

**TOSHKENT DAVLAT TRANSPORT UNIVERSITETI HUZURIDAGI
ILMIY DARAJALAR BERUVCHI PhD.15/03.06.2023.FM/T.73.08
RAQAMLI ILMIY KENGASHI QOSHIDAGI BIR MARTALIK ILMIY
KENGASH**

TOSHKENT DAVLAT TRANSPORT UNIVERSITETI

TURDIYEV MALIKJON SAYFIDDIN O‘G‘LI

**QURUQ ISHQALANISH ELEMENTLARI MAVJUD
KONSTRUKSIYALAR UCHUN DINAMIK MASALALAR**

01.02.04 – “Deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi”

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

Toshkent – 2025

**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**

Turdiyev Malikjon Sayfiddin o'g'li Quruq ishqalanish elementlari mavjud konstruksiyalar uchun dinamik masalalar	3
Турдиев Маликжон Сайфиддин ўғли Динамические задачи для конструкций при наличии элементов с сухим трением.....	23
Turdiev Malikjon Sayfiddin o'g'li Dynamic problems for structures with dry friction elements	45
E'lon qilingan ishlar ro'yxati Список опубликованных работ List of published works	49

**TOSHKENT DAVLAT TRANSPORT UNIVERSITETI HUZURIDAGI
ILMIY DARAJALAR BERUVCHI PhD.15/03.06.2023.FM/T.73.08
RAQAMLI ILMIY KENGASHI QOSHIDAGI BIR MARTALIK ILMIY
KENGASH**

TOSHKENT DAVLAT TRANSPORT UNIVERSITETI

TURDIYEV MALIKJON SAYFIDDIN O‘G‘LI

**QURUQ ISHQALANISH ELEMENTLARI MAVJUD
KONSTRUKSIYALAR UCHUN DINAMIK MASALALAR**

01.02.04 – “Deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi”

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

Toshkent – 2025

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2023.4.PhD/FM928 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Toshkent davlat transport universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (<https://tstu.uz/page/122>) va «ZiyoNet» axborot-ta'lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:

Mirzayev Ibraxim

fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Mardonov Batir

fizika-matematika fanlari doktori, professor

Safarov Ismail Ibroximovich

fizika-matematika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot:

Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universiteti

Dissertatsiya himoyasi Toshkent davlat transport universiteti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi PhD.15/03.06.2023.FM/T.73.08 raqamli ilmiy kengashi qoshidagi bir martalik ilmiy kengashning 2025 yil 17-yanvar soat 14⁰⁰ dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100167, Toshkent shahar, Temiryo'Ichilar ko'chasi, 1-uy. 259-xona. Tel.: (+99871) 299-00-01, fax: (+99871) 239-57-54, e-mail: rektorat@tstu.uz).

Dissertatsiya bilan Toshkent davlat transport universiteti Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (____ raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100167, Toshkent shahar, Temiryo'Ichilar ko'chasi, 1-uy. Tel.: (+99871) 299-05-66.

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil _____ kuni tarqatildi.
(2025 yil _____ raqamli reestr bayonnomasi).

X.M. Shadimetov

Ilmiy darajalar beruvchi bir martalik
Ilmiy kengash raisi, fizika-matematika
fanlari doktori, professor

F.A. Nuraliyev

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

D.B. Eshmamatova

Ilmiy darajalar beruvchi bir martalik
Ilmiy kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi,
fizika-matematika fanlari doktori, dotsent

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda yangi qurilayotgan zamonaviy bino va inshootlarning seysmik mustahkamligini oshirish va samarali seysmoizolyatsiya usullarini yaratish hamda ulardan foydalanish masalalariga alohida ahamiyat berilmoqda. So‘nggi yillarda yuz bergan yirik zilzilalar ulkan yo‘qotishlarga sabab bo‘lganligi tufayli zilzila vaqtida inshootlardagi kuzatiladigan seysmodinamik jarayonlarni o‘rganishga bo‘lgan talab ortib bormoqda. Bunga yaqqol misol sifatida oxirgi yillarda Turkiya, Yaponiya, Indoneziya va Gaitida sodir bo‘lgan zilzilalar oqibatida kelib chiqqan talofatlarni aytishimiz mumkin. Shu jihatdan yer osti va yer usti inshootlarining seysmik mustahkamligiga alohida e‘tibor qaratilmoqda.

Jahonda zilziladan ko‘riladigan talofotlarni kamaytirish maqsadida bino va inshootlarni seysmik himoyalash sohasida izchil fundamental va amaliy tadqiqotlar olib borilmoqda. Hozirgi kunda bino va inshootlarni seysmik izolyatsiya qilishda seysmik himoya qurilmalaridan keng foydalanilayotgan bo‘lsada, seysmik himoya qurilmalarining harakati va samaradorligi yetarli darajada o‘rganilmagan. Ushbu yo‘nalishda konstruksiya elementlari orasida ishqalanish kuchlari mavjud bo‘lganligi natijasida paydo bo‘ladigan murakkab dinamik tenglamalarni yechishning algortmlarini ishlab chiqish, o‘zaro munosabatlar quruq ishqalanish modelida bo‘lganda sirpanishning boshlanish vaqtini to‘g‘ri hisobga olish muhim vazifalardan hisoblanmoqda. Shu jihatdan bino va inshootlarni seysmik to‘lqinlardan himoyalash bo‘yicha ilmiy izlanishlarni amalga oshirish hamda amaliyot uchun tavsiyalar berish dolzarb masalalardan biri hisoblanmoqda.

Respublikamizning 78% yer maydoni seysmik faol hududlarda joylashganligini hisobga olib, yer osti va yer usti inshootlarining zilzilabardoshligini ta‘minlash hamda seysmik mustahkamligini oshirish bo‘yicha keng ko‘lamli chora-tadbirlar amalga oshirilmoqda. 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‘shish nuqtalari”dan kelib chiqib, muhandislik-kommunikatsiya va ijtimoiy infratuzilma obyektlarini qurishga alohida e‘tibor qaratish...”¹ bo‘yicha muhim vazifalar belgilab berilgan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda yer osti va yer usti inshootlaridagi seysmodinamik jarayonlarni o‘rganish, tahlil qilish va bu turdagi murakkab masalalarni sonli usullar bilan yechish hamda algortmlarini ishlab chiqish muhim vazifalardan hisoblanadi.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 30 maydagi PF-144-sonli “O‘zbekiston Respublikasi 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 qarori, 2024 yil 17

¹O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-sonli “2022-2026 yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida”gi Farmoni

apreldagi PQ-161-sonli “Bino va inshootlarning zilzilabardoshlilikini oshirish hamda seysmik xavfni monitoring qilish faoliyatini takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi qarori, hamda mazkur faoliyat sohalariga tegishli boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilab ko‘rsatilgan vazifalarni amalga oshirishda ushbu tadqiqot ishi muayyan darajada xizmat qiladi.

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. Ma’lumki, seysmik to‘lqinlar ta’sirida bino konstruksiyalarida va yer osti quvurlarida vujudga keladigan seysmodinamik jarayonlarni o‘rganish hamda bino va inshootlarni seysmik izolyatsiya qilish bo‘yicha bir qator ilmiy tadqiqot ishlari xorijiy olimlar tomonidan olib borilgan va olib borilmoqda, shu jumladan Psyrras N.K., Sextos A.G., O’Rourke M.J., Toprak S., Aynbinder A.B., Borodavkin P.P., Massarsch K.R., Bashirzade S.P., Newmark N.M., Takahashi T., Liu X.L., Muravyeva L., Ilyushin A.A., Israilov M.Sh., Aleksandrov A.A., Apsemetov M.Ch., Andashev A.J., Lapin V.A., Mkrtychev O.V., Mingazova S.M., Erjanov S.E., Kuznetsov S.V., Kuznetsov V.D, Chen S., Ayzenberg Y.M., Arutunyan A.R., Vyscrebentseva M.A, Le Q.V., Uzdin A.M., Sandovich T.A., Amin Al Naser M.S., Bakre S.V., Sanjaya K.P., Nikitin L.V., Aleksandrova N.I., Vatin N.I., Popov V.L., Elmer F.J., Furinghetti M. Belash T.A, Tarasov V.A., Buckle I., Von Kluge P.N., Lyashenko Ya.A., Chunliang Li., Banović I., Şcheaua F.D., Pelekis I., Madabhushi G.S.P., Chopra K.A. va boshqa ko‘plab tadqiqotchilar shu yo‘nalishda ilmiy izlanishlar olib borishgan.

Respublikamizda ushbu yo‘nalishda taniqli olimlarimiz [Rashidov T.R.,] [Abdurashidov Q.S.], Xojmetov G.X., [Mubarakov Ya.N.], Mirsaidov M.M., Mardonov B.M., Begmatov A., Mirzayev I., [Mamatqulov Sh.M.], Sultanov K.S., Mavlonov T.M., Abdusattarov A., Xusanov B.E., Matkarimov A.X., Bekmirzayev D.A., Sagdiyev X.S., Safarov I.I., Teshayev M.X., Yuvmitov A.S., Mamatova N.T., Nishonov N.A., Qayumov A., An Ye.V., Kolmakova Ye.N., Shomurodov J.F. va boshqalar seysmik kuchlar ta’sirida bino konstruksiyalarida va yer osti quvurlaridagi dinamik jarayonlarni o‘rganish bo‘yicha o‘zlarining salmoqli hissalarini qo‘shishgan.

Xorijiy va mamlakatimiz olimlarining olib borgan ilmiy izlanishlari tahlil qilinganda aniq bo‘ldiki, yer osti va yer usti inshootlaridagi dinamik jarayonlarda konstruksiya elementlari o‘zaro quruq ishqalanish modelida bo‘lganda sirpanish hamda birgalikdagi harakatining murakkabligi tufayli bunday masalalarning to‘liq yechilmaganligi aniqlangan.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan ilmiy tashkilot yoki ta’lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog‘liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Toshkent davlat transport universitetining ilmiy tadqiqot ishlari rejasiga muvofiq, 2022-2023 yillar uchun 28/2022-sonli “Real seysmik ta’sirlarda temir yo‘l ko‘priklari elementlarining nochiziqli o‘zaro ta’sirini hisobga

olib hisoblash dasturlari kompleksini yaratish” mavzusidagi ilmiy tadqiqot doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi seysmik to‘lqinlar ta’sirida bino konstruksiyalari va yer osti inshootlari elementlarida quruq ishqalanish kuchini hisobga olgan holda o‘ziga xos chiziqli bo‘lmagan dinamik masalani yechishning algortmini sonli usullar va mantiqiy algoritm yordamida ishlab chiqish hamda olingan natijalarni tahlil qilishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

grunt va quvur orasidagi o‘zaro munosabat quruq ishqalanish modelida bo‘lganda seysmik to‘lqinlar ta’sirida uzun yer osti quvurining dinamik tenglamasini oshkor chekli ayirmalar sxemasi asosida sonli yechish algoritmini ishlab chiqish;

quruq ishqalanish kuchi mavjud bino va inshootlardagi seysmodinamik jarayonlarni o‘rganish uchun harakat differensial tenglamalar sistemasini yechishda Nyumark oshkormas sxemasiga asoslangan uslub va hisoblash algortmlarini ishlab chiqish;

laborotoriya eksperimentini o‘tkazish uslubini ishlab chiqish hamda eksperiment natijalarini analitik yechim bilan solishtirish orqali turli materiallar uchun Amonton-Kulon quruq ishqalanish dinamik koeffitsiyentini aniqlash;

olingan yechimlar asosida grafiklar va animatsiyalar orqali bino va inshootlarda sodir bo‘ladigan dinamik jarayonlarni o‘rganish va bu natijalarni tahlil qilish.

Tadqiqotning obykti sifatida uzun yer osti quvuri, ko‘p qavatli bino va inshootlar hamda Atom elektr stansiyasi (AES) turbina bloki olingan.

Tadqiqotning predmeti sifatida grunt va quvur orasidagi o‘zaro munosabat quruq ishqalanish modelida bo‘lganda seysmik to‘lqinlar ta’sirida uzun yer osti quvurining dinamik tenglamalarini sonli yechish algoritmini ishlab chiqish hamda zilzilalarning mavjud yozuvlari asosida bino va inshootlarni seysmik to‘lqinlardan himoyalash uchun nochiziqli dinamik masalalarni yechishning sonli algoritmlarini yaratish.

