structural Analysis 13–15 November 2019, Moscow, Russian Federation. (Scopus № 3, WOS № 1)
8. Miralimov M., Adilov F., Abirov R., Juraev D., Khazratkulov I. To numerical approach for calculation of underground structures // International Scientific Conference Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering (CONMECHYDRO – 2020) 23-25 April 2020, Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers, Tashkent, Uzbekistan. (Scopus № 3, WOS № 1)
9. Abirov R., Adilov F., Khodzhaev D., Ishmatov A., Zokirov I. On one approach in underground mining modeling // International Scientific Conference Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering (CONMECHYDRO – 2020) 23-25 April 2020, Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers, Tashkent, Uzbekistan. (Scopus № 3, WOS № 1)
10. Farkhadjan Adilov, Shakhnoza Makhmudova, Rustam Abirov, Elyor Toshmatov and Ikbal Maxmudova. To assessment of stress-strain state in rock continua // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume

869, New construction technologies. Published online: 09 July 2020. (Scopus № 3, WOS № 1)

11. Adilov F.F., Miralimov M.H., Abirov R.A. To the stability of the roadbed reinforced with gabions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 913, Building materials and technologies of binders, concrete and building ceramics. Published online: 2020. (Scopus № 3)

12. Adilov F., Abirov A. On numerical investigation of stability of roadbeds reinforced by gabion structures // E3S Web Conf. Volume 264, 2021. International Scientific Conference “Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering” (CONMECHYDRO - 2021). Published online: 2 June 2021. (Scopus № 3)

13. Галиаскаров В.А, Адиллов Ф.Ф., Абиров Р.А. Модернизация регистрирующей системы установки СН // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021 г. Том 87, №2, стр.65-71. (Scopus № 3)

14. Adilov F.F. On a Method of Calculating of Continua with an Initial Crack // 4th International Conference on Trends in Material Science and Inventive Materials (ICTMIM - 2022) 24-25, March 2022. vol.243-253. (Scopus № 3)

15. Farkhadjan Adilov, Javlon Turdibekov, Shakhnoza Makhmudova, and Rustam Abirov. On Reliable Solution of Plasticity Problems // International Conference on Actual Problems of Applied Mechanics - APAM-2021, Published Online: 20 October 2022. Vol 2637, No 1. (Scopus № 3)

16. Farkhadjan Adilov, Javlon Turdibekov, and Rustam Abirov. On One Approach in Plasticity // International Conference on Actual Problems of Applied Mechanics - APAM-2021, Published Online: 20 October 2022. Vol 2637, No 1. (Scopus № 3)

II-бўлим (II часть; II part)

17. Абиров Р.А., Адиллов Ф.Ф. К влиянию динамических нагрузок на прочностные характеристики конструкционных материалов // Журнал “ТашиИТ ВЕСТНИК”, – Ташкент. 2018. – №1. – С. 43-48.

18. Абиров Р.А., Адиллов Ф.Ф. К расчету тоннелей с использованием метода граничных элементов // “ВЕСТНИК” Международной ассоциации экспертов по сейсмостойкому строительству. – Бишкек. 2018. – №1. – С. 20-22.

19. Адиллов Ф.Ф., Абиров Р.А. Численное моделирование процесса нагружения трещиноватых материалов // “Узбекско-российская научная конференция неклассические уравнения математической физики и их приложения” Материалы Международной научно-технической конференции. – Ташкент. 2019. – С.253-255.

20. Махмудова Ш.А., Адиллов Ф.Ф., Абиров Р.А. К прочности тоннельной выработки в горной породе // International conference “Innovations in construction, energy-saving technologies, construction and seismic safety of buildings and structures”. – Наманган. 2019. – С. 415-419.

21. Адиллов Ф.Ф. Численные решения двумерных задач механики трещин // Международная научно-практическая “Рахматулинские чтения”. – Ташкент. 2023. – С. 96-98

Avtoreferatning o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi nusxalari
«Mexanika muammolari O‘zbekiston jurnali» tahririyatida
tahrirdan o‘tkazildi

Bichimi $60 \times 84^{1/16}$. Rizograf bosma usuli. Times garniturası.
Shartli bosma tabog‘i: 3. Adadi 100. Buyurtma №09.

«O‘zR Fanlar Akademiyasi Asosiy kutubxonasi» bosmaxonasida chop etilgan.
Bosmaxona manzili: 100170, Toshkent sh., Ziyolilar ko‘chasi, 13-uy.