Tadqiqotning usullari. Tadqiqot ishini amalga oshirish jarayonida deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi, hisoblash matematikasi va matematik modellashtirish usullari, chekli elementlar va chekli ayirmalar usullaridan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

quruq ishqalanish kuchi mavjud konstruksiyalardagi dinamik jarayonlar o‘ziga xos chiziqli bo‘lmagan masalalar bo‘lganligi uchun ularni yechishning algoritmi chekli elementlar hamda chekli ayirmalar usullari va mantiqiy algortm asosida ishlab chiqilgan;

bo‘lib o‘tgan zilzilalar yozuvlarining ma’lumotlar bazasidan tanlab olingan zilzilalarning gorizonta va vertikal komponentalaridan foydalanib, konstruksiyada quruq ishqalanish kuchi mavjud holda ilk bor “stick-slip” shaklidagi jarayonda yopishib va sirpanib harakatlanishlarning boshlanish vaqtlarini aniqlash mantiqiy algoritmi asosida dinamik masalalar yechilgan;

yer osti uzun quvuri grunt bilan o‘zaro munosabati quruq ishqalanish modeli bilan ifodalanganda seysmik to‘lqin ta’sirida quvurda “Raxmatulin to‘lqini”ga o‘xshash to‘lqin tarqalishi dinamik masalani yaratilgan sonli algoritm asosida yechib aniqlangan;

bino va inshootlarni seysmik to‘lqinlardan himoyalash uchun sirpanuvchan poydevordan foydalanish dinamik masalalarni yechish uchun yaratilgan algoritm asosida hisoblash eksperimenti orqali samarali seysmoizolyatsiya usuli ekanligi ko‘rsatilgan;

laboratoriya eksperimentini o‘tkazish bo‘yicha yangi uslub ishlab chiqilgan hamda eksperiment natijalarini analitik yechim bilan solishtirish asosida turli materiallar uchun Amonton-Kulon quruq ishqalanish dinamik koeffitsiyenti aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

mazkur tadqiqot ishida ishlab chiqilgan yer osti va yer usti inshootlari uchun masalalarni yechishda chiziqli bo‘lmagan quruq ishqalanish modeli uchun haqiqiy zilzila yozuvlari asosida konstruksiyalardagi dinamik jarayonlarni tahlil qilish imkonini beruvchi hisoblash ishlarining algoritmlari va dasturiy majmuasi yaratilgan;

yer osti va yer usti inshootlarida seysmodinamik jarayonlarni o‘rganish uchun yaratilgan majmua tarkibida mavjud natijalarni grafiklar va animatsiya asosida ko‘rish hamda tahlil qilish imkoniyati yaratilgan;

bino va inshootlarni seysmik izolyatsiya qilishda poydevor va rostverk orasiga yetarli sirpanishni ta’minlovchi ftoroplast materialidan foydalanish asosdagi seysmik to‘lqinlarning yuqori qavatlariga ta’sirini kamaytirishga olib kelishi aniqlangan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi. Olingan natijalarning ishonchliligi dissertatsiya ishida qo‘yilgan chiziqli bo‘lmagan masalalarning korrekt qo‘yilganligi, ularni yechishda oshkor chekli ayirmalar sxemasining turg‘unligi isbotlanganligi, sinalgan chekli elementlar va oshkormas chekli ayirmalar usullaridan foydalanilganligi, yechimlarning ishonchliligini baholashda laboratoriya eksperimenti natijalari hamda ayrim masalalarda boshqa tadqiqotchilar yechimlari bilan taqqoslanganligi va ularning natijalariga yetarlicha mos tushganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati haqiqiy zilzila yozuvlari asosida konstruksiya elementlari o‘zaro quruq ishqalanish modelida ishqalanish kuchining yo‘nalishi va sirpanishning boshlanish vaqtini aniqlashning mantiqiy algoritmi yaratilganligi, masalani yechishda mos sonli usullarning qo‘llanilishi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati seysmik kuchlar ta’sirida konstruksiyalarda sodir bo‘ladigan dinamik jarayonlarni o‘rganishning matematik modeli, hisoblash algoritmi va hisoblashda haqiqiy zilzila yozuvlaridan foydalanish imkoniyati yaratilganligi, quruq ishqalanish modeli uchun masalani yechishning algoritmlari va olingan natijalarni grafik va animatsiya ko‘rinishida tasvirlaydigan

dasturlarning yaratilishi hamda o'tkazilgan laborotoriya eksperimentlari asosida olingan tavsiyalari bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Quruq ishqalanish elementlari mavjud konstruksiyalar uchun dinamik jarayonlarni o'rganish bo'yicha dissertatsiya ishining ilmiy natijalari asosida:

Tadqiqot ishida keltirilgan hisoblash algoritmlaridan foydalanish asosida hisoblangan natijalardan Andijon viloyati Asaka shahar Dustlik ko'chasi 15-uyda joylashgan 7 qavatli turarjoy binosi qurilishi obyektini loyihalash jarayonida foydalanilgan (O'zbekiston Respublikasi Qurilish va uy-joy kommunal xo'jaligi vazirligining 2024-yil 15-apreldagi 24-06/3804-sonli ma'lumotnomasi). Ilmiy natijalarning qurilish obyektini loyihalash jarayoniga qo'llash natijasida hisobloyiha ishlarining bajarilish vaqtini 1.18 martagacha tejashga, loyihalash uchun zarur bo'lgan xulosalarni oldindan chiqarishga va zamonaviy kompyuter texnologiyalaridan samarali foydalanishga erishilgan. Bu natijalarni loyiha ishlariga qo'llash orqali ish sifati va mehnat unumdorligining ortishiga erishilgan. Dissertatsiya ishi natijalari nazariy va amaliy ahamiyatga ega bo'lib, zilzila ta'sirida bino, inshootlarning hamda ularning asos va poydevorlari zararlanishlari va buzilishlarining oldini olishda foydalaniladi, bundan tashqari loyihalash ishlariga sarflanadigan vaqt hamda mablag'larni tejash imkonini beradi.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Mazkur tadqiqot natijalari xalqaro, respublika anjumanlarida muhokama qilingan va ma'qullangan, jumladan, 14 ta xalqaro va 3 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida muhokamadan o'kazilgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 28 ta ilmiy ish chop etilgan bo'lib, jumladan 8 ta maqola O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining falsafa doktori (PhD) dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etishga tavsiya etilgan ilmiy jurnallarda, shundan 5 ta mahalliy va 3 ta xorijiy jurnallarda (2 tasi SCOPUS bazasida indekslangan) nashr qilingan. Shuningdek, 3 ta EHM dasturi uchun O'zbekiston Respublikasi Intellektual mulk agentligidan mualliflik guvohnomalari olingan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish qismi, to'rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va qo'shimcha ilovalardan tashkil topgan. Dissertatsiyaning hajmi 115 betni tashkil qiladi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya tadqiqotining dolzarbligi va zarurati, maqsad va vazifalari asoslanib, uning objekti va predmeti tavsiflangan. Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga muvofiqligi, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilinib, olingan natijalarning ilmiy va amaliy ahamiyatga ega ekanligi yoritib berilgan. Shu bilan birga tadqiqot natijalarining ishonchliligi, amaliyotga joriy etilishi, chop etilgan ilmiy ishlar soni, dissertatsiya tarkibi va hajmi to'g'risidagi ma'lumotlar keltirilgan.

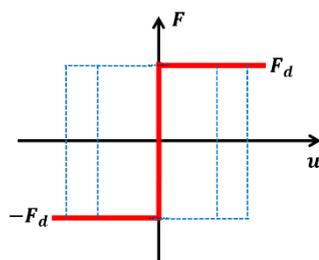
Dissertatsiyaning **“Seysmik to'lqinlar ta'sirida bino va inshootlardagi dinamik jarayonlar va bu yo'nalishdagi bajarilgan nazariy hamda**

eksperimental ishlar bo'yicha adabiyotlar tahlili deb nomlangan birinchi bobida seysmik kuchlar ta'siridagi bino va inshootlar hamda yer osti quvurlarida kuzatiladigan xavfli holatlar, ularni o'rganish bo'yicha chet el va mamlakatimiz olimlari tomonidan olib borilgan ilmiy-amaliy tadqiqot ishlari tahlili keltirilgan. Shuningdek, bino konstruktsiyalaridagi dinamik jarayonlar va bino konstruktsiyalarini seysmik izolyatsiya qilish bo'yicha bajarilgan nazariy-eksperimental ishlar haqida ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning **“Grunt bilan o‘zaro munosabati quruq ishqalanish modelida bo‘lgan uzun yer osti quvurining seysmodinamikasi”** deb nomlangan ikkinchi bobida grunt va quvur orasidagi o‘zaro munosabat quruq ishqalanish modeli ko‘rinishidagi uzun yer osti quvurlaridagi seysmodinamik jarayonlarni tahlil qilish maqsadida quvur uchun dinamik harakat differensial tenglamalarining qo‘yilishi keltirilgan. Shuningdek, quruq ishqalanish modelida quvurlardagi dinamik jarayonlar o‘ziga xos chiziqli bo‘lmagan masalalar bo‘lganligi uchun uni yechishning algoritmi sonli usullar va mantiqiy algoritm asosida ishlab chiqilgan. Bu turdagi masalalar uchun qurilgan chekli ayirmalar sxemasining turg‘unligi va sonli yechimning yaqinlashishi hamda yaratilgan mantiqiy algoritmning ishonchliligi isbotlangan. Olingan natijalar bo‘yicha tahliliy xulosalar keltirilgan.

Grunt va unda joylashgan quvurning fizik-mexanik xususiyatlariga bog‘liq ravishda “quvur-grunt” tizimining o‘zaro munosabati turli chiziqli bo‘lmagan modellar ko‘rinishida bo‘lishi mumkin. Bu modellardan biri bo‘lgan quruq ishqalanish modeli uchun (1-rasm) uzun yer osti quvuridagi seysmodinamik jarayonlarni qarab chiqamiz.

Faraz qilaylik, to‘lqin tarqalish tezligi c_g bo‘lgan grunt da L uzunlikka ega bo‘lgan quvur o‘qi bo‘ylab grunt zarrachalari $v_g(t-x/c_g)$ tezlik bilan harakat qilayotgan bo‘lsin. Ox o‘qining boshlanish nuqtasini quvurning chap uchidan belgilaymiz.



1-rasm. Grunt va yer osti quvurining o‘zaro munosabatining quruq ishqalanish modeli

Quvur va grunt orasidagi o‘zaro munosabatning quruq ishqalanish modelini inobatga olgan holda uzun yer osti quvurining dinamik tenglamasini quyidagicha yozamiz

$$\frac{\partial v}{\partial t} = c^2 \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \frac{\pi D}{F \rho} \tau(x, t),$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial x},$$
(1)

$$\begin{cases} \tau(x,t) = \tau_0 \text{sign}(v_g - v), \text{ agar } v_g \neq v, \\ |\tau(x,t)| < \tau_0, \text{ agar } v = v_g. \end{cases} \quad (2)$$

Bunda $c = \sqrt{E/\rho}$ – quvurda bo‘ylama to‘lqin tarqalish tezligi; E, ρ – quvur materialining elastiklik moduli va zichligi; ε, v, u – quvur deformatsiyasi, quvur zarralarining tezligi va ko‘chishi; D, F – quvurning ko‘ndalang kesim diametri va yuzasi; E_g – grunt elastiklik moduli; $u_g = u_g(x,t)$ – grunt zarralarining ko‘chishi; ε_g – gruntning deformatsiyasi; $\tau = \tau(x,t)$ – quvur va grunt orasidagi urinma kuchlanish.

Boshlang‘ich shartlarni

$$\varepsilon = 0 \text{ va } v = 0 \quad (3)$$

ko‘rinishda olamiz. Quvurning uchlaridagi chegaraviy shartlar esa masala shartiga mos tarzda turli ko‘rinishlarda olish mumkin. Bajirilgan hisob ishlari kuchlanishdan (deformatsiyadan) ozod chegaraviy shartlarda amalga oshirilgan:

$$\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \text{ va } \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{L=0} = 0.$$

Masalani yechishda chekli ayirmalar sxemasining oshkor ko‘rinishidan foydalanamiz. L uzunlikdagi uzun quvurni m ta Δx uzunlikdagi qismlarga ajratamiz, u holda $L = m \cdot \Delta x$, Δx va Δt orasidagi munosabatni $\Delta x = c \cdot \Delta t$ ko‘rinishda olamiz. (1) va (2) tenglamalar sistemasini quyidagicha chekli ayirmalar sxemasiga approksimatsiya qilamiz

$$\frac{v_{i+1/2}^{j+1} - v_{i+1/2}^j}{\Delta t} = c^2 \frac{\varepsilon_{i+1}^{j+1/2} - \varepsilon_i^{j+1/2}}{\Delta x} + \frac{\pi D}{F\rho} \frac{\tau_{i+1/2}^{j+1} + \tau_{i+1/2}^j}{2}; \quad (4)$$

$$\frac{\varepsilon_{i+1}^{j+1/2} - \varepsilon_i^{j-1/2}}{\Delta t} = \frac{v_{i+1/2}^j - v_{i-1/2}^j}{\Delta x},$$

$$\begin{cases} \tau_{i+1/2}^{j+1} = \tau_0 \text{sign}(v_{g,i+1/2}^{j+1} - v_{i+1/2}^{j+1}), \text{ agar } v_{g,i+1/2}^{j+1} \neq v_{i+1/2}^{j+1}, \\ |\tau_{i+1/2}^{j+1}| < \tau_0, \text{ agar } v_{g,i+1/2}^{j+1} = v_{i+1/2}^{j+1}. \end{cases}$$

Bu tenglamalar sistemasida bir vaqtning o‘zida $v_{i+1/2}^{j+1}$ va $\tau_{i+1/2}^{j+1}$ lar noma’lum bo‘lganligi uchun tenglamalar sistemasini yechishda quyidagicha mantiqiy algoritmdan foydalanamiz. Vaqtning har bir yangi qadamida quvurning har bir nuqtasi uchun ikki xil holatda qo‘yilgan masalani yechamiz:

1. (4) tenglamani $\tau_{i+1/2}^{j+1} = \tau_0$ shart bilan yechamiz;

2. (4) tenglamani $\tau_{i+1/2}^{j+1} = -\tau_0$ shart bilan yechamiz;

I. Agar $(v_{g,i+1/2}^{j+1} - v_{i+1/2}^{j+1})$ qiymatning ishorasi har ikkala holda qo‘yilgan masala uchun bir xil bo‘lsa, u holda shu nuqtada inertsiya kuchi va ichki zo‘riqish kuchi sirpanishdagi ishqalanish kuchini yenggan bo‘ladi. Shuning uchun sirpanishdagi ishqalanish holati sodir bo‘ladi va masalaning haqiqiy yechimi $(v_{g,i+1/2}^{j+1} - v_{i+1/2}^{j+1})$ miqdorning minimal absolyut qiymatiga mos keladi. Chunki ishqalanish kuchi harakatga teskari yo‘nalgan. Bu holda $v \neq v_g$ bo‘lib, urinma kuchlanish

$$\tau_{i+1/2}^{j+1} = \tau_0 \text{sign}(v_{g,i+1/2}^{j+1} - v_{i+1/2}^{j+1}) \quad (5)$$

ko‘rinishda aniqlanadi.

II. Agar $(v_{g,i+1/2}^{j+1} - v_{i+1/2}^{j+1})$ qiymatning ishorasi har ikkala holda qo‘yilgan masala uchun har xil bo‘lsa, shu nuqtada ishqalanish kuchi chegaraviy qiymatidan kichikligi kelib chiqadi, shuning uchun $v_{i+1/2}^{j+1} = v_{g,i+1/2}^{j+1}$ munosabatni qabul qilamiz, bunda quvur va grunt orasida sirpanish sodir bo‘lmaydi hamda shu onda bu nuqtada quvur va grunt zarralari bir xil tezlik bilan harakatlanadi. Bu holatda $\tau_{i+1/2}^{j+1}$ ning qiymati (4) tenglamalar sistemasidagi birinchi tenglamadan aniqlanadi.

$$\tau_{i+1/2}^{j+1} = 2 \left[(v_{g,i+1/2}^{j+1} - v_{i+1/2}^j) - c(\varepsilon_{i+1}^{j+1/2} - \varepsilon_i^{j+1/2}) \right] / (\Delta t q) - \tau_{i+1/2}^j, \quad (6)$$

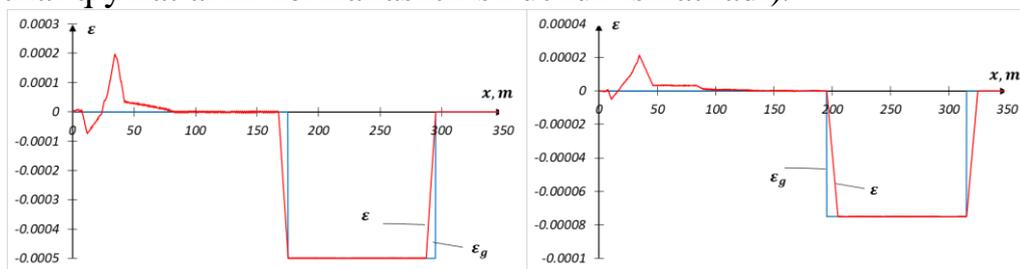
bunda $q = \pi D / F \rho$.

(1) tenglamani chekli ayirmalar sxemasi orqali yechganda albatta uning turg‘unligi muhim hisoblanadi. Tenglamalar sistemasini chekli ayirmalar usulida approksimatsiya qilinganda, uning turg‘unligi tenglamalar sistemasining xususiy hosilali hadlarini chekli ayirmalar sxemasi shakli bilan belgilanadi. Bu holat uchun chekli ayirmalar sxemasi turg‘un bo‘lishi uchun $\Delta t \cdot c / \Delta x \leq 1$ Kurant sharti bajarilishi zarur. Mazkur tadqiqot ishida Kurant shartining chegaraviy holati, ya’ni $\Delta t \cdot c = \Delta x$ munosabat olingan. Agarda $\Delta t \cdot c / \Delta x < 1$ holat olinsa, u holda olingan natijalarda parazit tebranishlar paydo bo‘ladi. Bu esa natijalarni tahlil qilishda noto‘g‘ri xulosalarga olib kelishi mumkin.

Quruq ishqalanish modelida dinamik tenglamalar sistemasini yechishning yuqorida keltirilgan mantiqiy algoritmining ishonchligini qarab chiqamiz.

Teorema: Yuqorida keltirilgan (4), (5) va (6) chekli ayirmalar sxemasi orqali approksimatsiya qilingan (1) va (2) tenglamalar sistemasining 1, 2 shartlar va I, II mantiqiy algoritm asosida olingan yechimi aniq yechimga yaqinlashishi uchun ixtiyoriy kichik $\delta > 0$ son uchun Kurant shartidan tashqari $\Delta t \cdot |v_g - v| / u_m < \delta$ shart bajarilishi yetarli. Bunda $u_m = 1m$ – o‘lchov birligi konstantasi.

Seysmik to‘lqinlar ta’sirida grunt bilan o‘zaro munosabati quruq ishqalanish modelida bo‘lgan uzun yer osti quvuridagi dinamik jaryonlarni tahlil qilish uchun hisoblash ishlarini quyidagi berilgan ma’lumotlardan foydalanib amalga oshiramiz: $L=1000\text{ m}$; $D=0.61\text{ m}$; $F=0.019\text{ m}^2$; $c=5000\text{ m/s}$; $k_x=10^7\text{ N/m}^3$; $f=0.3$; $\tau_0=5.3\text{ kPa}$; $\Delta t=0.0001\text{ s}$; gruntda to‘lqin tezligining maksimumi $v_{gm}=0.3\text{ m/s}$ (grafiklarda parametrlar qiymatlarini normallashtirish uchun ishlatiladi).

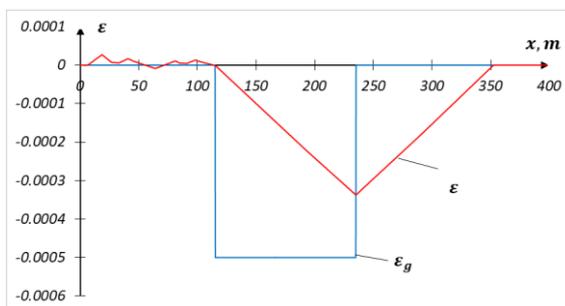


2-rasm. Grunt (ε_g) va quvurning (ε) deformatsiyalari grafiklari.
(a) – $c_g=6000\text{ m/s}$, (b) – $c_g=4000\text{ m/s}$

2-rasmda seysmik to‘lqinning to‘g‘ri burchakli impuls ko‘rinishi uchun grunt va quvurning deformatsiyalari grafiklari keltirilgan. Bunda $c_g > c$ (2a-rasm) va $c_g < c$ (2b-rasm) holatlar uchun hisoblangan natijalar keltirilgan

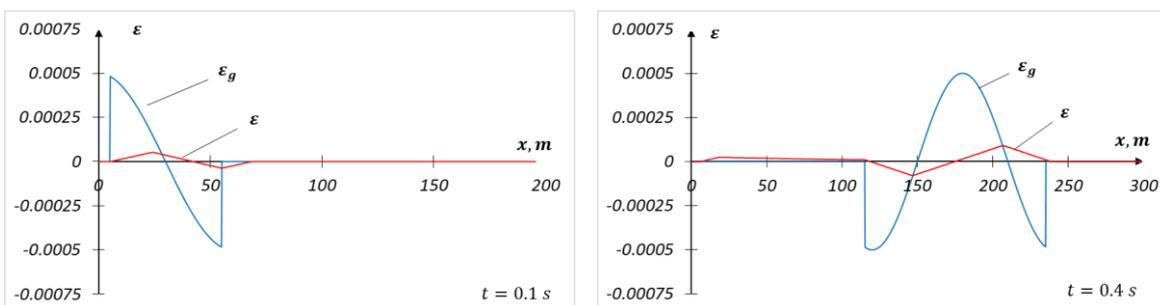
Masalaning sonli usulda olingan yechimi (2a-rasm) xarakteristikalar usuli orqali hisoblab olingan yechim bilan solishtirilganda natijalar yetarlicha mos keldi.

3-rasmda seysmik to‘lqinning to‘g‘ri burchakli impuls ko‘rinishi uchun grunt va quvurning deformatsiyalari grafigi $c_g=600 \text{ m/s}$ holda keltirilgan. Natijalardan ko‘rish mumkinki, agar gruntdagi to‘lqin tarqalish tezligi yetarlicha kichik bo‘lsa quvur deformatsiyasining maksimal qiymati grunt deformatsiyasining maksimal qiymatigacha yetib bora olmaydi, shu sababli gruntda seysmik to‘lqin to‘g‘ri to‘rtburchak ko‘rinishda berilganda quvurdagi to‘lqinning shakli uchburchak ko‘rinishda bo‘lmoqda.



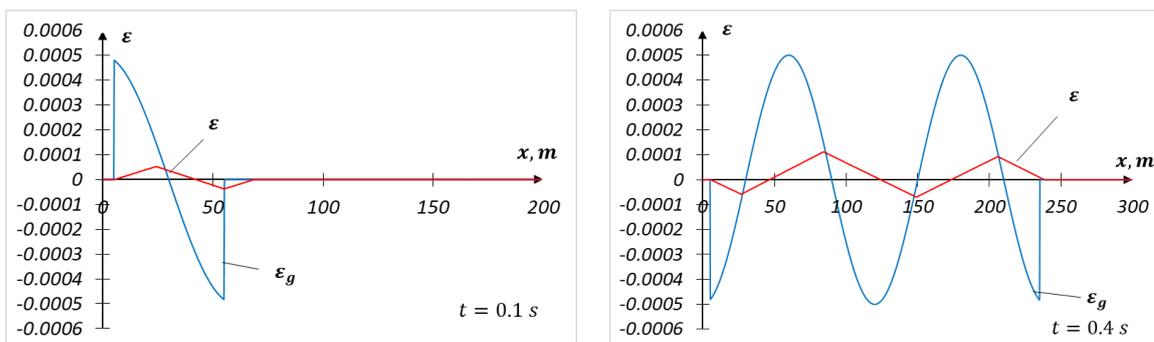
3-rasm. $t=0.4 \text{ s}$ vaqt onidagi grunt (ε_g) va quvurning (ε) deformatsiyalari grafiklari

Gruntda beriladigan seysmik to‘lqin tezligini bitta davrga mos $v_g = v_{gm} \cos(\omega(t - x/c_g)) \cdot H(t - x/c_g)$ impuls ko‘rinishda berilsa (bu yerda H –Heaviside funksiyasi), u holda $c_g < c$ bo‘lganda quvur o‘qi bo‘ylab jarayonning boshlanishida to‘lqin fronti orqasida siqilish to‘lqini mavjud bo‘lib, vaqt o‘tishi bilan bu siqilish to‘lqini yo‘qolib boradi. Quvurning chap uchidan ma’lum masofada arra tishlari shaklidagi to‘lqin hosil bo‘ladi (4-rasm), uning maksimal amplitudasi quvurning yon sirtidagi bosimga va quruq ishqalanish koeffitsientiga bog‘liq. Gruntdagi to‘lqinning orqa frontidan keying quvur sohasida qoldiq deformatsiya paydo bo‘lishini ko‘rish mumkin.



4-rasm. Turli vaqt onlaridagi grunt (ε_g) va quvurning (ε) deformatsiyalari grafiklari $c_g=600 \text{ m/s}$, $\omega=31.4 \text{ s}^{-1}$

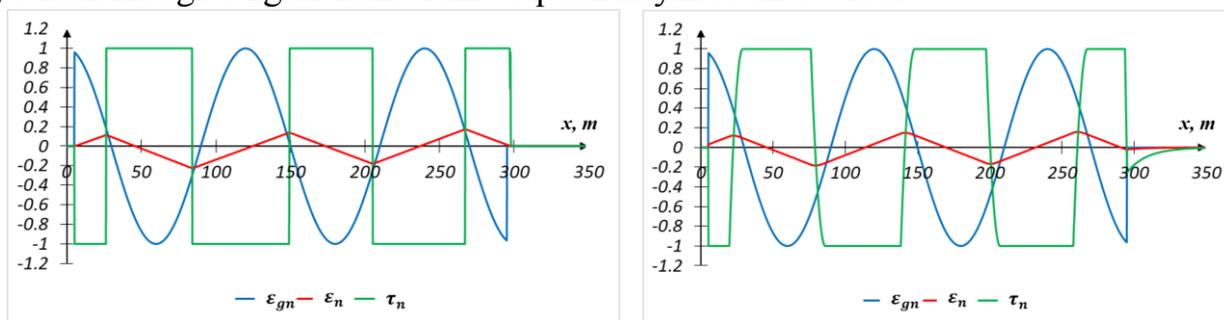
5-rasmda seysmik to‘lqin tezligi $v_g = a \cos(\omega(t - x/c_g)) \cdot H(t - x/c_g)$ garmonik ko‘rinishda berilgan holat uchun hisoblangan natijalar keltirilgan. Bu holda ham quvur o‘qi bo‘ylab jarayonning boshlanishida, to‘lqin fronti orqasida siqilish to‘lqini mavjud bo‘lib, vaqt o‘tishi bilan bu siqilish to‘lqini yo‘qolib ketishini ko‘rish mumkin.



5-rasm. Turli vaqt onlaridagi grunt (ε_g) va quvurning (ε) deformatsiyalari grafiklari
 $c_g=600 \text{ m/s}$, $\omega=31.4 \text{ s}^{-1}$

4 va 5-rasmlardan ko‘rish mumkinki quvurdagi to‘lqin tarqalish tezligi grumdagi to‘lqin tarqalish tezligidan katta bo‘lgan dinamik jarayonda quvur bo‘ylab oldinda harakatlanayotgan siquvchi to‘lqinlarni orqa tomondan kelayotgan cho‘zuvchi to‘lqinlar yutib borganligi uchun “Raxmatulin to‘lqini”ga o‘xshash to‘lqinlar paydo bo‘ladi.

O‘zaro munosabat quruq ishqalanish (6a-rasm) va ideal elastik-plastik (6b-rasm) modellarda bo‘lganda $t=0.5 \text{ s}$ vaqt onidagi quvur $\varepsilon_n = \varepsilon / \varepsilon_{gm}$ va grunt $\varepsilon_{gn} = \varepsilon_g / \varepsilon_{gm}$ deformatsiyalarining hamda urinma kuchlanish $\tau_n = \tau / \tau_0$ larning normallashtirilgan grafiklari keltirilgan. Bunda ε_{gm} – grunt deformatsiyasining maksimal absolyut qiymati. Ko‘rinib turibdiki, ideal elastik-plastik o‘zaro ta’sir modelida to‘lqin frontining oldi qismida quvur deformatsiyasi va urinma kuchlanishning kichik qiymati mavjud bo‘lmoqda hamda to‘lqin frontidan boshlab jarayon quruq ishqalanish holatiga o‘tmoqda. Quruq ishqalanish modelida quruq ishqalanish kuchi o‘z yo‘nalishini keskin o‘zgartiradi. Ideal elastik-plastik holatda o‘zaro munosabatdagi quruq ishqalanish holatigacha elastik bo‘lganligi sababli kuchlanish yo‘nalishidagi o‘zgarish ma’lum vaqtdan keyin sodir bo‘ladi.



(a) – quruq ishqalanish modeli

(b) – ideal elastik-plastik model

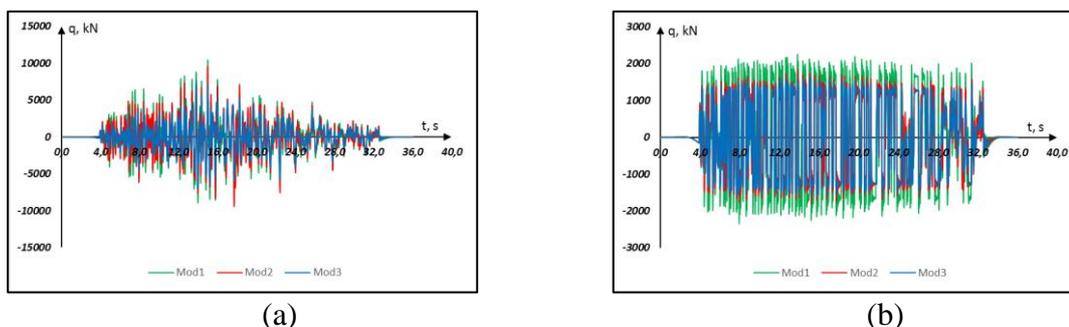
6-rasm. Quvur (ε_n) va grunt (ε_{gn}) deformatsiyalari hamda urinma kuchlanishlarning (τ_n) normallashtirilgan grafiklari. $c_g=600 \text{ m/s}$, $\omega=31.4 \text{ s}^{-1}$ ($\varepsilon_{gm}=0.0005$)

Ideal elastik-plastik modelda k_x ning qiymati katta bo‘lsa va ishqalanish koeffitsienti o‘zgarmasa, jarayon ham quruq ishqalanish holatiga tezroq chiqadi. Shuningdek bu holatda grumdagi to‘lqin fronti oldidagi quvur sohasidagi sezilarli siqilish jarayoni nisbatan kichik sohada mavjud bo‘ladi.

Dissertatsiyaning “**Chegaraviy shartda quruq ishqalanish modeli dinamik masalalar, bino va inshootlarni seysmik izolyatsiyalash masalasini yechish**” deb nomlangan uchinchi bobida taqsimlangan va jamlangan massali konstruksiyalar

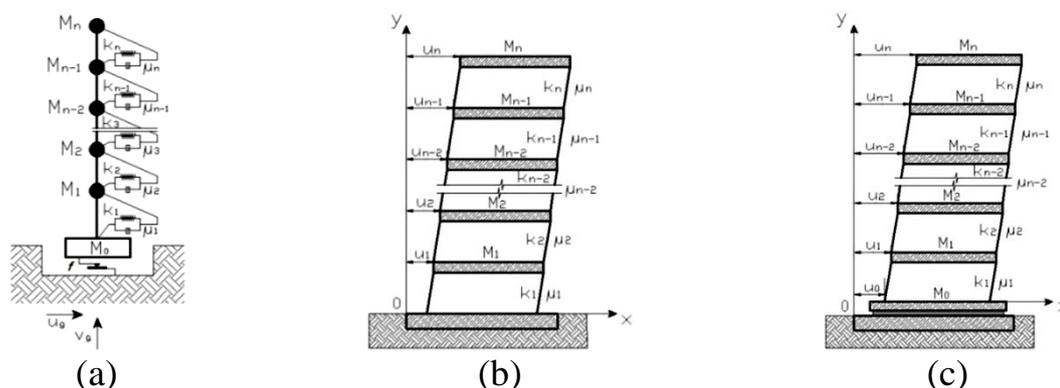
uchun poydevor va rostverk orasida quruq ishqalanish modelidan foydalangan holda seysmik izolyatsiya mavjud boʻlgan bino va inshootlarning seysmodinamikasi masalalarini yechishning yangi algoritmi taklif qilingan.

Dastlab turli modellardan foydalangan holda hisob-kitoblar natijasida olingan natijalarni taqqoslaymiz. Mod1 – qavatlar kesimida jamlangan massalarga ega boʻlgan siljish modeli; Mod2 – Timoshenko balka modeli taqsimlangan va jamlangan parametrlarga ega; Mod3 – Bernulli-Eyler balka modeli taqsimlangan va jamlangan parametrlarga ega.



7-rasm. Abhar (Eron, 8 ballik) haqiqiy zilzila yozuvlari taʼsirida toʻqqiz qavatli binoning birinchi qavatidagi kesuvchi kuch qiymatining oʻzgarishi. Quruq ishqalanish elementini hisobga olgan (a) va hisobga olmagan (b) hollar uchun.

Intensevligi 8 va 9 ballik zilzilalar uchun binolarning jamlangan massalari bilan siljish modelidan, taqsimlangan va jamlangan massali Timoshenko balka va Bernoulli-Eyler balka modellari yordamida hisoblangan kesish kuchlari mos ravishda 20% va 60% gacha farqlanadi (7-rasm). Sirpanuvchan poydevorli binolarni hisoblashda Timoshenko balka modelidan foydalanishni tavsiya qilishimiz mumkin, chunki bu model binolarning egilish va siljish tebranishlarini hisobga oladi. Bizning masalada qaralayotgan binolarda gruntning karakteristiklari hisobga olinmaydi va asosan siljishga ishlagani uchun biz quyida keltiriladigan masalalarni siljish modelida hisoblab natijalarni solishtiramiz.



8-rasm. Jamlangan massaga ega elastik sterjen koʻrinishidagi konstruksiyaning hisoblash sxemasi (a), koʻp qavatli bino qattiq asosga ega boʻlganda (b) va seysmik izolyatsiya qilingandagi (c) hisoblash sxemalari

Quruq ishqalanish yordamida koʻp qavatli binolarni seysmik izolyatsiya qilishning hisoblash sxemasi quyidagi shaklni oladi (8-rasm).

Bino jamlangan massalar va inersiyasiz elastik bog‘lanishlarga ega bo‘lgan bir o‘lchovli ko‘ndalang model bilan ifodalanadi. Ushbu konstruksiya uchun siljish chekli elementlarini qo‘llaymiz, natijada quyidagi oddiy differensial tenglamalar sistemasiga kelamiz:

$$[M] \cdot \{\ddot{U}\} + [C] \cdot \{\dot{U}\} + [K] \cdot \{U\} = \{Q(t)\} \quad (7)$$

$$\{U\} = \{U_{st}\}, \quad \{\dot{U}\} = 0, \text{ da } t = 0,$$

bunda $[M]$ – massalarning diagonal matritsasi, $[K]$ – bikrlilik matritsasi; $[C] = \alpha \cdot [M] + \beta \cdot [K]$ – qovushqoqlik matritsasi Reley usulida har bir element uchun alohida quyidagi ko‘rinishda quriladi:

$$[C^e] = \alpha_i [M^e] + \beta_i [K^e]$$

α_i, β_i – tebranish energiyasini yo‘qotish foizi orqali yoki logarifmik dekrement va xususiy chastotalari orqali topiladi. $\{U\} = \{u_0, u_1, \dots, u_n, v_1, \dots, v_n\}^T$ – ko‘chish vektori, u_i, v_i – i -chi massaning gorizontaal va vertikal ko‘chishi; $\{U_{st}\}$ – vaqtning dastlabki momentidagi ko‘chish vektori, ko‘ndalang ko‘chishga mos keladigan bu vektor elementlari nolga teng, vertikal ko‘chish esa statik masala yechimidan aniqlanadi. $[M_0]$ massa va sirpanuvchan pastki poydevorning o‘zaro bog‘lanish sharti quyidagi shaklni oladi

$$u_0 = u_g - u_r, \text{ agar } |F_0| < |F_{fr}|, \text{ ya'ni birgalikda harakatlanayotganda,} \quad (8)$$

$$F_0 = F_{fr}, \text{ sirpanganda,} \quad (9)$$

bunda u_0, v_0 – rostverkning ko‘chishlari, u_g, v_g – poydevorning pastki qismining gorizontaal va vertikal ko‘chishlari, ya‘ni raqamlashtirilgan zilzila seysmogrammasining taxminiy funktsiyalari; u_r – poydevorning rostverkka nisbatan sirpanishsiz ko‘chishining boshlanishi onidagi qiymati, ularning birgalikdagi harakati davrida bu qiymat o‘zgarmaydi (boshlang‘ich vaqtda $u_r=0$), F_0 – asos va poydevor orasidagi kuchning noma‘lum qiymati; $F_{fr} = \text{sign}(\dot{u}_g - \dot{u}_0) \cdot f \cdot P$ – sirpanishdagi quruq ishqalanish kuchining qiymati, f – quruq ishqalanish koeffitsienti; P – dinamik jarayonda poydevorning sirpanish elementiga bosim kuchi, agar vertikal tebranishlar hisobga olinmasa bu kuch binoning og‘irligi hisoblanadi.

Shuni ta‘kidlash kerakki, vertikal tebranishlar binolarning gorizontaal tebranishlariga bog‘liq emas va gorizontaal tebranishlar (9) sharti orqali binolarning vertikal tebranishlariga bog‘liq bo‘ladi, chunki vertikal tebranishlar paytida sirpanuvchan poydevorga bosim o‘zgaradi.

Birgalikdagi harakatda u_0 siljish (8) tenglikdan aniqlanadi va M_1 massa uchun harakat tenglamasi quyidagi shaklni oladi:

$$M_1 \ddot{u}_1 + k_1 u_1 + c_1 \dot{u}_1 - k_2 (u_2 - u_1) - c_2 (\dot{u}_2 - \dot{u}_1) = k_1 u_0 + c_1 \dot{u}_0 \quad (10)$$

Ushbu holatda $Q_1 = k_1 u_0 + c_1 \dot{u}_0$ vektorning jamlangan massalarning gorizontaal ko‘chishlariga mos keladigan qolgan elementlari $\{Q\}$ nolga teng. M_1 massaning vertikal harakati tenglamasi (10) ga o‘xshash shaklni oladi.

Quruq ishqalanish bilan sirpanish faqat (9) shart bajarilganda sodir bo‘ladi. Ko‘rib chiqilayotgan (7), (8), (9) masalalar nochiziqli masalalar bo‘lib, noma‘lum funktsiya F_0 mavjud va dinamik jarayon davomida $[M]$ va $[K]$ matritsalarining

o'lchamlari o'zgarib turadi. Sirpanishdagi holat uchun M_0 massa tenglamasi quyidagicha bo'ladi.

$$M_0 \cdot \ddot{u}_0 - k_1(u_1 - u_0) - c_1(\dot{u}_1 - \dot{u}_0) = F_{fr}, \text{ hamda } Q_0 = F_{fr}.$$

Masalani to'raligicha yechish uchun quyidagi algoritmdan foydalanamiz. Har bir vaqt qadamida masalani uchta variantda yechamiz:

1. (7) tenglama (8) shart bilan yechiladi;
2. (7) tenglama (9) shart bilan yechiladi, $F_0 = f \cdot P$ bo'lganda;
3. (7) tenglama (9) shart bilan yechiladi, $F_0 = -f \cdot P$ bo'lganda.

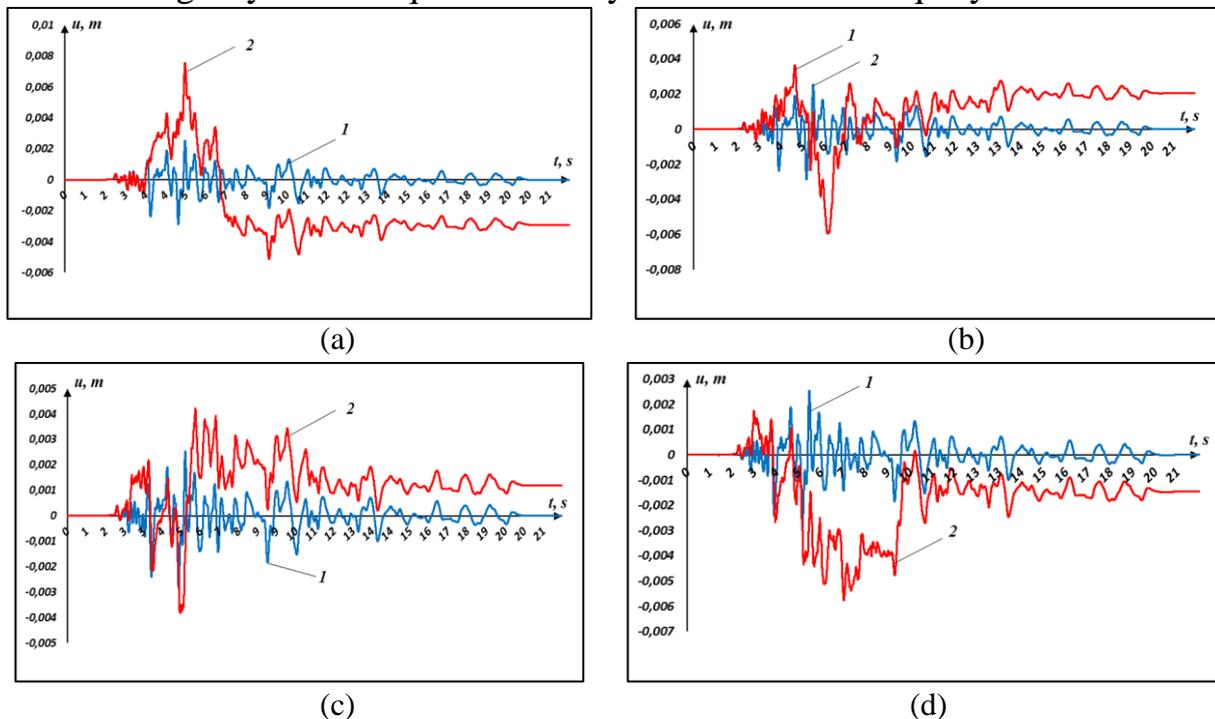
Matritsalar $[M]$ va $[K]$ birinchi formulada ikkalasi ham $2n \times 2n$ o'lchamga ega (bunda n – binoning qavatlar soni) va ikkinchi va uchinchi formulalarda $(2n+1) \times 2n$ ga teng bo'ladi. Ushbu uchta yechimdan haqiqiy yechimni tanlash II bobda keltirilgan mantiqiy algoritm asosida amalga oshiriladi.

Hisob jarayoni vaqtida $[M]$, $[K]$, $[C]$ matritsalarining o'lchamlari o'zgarib turadi. Uchala masala ham Nyumark usuli bo'yicha yechiladi. Aproksimatsiyaning vaqt qadami zilzilalarni qayd etish qadamidan kichikroq bo'lganda raqamlashtirilgan zilzila seysmogrammasi qayd etish bosqichlari oralig'ida ko'pchilik hollarda chiziqli funksiya bilan aproksimatsiya qilinadi. Lekin Nyumark usulida tezliklar va tezlanishlar qiymatlaridan, shu jumladan ularning berilgan seysmik to'lqindagi qiymatlaridan foydalaniladi. Tezlik va tezlanishlarni hisoblashda raqamlashtirilgan seysmogrammalarini chiziqli funksiya bilan aproksimatsiya qilib foydalansak qo'pol xatolarga olib keladi. Shuning uchun seysmik to'lqin tezlanishlarda beriladi, keyin esa tezliklar va ko'chishlar Nyumark formulalari bo'yicha hisoblanadi. Hisoblashlarning raqamlash qadamiga nisbatan vaqt bo'yicha maydaroq qadamlar bilan amalga oshirilishini ta'minlash uchun Ermit splaynidan foydalaniladi.

To'rt qavatli 76-017SA/53 seriyali bino quyidagi xususiyatlarga ega: reja bo'yicha o'lchami 389.88 m^2 ga ega bo'lgan g'ishtli bino; poydevorning yuqori qismi va qavatlardagi jamlangan massalar $M_0=698000 \text{ kg}$, $M_1=495000 \text{ kg}$, $M_2=495000 \text{ kg}$, $M_3=495000 \text{ kg}$, $M_4=497575 \text{ kg}$; poydevorning pastki qismiga tushuvchi binoning umumiy og'irligi $P=26269635 \text{ N}$ ga teng; qavatlarning ko'ndalang bikrligi bir xil $k_i=16.08 \cdot 10^8 \text{ N/m}$; qavatlardagi qurilish materialining qovushqoqligi bir xil $\mu_i=26.9 \cdot 10^5 \text{ Ns/m}$. Qattiq poydevor bilan birgalikdagi xususiy tebranish chastotalarining qiymatlari: $\omega_1=34 \text{ Hz}$, $\omega_2=62 \text{ Hz}$, $\omega_3=87 \text{ Hz}$, $\omega_4=106 \text{ Hz}$.

To'qqiz qavatli 76-017SP/53 seriyali bino quyidagi xususiyatlarga ega: reja bo'yicha 291.6 m^2 o'lchamga ega bo'lgan katta panelli bino; poydevorning yuqori qismi va qavatlardagi jamlangan massalar $M_0=449000 \text{ kg}$, $M_1=379500 \text{ kg}$, $M_2=379500 \text{ kg}$, $M_3=379500 \text{ kg}$, $M_4=379500 \text{ kg}$, $M_5=379500 \text{ kg}$, $M_6=379500 \text{ kg}$, $M_7=379500 \text{ kg}$, $M_8=379500 \text{ kg}$, $M_9=341000 \text{ kg}$; poydevorning pastki qismiga tushuvchi binoning umumiy og'irligi $P=37494800 \text{ N}$ ga teng; qavatlarning ko'ndalang bikrligi $k_i=32.357 \cdot 10^9 \text{ N/m}$ ga teng; qurilish materialining qovushqoqligi $\mu_i=10.58 \cdot 10^6 \text{ Ns/m}$ ga teng. Qattiq poydevor bilan birgalikdagi xususiy tebranish chastotalarining qiymatlari: $\omega_1=79 \text{ Hz}$, $\omega_2=160 \text{ Hz}$, $\omega_3=239 \text{ Hz}$, $\omega_4=314 \text{ Hz}$, $\omega_5=380 \text{ Hz}$.

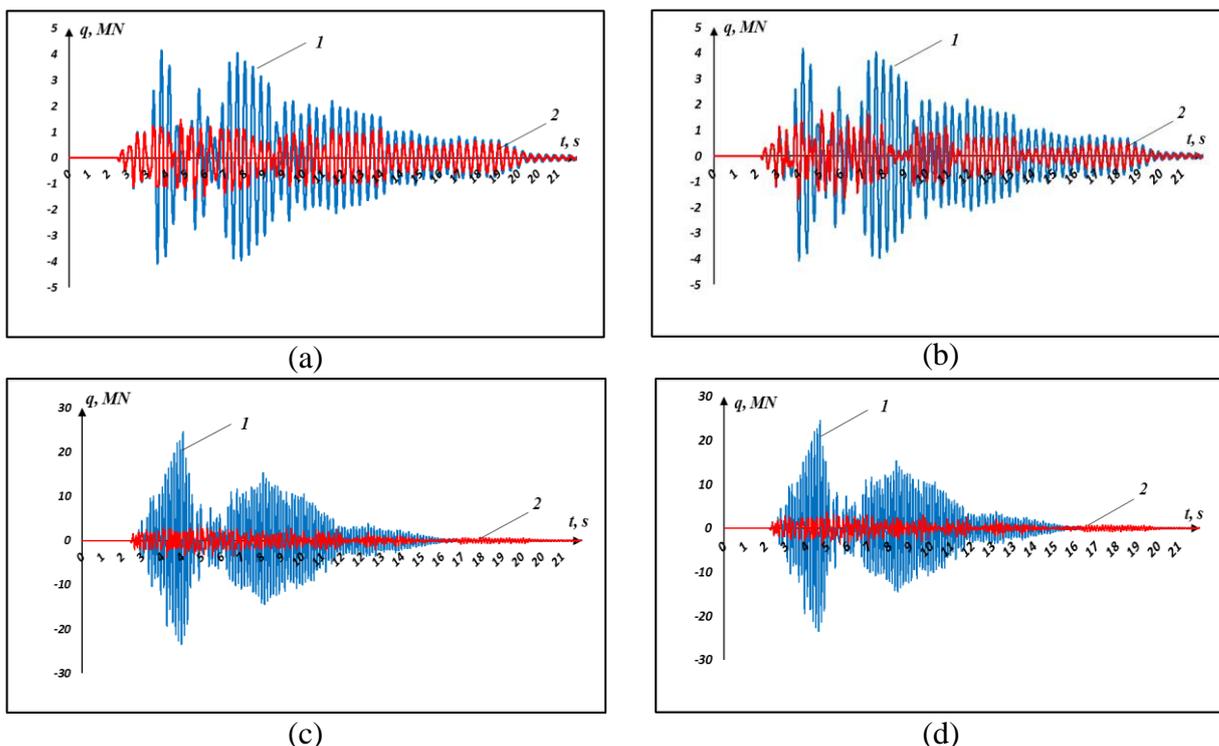
Quruq ishqalanish masalalarini sonli yechishda, oshkor yoki oshkormas chekli ayirmalar sxemasini tanlashdan qat'iy nazar, yetarli aniqlikni ta'minlash uchun vaqt qadami to'g'ri tanlanishi kerak. Bizning masalada vaqt qadami 0.0001 s qilib tanlab olindi. 4 va 9 qavatli binolarning xarakteristikalarini hamda yevropaning ma'lumotlar bazasidan olingan kuchli zilzilalarning mavjud yozuvlaridan foydalanib bino va inshootlardagi seysmik to'liqlarni kamaytirish masalalarini qaraymiz.



9-rasm. Cairano (Italiya, 8 ballik) haqiqiy zilzila yozuvlari ta'sirida to'rt qavatli (a, b) hamda to'qqiz qavatli (c, d) binolarning vaqt o'tishi bilan poydevorning pastki (1) va yuqori (2) qismlarining gorizont siljishi haqiqiy zilzila yozuvlarining gorizont (a, c) va bir vaqtning o'zida gorizont va vertikal (b, d) ta'sirlari hisobga olinganda

To'rt va to'qqiz qavatli binolarning haqiqiy zilzila yozuvlari ostida gorizont va bir vaqtning o'zida gorizont va vertikal komponentalari ta'sirlari hisobga olingandagi natijalarini solishtirib tahlil qilamiz. Birinchi sirpanishning paydo bo'lishi pastki poydevorning harakat yo'nalishining o'zgarishi bilan bog'liq. Quruq ishqalanish bilan sirpanishdan birgalikdagi harakatga va aksincha o'tish yuqorida muhokama qilingan shartlarga qarab ko'p marta sodir bo'ladi. Jarayon oxirida qoldiq ko'ndalang siljish gorizont ta'sir uchun to'rt qavatli 0.0028 m (9a-rasm), to'qqiz qavatli 0.0011 m (9c-rasm) va vertikal harakatni hisobga olgan holda to'rt qavatli 0.0019 m (9b-rasm), to'qqiz qavatli 0.0014 m (9d-rasm) ga teng bo'ladi.

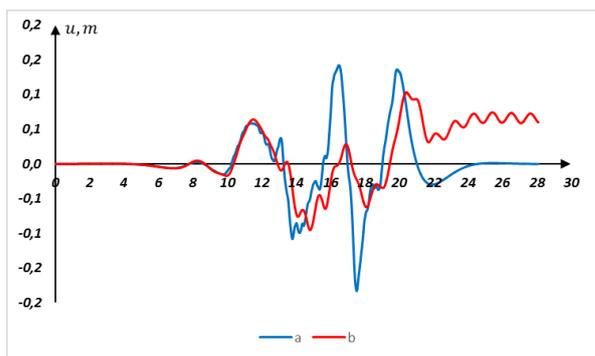
Quyidagi grafiklar shuni ko'rsatadiki quruq ishqalanish koeffitsienti $f=0.05$ ga teng bo'lgan ftoroplastli sirpanuvchan poydevordan foydalanish sirpanuvchan poydevor bo'lmagan holga nisbatan maksimal qirquvchi kuch qiymatini to'rt qavatli va to'qqiz qavatli binolar uchun mos ravishda 2.7 (10a-rasm) va 6.4 (10c-rasm) barobar kamayishiga olib keladi. Vertikal harakatni hisobga olgan holda bu qiymat to'rt qavatli va to'qqiz qavatli binolar uchun mos ravishda 2.3 (10b-rasm) va 5.4 (10d-rasm) barobar kamaytiradi. Bundan xulosa qiladigan bo'lsak, vertikal ta'sirni hisobga olish qirquvchi kuch qiymatiga ta'sir qiladi.



10-rasm. Cairano (Italiya, 8 ballik) haqiqiy zilzila yozuvlari ta'sirida to'rt qavatli (a, b) hamda to'qqiz qavatli (c, d) binolarning birinchi qavatida qirquvchi kuchining o'zgarishi: (1) sirpanish hisobga olinmagan hol, (2) sirpanish hisobga olingan hol; (a, c) real zilzila yozuvlarining gorizonta ta'sirida, (b, d) bir vaqtning o'zida ham gorizonta ham vertikal ta'siri hisobga olinganda

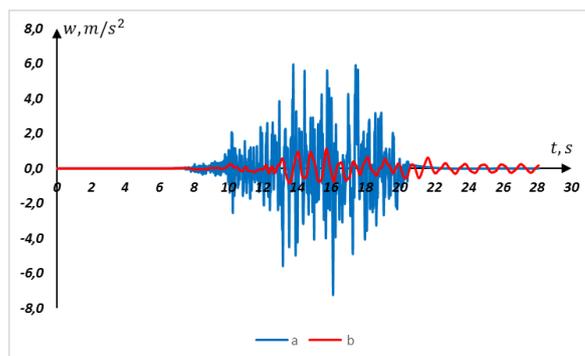
Quruq ishqalanish elementlari yordamida atom elektr stansiyasi (AES) turbina blokini seysmik izolyatsiyalash masalasini qaraymiz. Turboagregatning massasi $2.5 \cdot 10^6 \text{ kg}$, turboagregat poydevorining massasi $5.0 \cdot 10^6 \text{ kg}$. Turboagregat va poydevor orasidagi harakatga ekvivalent prujinaning bikrligi $1.0 \cdot 10^8 \text{ N/m}$, vertikal bikrligi esa $2 \cdot 10^9 \text{ N/m}$. Poydevorning gorizonta va vertikal bikrligi mos ravishda $1 \cdot 10^{10} \text{ N/m}$ va $2 \cdot 10^{10} \text{ N/m}$ ga teng. So'ndiruvchi koeffitsientlari $\alpha=0.94 \text{ s}^{-1}$, $\beta=0.00116 \text{ s}$ ga teng. Asos va poydevorlar orasidagi quruq ishqalanish koeffitsienti 2 xil 0.025 va 0.05 qilib tanlab olingan.

11c-rasmda asos va turboagregatning ko'chishlari, 11d-rasmda esa tezlanishlari grafiklari keltirilgan. Quruq ishqalanish koeffitsiyenti $f=0.025$ qiymatida turboagregat maksimal tezlanishi asosning maksimal tezlanishiga nisbatan 6.5 marta kamaydi. V.A. Tarasovning ishidagi ma'lumotlardan foydalanib hisob kitob ishlarini amalga oshirdik va uning modelida hisoblash, ya'ni quruq ishqalanish o'rniga prujinadan foydalanish, hatoliklarga olib kelishini ko'rsatdik (11e va 11f rasmlar).



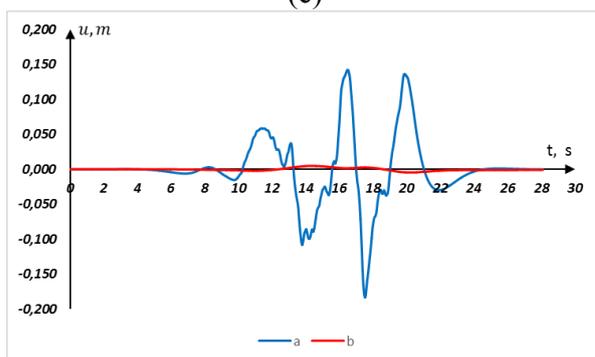
a: $u_{\max} = 0.183 \text{ m}$; b: $u_{\max} = 0.103 \text{ m}$

(c)



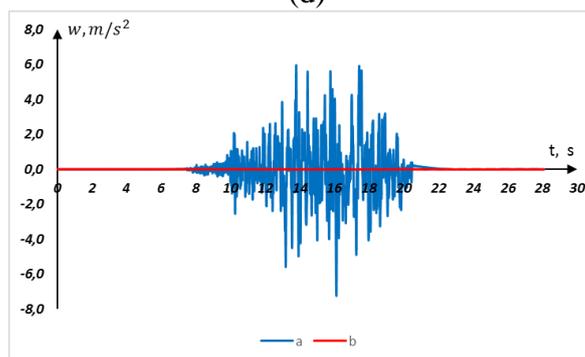
a: $w_{\max} = 7.23 \text{ m/s}^2$; b: $w_{\max} = 1.12 \text{ m/s}^2$

(d)



a: $u_{\max} = 0.183 \text{ m}$; b: $u_{\max} = 0.00499 \text{ m}$

(e)



a: $w_{\max} = 7.23 \text{ m/s}^2$; b: $w_{\max} = 0.0112 \text{ m/s}^2$

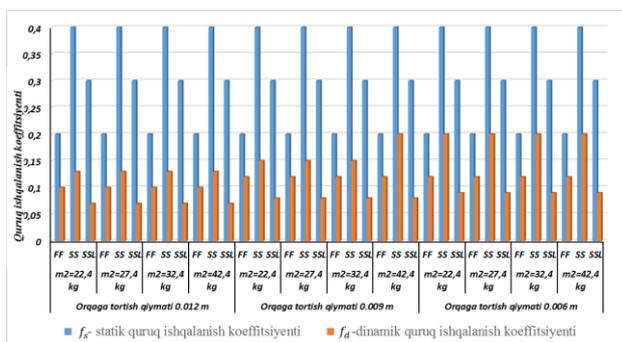
(f)

11-rasm. Asos (a) va turboagregatning (b) ko‘chishlari (c,e) va tezlanishlari (d, f) grafiklari

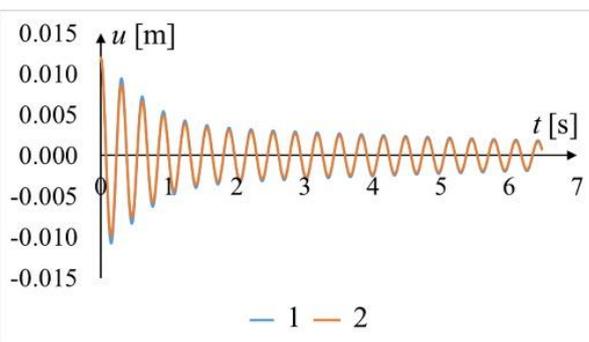
Dissertatsiyaning “**Amonton-Kulon quruq ishqalanish dinamik koeffitsiyentini aniqlash muammosi va uning yechimi**” deb nomlangan to‘rtinchi bobida laborotoriya eksperimentini o‘tkazish bo‘yicha yangi uslub ishlab chiqilgan hamda eksperiment natijalarini analitik yechim bilan solishtirish asosida turli materiallar uchun Amonton-Kulon quruq ishqalanish dinamik koeffitsiyenti aniqlangan. Laborotoriya eksperimenti erkin tebranishga mo‘ljallangan.

Tebranish stoliga o‘lchamlari $0.45 \times 0.46 \times 0.17 \text{ m}$ bo‘lgan po‘lat plitalardan yasalgan quti mahkam qilib o‘rnatildi. Po‘lat quti 0.1 m balandlikdagi qum bilan to‘ldirilgan. O‘lchamlari $0.45 \times 0.46 \times 0.005 \text{ m}$ bo‘lgan po‘lat plita qum ustida harakatlanmaydigan qilib o‘rnatildi. Platformaning umumiy massasi 131.6 kg . O‘lchamlari $0.355 \times 0.363 \times 0.0224 \text{ m}$ bo‘lgan po‘lat plita po‘lat plastinka ustida joylashtirilgan. Yuqori po‘lat plitaning (rostverk) massasi 22.4 kg .

Kompyuterga yozib olingan tebranishlar bo‘yicha tebranishlar chastotasi va to‘rtta vertikal plastinkaning bikrligi, qovushoqlik koeffitsienti hisoblab chiqilgan. Keyinchalik, tuzilgan tenglamalar bo‘yicha birgalikda va sirpanuvchan yechimlar asosida maxsus ishlab chiqilgan dastur yordamida dinamik jarayonning asosiy ko‘rsatkichlari, ya’ni quruq ishqalanishning dinamik koeffitsienti (12-rasm), tezlik va tezlanishning mutlaq maksimal qiymatlari hisoblab chiqildi. Quruq ishqalanish dinamik koeffitsientining qiymatini aniqlash uchun nazariy natijalarni tajriba natijalari bilan solishtirilib, bu koeffitsientning qiymatini qabul qilinadigan aniqlikdagi ko‘chishlar bilan mos kelguncha asta-sekin kamaytirildi (13-rasm).



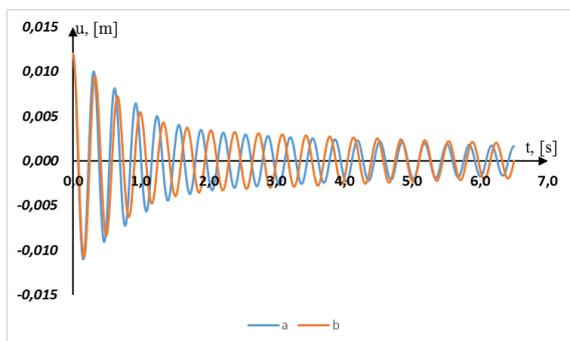
12-rasm. Har xil materiallar uchun statik va dinamik quruq ishqalanish koeffitsientlari qiymatlarining gistogrammasi.



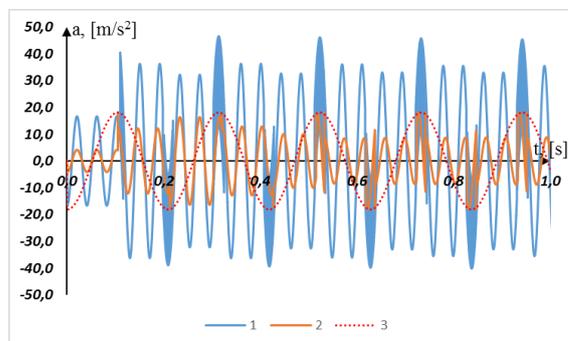
13-rasm. Vaqt bo'yicha ko'chishlar grafiklari. Pastki plitaning tebranishlari (1 – eksperiment, 2 – analitik hisoblash)

Eksperiment natijalari bilan analitik hisoblash natijalarning bir biriga mos kelishi simulatsiya modelining μ va k_1 parametrlari sistemaning birgalikdagi harakatidagi so'ndiruvchi logarifmik dekrementini va tebranish davrini aniq o'lchash yo'li bilan aniqlanganligi bilan bog'liq. Massalarning birgalikdagi harakatidan ularning sirpanish orqali harakatga o'tishi sistema tezlanishining absolyut qiymati $g \cdot f_d$ dan oshganda sodir bo'ladi. Tezliklar teng bo'lganda sirpanish holatidan massalarning birgalikdagi sirpanishsiz harakatiga o'tish sodir bo'ladi.

Ko'pgina tadqiqotchilar quruq ishqalanish bilan bog'liq masalalarni yechishda SIGNUM funksiyasidan foydalanishadi. Biz quyida SIGNUM funksiyadan foydalanib olingan natijalarni yaratilgan mantiqiy algoritm yordamida olingan natijalar bilan solishtirish asosida, SIGNUM funksiyadan foydalanish xatoliklarga olib kelishini ko'rsatamiz.



14-rasm. Ko'chish grafiklari. SIGNUM funksiyasi yordamida olingan yechimni (a) yaratilgan mantiqiy algoritm yordamida olingan yechim (b) bilan solishtirish



15-rasm. Tezlanish grafiklarini solishtirish: 1 – SIGNUM funksiyasi yordamida; 2 – mantiqiy algoritm yordamida; 3 – indenterning tezlanishi

14-rasmda yaratilgan mantiqiy algoritmga eksperimentdan olingan qiymatlarni quyish natijasida olingan yechim (b) SIGNUM funksiyasidan foydalanish bilan olingan yechimlarini taqqoslash ko'rsatilgan. 15-rasmda ikkita algoritm yordamida hisoblangan jismning tezlanishi grafiklarini taqqoslash keltirilgan. Turli masalalarni sonli yechish natijalaridan ko'rish mumkinki, SIGNUM funksiyasidan bevosita foydalanish har doim ham to'g'ri yechimga olib kelavermaydi. Hisoblangan tezlanishlarning noto'g'ri qiymatlari inersiya kuchining noto'g'ri qiymatlariga va ba'zi hollarda muammolarni yechishning noto'g'ri natijalariga olib keladi.

XULOSA

“Quruq ishqalanish elementlari mavjud konstruksiyalar uchun dinamik masalalar” mavzusi bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasida keltirilgan tadqiqot natijalari asosida quyidagi xulosalar taqdim etildi:

1. Quruq ishqalanish kuchi mavjud konstruksiyalardagi dinamik jarayonlar o‘ziga xos chiziqli bo‘lmagan masalalar bo‘lganligi uchun uni yechishning algoritmi sonli usullar va mantiqiy algoritm asosida ishlab chiqilgan.

2. Haqiqiy zilzila yozuvlarining gorizontaal va vertikal komponentalaridan foydalanib, konstruksiyada quruq ishqalanish kuchi mavjud holda ilk bor “stick-slip” shaklidagi jarayonda yopishib va sirpanib harakatlanishlarning boshlanish vaqtlarini aniqlash yordamida dinamik masalalar yechilgan.

3. Uzun yer osti quvurining grunt bilan o‘zaro munosabati quruq ishqalanish modeli bilan ifodalanganda seysmik to‘lqin ta‘sirida quvurda “Raxmatulin to‘lqini”ga o‘xshash to‘lqin tarqalishi aniqlandi.

4. Gruntidagi to‘lqin tarqalish tezligi quvurdagi to‘lqin tarqalish tezligidan katta bo‘lgan holatda jarayon statsionar holatga erishgandan so‘ng, gruntidagi va quvurdagi deformatsiyalar bir xil bo‘ladi, to‘lqin fronti yaqinida esa nostatsionarlik hisobiga deformatsiyalar farqlanishi kuzatildi.

5. Bino va inshootlarni seysmik izolyatsiya qilishda asos va poydevor orasiga yetarli sirpanishni ta‘minlovchi materiallardan, xususan ftoroplastdan, foydalanish asosdagi seysmik to‘lqinlarning yuqori qavatlariga ta‘sirini bir necha marta kamayishiga olib kelishi aniqlandi.

6. Quruq ishqalanishning dinamik koeffitsiyentini aniqlash bo‘yicha o‘tkazilgan laboratoriya ekperimenti natijasiga ko‘ra aniqlangan dinamik ishqalanish koeffitsiyenti statik ishqalanish koeffitsiyentidan temir-temir yog‘langanda uch barobargacha, ftoroplast4-ftoroplast4 da ikki barobargacha kam bo‘lishi aniqlandi.

7. Tadqiqot ishida qo‘yilgan chiziqli bo‘lmagan masalalar yechimlari laboratoriya eksperimentlari natijalari hamda boshqa tadqiqotchilar yechimlari bilan taqqoslanib, dinamik masalani yechishning mantiqiy algoritmining ishonchiligi ko‘rsatildi.

**РАЗОВЫЙ НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ
СТЕПЕНЕЙ НА ОСНОВЕ НАУЧНОГО СОВЕТА
PhD.15/03.06.2023.FM/T.73.08 ПРИ ТАШКЕНТСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ ТРАНСПОРТНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТРАНСПОРТНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

ТУРДИЕВ МАЛИКЖОН САЙФИДДИН ЎҒЛИ

**ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ НАЛИЧИИ
ЭЛЕМЕНТОВ С СУХИМ ТРЕНИЕМ**

01.02.04 – “Механика деформируемого твердого тела”

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

Ташкент – 2025

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей Аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за номером B2023.4.PhD/FM928

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном транспортном университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-сайте Научного Совета (<https://tstu.uz/page/122>) и Информационно-образовательном портале "ZiyoNet" (www.ziyo.net).

Научный руководитель:	Мирзаев Ибрахим доктор физико-математических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Мардонов Батир доктор физико-математических наук, профессор Сафаров Исмаил Иброхимович доктор физико-математических наук, профессор
Ведущая организация:	Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека

Защита диссертации состоится 17 января 2025 года в 14⁰⁰ часов на заседании разового научного совета на основе научного совета PhD.15/03.06.2023.FM/T.73.08 при Ташкентском государственном транспортном университете. (Адрес: 100167, г. Ташкент, ул. Темирийўлчилар, дом 1, комната 259. Тел.: (+99871) 299-00-01; факс: (+99871) 293-57-54, e-mail: rektorat@tstu.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного транспортного университета (регистрационный номер - 161). (Адрес: 100167, г. Ташкент, ул. Темирийўлчилар, дом 1. Тел.: (+99871) 299-05-66).

Автореферат диссертации разослан _____ 2025 года.
(протокол реестра № __ от _____ 2025 г.)

Х.М. Шадиметов
Председатель разового Научного совета
по присуждению ученых степеней,
д.ф.-м.н., проф.

Ф.А. Нуралиев
Ученый секретарь разового Научного совета
по присуждению ученых степеней,
д.ф.-м.н., проф.

Д.Б. Эшмаматова
Председатель Научного семинара при
разовом Научном совете по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., доцент.

ВВЕДЕНИЕ (аннотция диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире особое внимание уделяется разработке и использованию эффективных способов сейсмоизоляции с целью повышения сейсмостойкости строящихся современных сооружений. Из-за огромных потерь, вызванных сильными землетрясениями, произошедшими за последние годы, спрос на изучение сейсродинамических процессов, наблюдаемых в конструкциях во время землетрясений, неуклонно растет. Ярким примером этого являются потери, вызванные землетрясениями, произошедшими в последние годы в Турции, Японии, Индонезии и на Гаити. В этой связи особое внимание уделяется сейсмостойкости подземных и наземных сооружений.

В мире интенсивно проводятся фундаментальные и прикладные исследования в области сейсмической защиты зданий и сооружений с целью уменьшения ущерба, причиняемого землетрясениями. В настоящее время устройства сейсмической защиты широко используются для сейсмоизоляции зданий и сооружений, но поведение и эффективность устройств сейсмической защиты недостаточно изучены. В этом направлении важной задачей считается разработка алгоритмов решения сложных динамических уравнений, обусловленных наличием сил трения между элементами конструкции, точная оценка времени начала скольжения при взаимодействии по модели сухого трения. В связи с этим одним из насущных вопросов является проведение научных исследований по защите зданий и сооружений от сейсмических волн и выработка рекомендаций по их применению.

Учитывая, что 78% территории нашей республики расположено в сейсмически активных зонах, проводятся широкие мероприятия по обеспечению сейсмостойкости подземных и наземных 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 реализации этих задач изучение и анализ сейсродинамических процессов, происходящих в протяженных подземных трубопроводах, которые также считаются одним из подземных сооружений, а также решение сложных задач такого типа численными методами и разработка их алгоритмов являются очень актуальными.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Указе Президента Республики Узбекистан от 30 мая 2022 года № УП-144 “О мерах по дальнейшему совершенствованию системы обеспечения сейсмической безопасности Республики Узбекистан” и Постановлении Президента Республики Узбекистан от 16 мая 2023 года № ПП-158 “О дополнительных мерах по

² Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № УП-60 “О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы”

дальнейшему совершенствованию системы обеспечения сейсмической безопасности населения и территории Республики Узбекистан”, Постановлении № УП-161 от 17 апреля 2024 года “О мерах по повышению сейсмостойкости зданий и сооружений, а также совершенствованию деятельности по мониторингу сейсмической опасности”, а также в других нормативно-правовых документах, имеющих отношение к данной деятельности.

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

Степень изученности проблемы.

Известно, что зарубежными учеными проводились и проводятся ряд научно-исследовательских работ, направленных на изучение сейсродинамических процессов, происходящих в строительных конструкциях и подземных трубопроводах под воздействием сейсмических волн, а также сейсмической изоляции зданий и сооружений, в том числе Psyrras N.K., Sextos A.G., O'Rourke M.J., Toprak S., Айнбиндер А.Б., Бородавкин П.П., Massarsch K.R., Bashirzade S.P., Newmark N.M., Furtner P., Takahashi T., Liu X.L., Муравева Л., Ильюшин А.А., Исраилов М.Ш., Александров А.А., Апсеметов М.Ч., Андашев А.Ж., Лапин В.А., Мкртычев О.В., Мингазова С.М., Эржанов С.Е, Кузнецов С.В., Кузнецов В.Д., Chen S., Айзенберг Ю.М., Арутюнян А.Р., Вискребенцева М.А., Le Q.V., Уздин А.М., Сандович Т.А., Amin Al Naser M.S., Bakre S.V., Sanjaya K.P., Никитин Л.В., Александрова Н.И., Ватин Н.И., Попов В.Л., Elmer F.J., Furinghetti M. Белаш Т.А, Тарасов В.А., Buckle I., Von Kluge P.N., Ляшенко Я.А., Chunliang Li., Банович И., Şcheaua F.D., Pelekis I., Madabhusli G.S.P., Chopra K.A. и многие другие проводили научные исследования в этом направлении.

В этой области наши известные ученые [Рашидов Т.Р.], [Абдурашидов Қ.С.], Хожметов Г.Х., [Мубараков Я.Н.], Мирсаидов М.М., Мардонов Б.М., Мирзаев И., [Маматкулов Ш.М.], Султанов К.С., Мавлонов Т.М., Абдусаттаров А., Хусанов Б.Э., Маткаримов А.Х., Бекмирзаев Д.А., Сагдиев Х.С., Сафаров И.И., Тешаев М.Х., Нишонов Н.А., Ювмитов А.С., Каюмов А., Ан Е.В., Колмакова Е.Н. Шомуродов Ж.Ф. и другие внесли значительный вклад в изучение динамических процессов в строительных конструкциях и подземных трубопроводах под действием сейсмических сил.

При анализе научных исследований, проведенных зарубежными и отечественными учеными, выявлено, что в динамических процессах в подземных и наземных сооружениях такие задачи не полностью решены из-за сложности процессов скольжения и совместного движения элементов конструкции по модели сухого трения.

Связь темы диссертации с научно-исследовательскими планами высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация.

Диссертационное исследование проводилось в рамках научно-исследовательского проекта №28/2022 «Создание комплекса программ расчета железнодорожных мостов с учетом нелинейного взаимодействия их элементов при реальных сейсмических воздействиях», согласно плана научно-исследовательских работ Ташкентского государственного транспортного университета на 2022-2023 гг.

Целью исследования является разработка алгоритма решения специфической нелинейной динамической задачи с использованием численных методов и логического алгоритма с учетом силы сухого трения в элементах строительных конструкций и подземных сооружений под воздействием сейсмических волн и анализ полученных результатов.

Задачи исследования:

разработка численного алгоритма решения, основанного на конечно-элементной схеме, динамического уравнения протяженного подземного трубопровода под действием сейсмических волн при взаимодействии трубопровода с грунтом по модели сухого трения;

разработка методологий и вычислительных алгоритмов, основанных на неявной схеме решения системы дифференциальных уравнений движения методом Ньюмарка, для изучения сейсמודинамических процессов в зданиях и сооружениях при наличии сил сухого трения;

определение динамического коэффициента сухого трения Амонта-Кулона для различных материалов путем разработки методологии лабораторного эксперимента и сравнение результатов эксперимента с аналитическим решением;

изучение динамических процессов, происходящих в зданиях и сооружениях, с помощью графиков и анимации на основе полученных решений и анализ этих результатов.

Объектом исследования является протяженный подземный трубопровод, высотные здания и сооружения, а также турбинный блок атомной электростанция (АЭС).

Предметом исследования является разработана алгоритма численного решения динамических уравнений протяженного подземного трубопровода под действием сейсмических волн, в котором взаимодействие трубопровода с грунтом описывается моделью сухого трения, и разработка численных алгоритмов решения нелинейной динамической задачи по защите от действия сейсмических волн зданий и сооружений на основе существующих записей землетрясений.

Методы исследования. В ходе исследовательской работы использовались методы механики деформируемого твердого тела, вычислительной математики и математического моделирования, а также методы конечных элементов и конечных разностей.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработан алгоритм решения специфических нелинейных задач для определения динамических процессов в конструкциях при наличии силы

сухого трения на основе методов конечных элементов, а также конечных разностей и логического алгоритма;

впервые решены динамические задачи для конструкции при наличии силы сухого трения с учетом режима “stick-slip” с использованием горизонтального и вертикального составляющих реальных записей землетрясений, выбранных из базы данных произошедших землетрясений, на основе применения логического алгоритма определения времени начала скольжения и движения без скольжения;

решением поставленной динамической задачи выявлены волны, подобные “волне Рахматулина”, в трубопроводе под действием сейсмической волны, когда взаимодействие длинного подземного трубопровода с грунтом представлено моделью сухого трения;

показано на основе разработанного алгоритма решения динамических задач и вычислительного эксперимента, что использование скользящего фундамента для защиты зданий и сооружений от сейсмических волн является эффективным способом сейсмической изоляции;

разработанная методика проведения лабораторного эксперимента, а также на основе сравнения результатов эксперимента с аналитическим решением был определен динамический коэффициент Амонтон-Кулоновского сухого трения для различных материалов.

Практические результаты исследования состоят в следующем:

разработанной в рамках данной исследовательской работы для решения задач для подземных и наземных сооружений при нелинейной модели сухого трения созданы алгоритмы и комплекс программ для анализа динамических процессов в конструкциях на основе реальных записей землетрясений;

в комплексе программ, созданном с целью изучения сейсродинамических процессов в подземных и наземных сооружениях, создана возможность представления результатов в виде графиков и анимации, а также их анализа;

установлено, что использование фторопластового материала для сейсмической изоляции зданий и сооружений, обеспечивающего достаточное скольжение между фундаментом и ростоверком, приводит к снижению воздействия сейсмических волн на верхние этажи конструкции.

Достоверность результатов исследования. Достоверность полученных результатов обосновывается корректной постановкой нелинейных задач, поставленных в диссертационной работе, доказательством устойчивости явной конечно-разностной схемы при их решении, использованием проверенных методов конечных элементов и неявных конечных разностей, оценкой достоверности решений задач сравнением с результатами лабораторных экспериментов, а также сопоставлением, по отдельным задачам, с решениями других исследователей и достаточным соответствием их результатов.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования объясняется созданием логического алгоритма определения направления силы трения и времени

начала скольжения в случае взаимодействия элементов конструкций моделью сухого трения, применением соответствующих численных методов решения задач на основе реальных записей землетрясений.

Практическая значимость результатов исследований объясняется созданием математической модели изучения динамических процессов, протекающих в конструкциях под действием сейсмических сил, алгоритма расчета и возможности использования в расчетах записей реальных землетрясений, алгоритмов решения задачи для модели сухого трения и программ, иллюстрирующих полученные результаты в графическом и анимационном видах, а также рекомендаций, полученных на основе проведенных лабораторных экспериментов.

Внедрение результатов исследования. На основании научных результатов диссертации по изучению динамически задач для конструкций при наличии элементов с сухим трением:

результаты, полученные на основе использования алгоритмов расчета, представленных в исследовательской работе, были использованы в процессе проектирования 7-этажного жилого дома, расположенного по адресу Улица Дустлик, 15, город Асака Андижанской области (Справка Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Республики Узбекистан от 15 апреля 2024 г., справочный номер 24-06/3804). В результате применения научных результатов в процессе проектирования объекта строительства стало возможным сэкономить до 1.18 раза время расчета, сделать предварительные необходимые выводы для проектирования и достигнуто эффективное использование современных компьютерных технологий. За счет применения этих результатов к проектным работам повышается качество работы и производительность труда. Результаты диссертационной работы имеют теоретическую и практическую значимость и могут быть использованы для предотвращения повреждений и разрушений зданий, сооружений и их фундаментов под воздействием землетрясения, а также для экономии времени и средств, затрачиваемых на проектные работы.

Апробация результатов исследования. Результаты исследования обсуждались и апробировались на международных и республиканских конференциях, в том числе на 14-х международных и 3-х республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. Всего по теме диссертации опубликовано 28 научных работ, из них 8 статей в научных изданиях, в которых рекомендовано опубликовать основные научные результаты диссертаций доктора философии (PhD) Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан, в том числе 5 в республиканских и 3 в зарубежных изданиях. Кроме этого, получено 3 свидетельства на расчётные программные продукты ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Объем диссертации составляет 115 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность, цель и задачи диссертационного исследования, описаны его объект и предмет. Описано соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики, научная новизна и практические результаты исследования, раскрыта научная и практическая значимость полученных результатов. При этом приводятся сведения о достоверности результатов исследования, внедрении их в практику, количестве опубликованных научных работ, составе и объеме диссертации.

В первой главе диссертации под названием « **Анализ литературы по динамическим процессам, происходящим в зданиях и сооружениях под воздействием сейсмических волн, а также теоретические и экспериментальные исследования в этом направлении** » представлен анализ научно-прикладных исследований отечественных и зарубежных ученых по изучению опасных ситуаций, наблюдаемых в зданиях и сооружениях, а также в подземных трубопроводах под воздействием сейсмических сил. Также представлена информация о выполненных теоретико-экспериментальных работах по динамическим процессам в конструкциях зданий и по сейсмоизоляции конструкций зданий.

Во второй главе диссертации под названием «**Сейсמודинамика протяженного подземного трубопровода при взаимодействии его с грунтом по модели сухого трения**» представлены дифференциальные уравнения динамического движения трубопровода с целью анализа сейсמודинамических процессов в протяженном подземном трубопроводе при его взаимодействии с грунтом по модели сухого трения. Также, поскольку динамические процессы в трубопроводах в модели сухого трения являются нелинейными задачами, алгоритм ее решения был разработан на основе численных методов и логического алгоритма. Доказаны устойчивость и сходимости численного решения конечно-разностной схемы, построенной для данного типа задач, а также достоверность созданного логического алгоритма. Приведены выводы на основе полученных результатов.

В зависимости от физико-механических свойств грунта и расположенной в нем трубопровода взаимодействие системы «труба-грунт» может принимать форму различных нелинейных моделей. Для одной из этих моделей, модели сухого трения (рис. 1), рассмотрим сейсמודинамические процессы в протяженном подземном трубопроводе.

Пусть по грунту распространяется со скоростью c_g плоская продольная волна $v_g(t-x/c_g)$, нормаль, к фронту которой, параллельна к оси трубопровода длины L . Начало координатной оси Ox расположим на левом торце трубопровода.

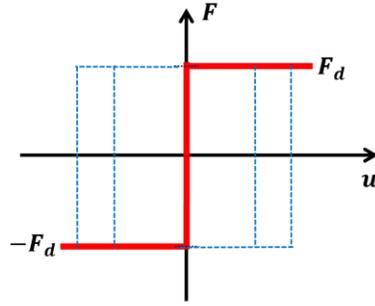


Рис. 1. Модел сухого трения взаимодействия грунта и подземного трубопровода

Уравнение движения протяженного подземного трубопровода, взаимодействующего с окружаемым его грунтом по модели сухого трения, представляется в форме

$$\frac{\partial v}{\partial t} = c^2 \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \frac{\pi D}{F \rho} \tau(x, t), \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial x}, \\ \tau(x, t) = \tau_0 \operatorname{sign}(v_g - v), \text{ при } v_g \neq v, \\ |\tau(x, t)| < \tau_0, \quad v = v_g. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $c = \sqrt{E/\rho}$ – скорость распространения волны в трубопроводе; E, ρ – модуль упругости и плотность материала трубопровода, D, F – диаметр и площадь поперечного сечения трубопровода, ε, v, u – деформация, скорость и перемещение частиц трубопровода, $\tau = \tau(x, t)$ – значение бокового касательного напряжения. касательное напряжение, возникающее на поверхности контакта трубопровода с грунтом, $u_g = u_g(x, t)$ – заданное перемещение в грунте, ε_g – деформация грунта.

Начальные условия представим в виде

$$\varepsilon = 0 \text{ и } v = 0. \quad (3)$$

Граничные условия на концах трубопровода могут быть получены в различных видах в соответствии с условиями задачи. Расчетные работы выполнены при свободных от напряжения (деформации) граничных условиях:

$$\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \text{ и } \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0.$$

При решении задачи воспользуемся явным видом конечно-разностной схемы. Разобьем трубопровод длиной L на отрезки размером Δx на m частей $L = m \cdot \Delta x, \Delta x = c \cdot \Delta t$. Систему уравнений (1) и (2) аппроксимируем в конечно-разностной схеме следующим образом

$$\begin{aligned} \frac{v_{i+1/2}^{j+1} - v_{i+1/2}^j}{\Delta t} &= c^2 \frac{\varepsilon_{i+1}^{j+1/2} - \varepsilon_i^{j+1/2}}{\Delta x} + \frac{\pi D}{F \rho} \frac{\tau_{i+1/2}^{j+1} + \tau_{i+1/2}^j}{2}; \\ \frac{\varepsilon_{i+1}^{j+1/2} - \varepsilon_i^{j-1/2}}{\Delta t} &= \frac{v_{i+1/2}^j - v_{i-1/2}^j}{\Delta x}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \tau_{i+1/2}^{j+1} = \tau_0 \text{sign}(v_{g,i+1/2}^{j+1} - v_{i+1/2}^{j+1}), \text{ при } v_{g,i+1/2}^{j+1} \neq v_{i+1/2}^{j+1}, \\ |\tau_{i+1/2}^{j+1}| < \tau_0, \text{ agar } v_{g,i+1/2}^{j+1} = v_{i+1/2}^{j+1}. \end{cases}$$

Так как в этой системе уравнений одновременно неизвестны $v_{i+1/2}^{j+1}$ и $\tau_{i+1/2}^{j+1}$, то при решении системы уравнений мы используем следующий логический алгоритм. При каждом новом шаге времени решаем задачу, поставленную в двух различных положениях для каждой точки трубы:

1. уравнение (4) решаем с условием $\tau_{i+1/2}^{j+1} = \tau_0$;
2. уравнение (4) решаем с условием $\tau_{i+1/2}^{j+1} = -\tau_0$;

I. Если значение $(v_{g,i+1/2}^{j+1} - v_{i+1/2}^{j+1})$ в обоих случаях имеет один и тот же знак для поставленной задачи, то сила инерции и сила внутреннего напряжения в этой точке преодолевают силу трения при скольжении. Поэтому происходит трение при скольжении, и действительное решение задачи соответствует минимальному абсолютному значению величины $(v_{g,i+1/2}^{j+1} - v_{i+1/2}^{j+1})$. Потому что сила трения направлена против движения. Тогда $v \neq v_g$, а касательное напряжение

$$\tau_{i+1/2}^{j+1} = \tau_0 \text{sign}(v_{g,i+1/2}^{j+1} - v_{i+1/2}^{j+1}). \quad (5)$$

II. Если знаки величины $(v_{g,i+1/2}^{j+1} - v_{i+1/2}^{j+1})$ для двух постановок задачи будут разными, тогда примем $v_{i+1/2}^{j+1} = v_{g,i+1/2}^{j+1}$, т.е. между трубопроводом и грунтом отсутствует скольжение, и они в этой точке в этот момент времени движутся с одинаковой скоростью. В этом случае значение $\tau_{i+1/2}^{j+1}$ вычисляется из первого уравнения системы (4).

$$\tau_{i+1/2}^{j+1} = 2 \left[(v_{g,i+1/2}^{j+1} - v_{i+1/2}^j) - c(\varepsilon_{i+1}^{j+1/2} - \varepsilon_i^{j+1/2}) \right] / (\Delta t q) - \tau_{i+1/2}^j \quad (6)$$

где $q = \pi D / F \rho$.

При решении уравнения (1) с использованием конечно-разностной схемы, конечно, важна его устойчивость. При аппроксимации системы уравнений методом конечных разностей ее устойчивость определяется формой разностной схемы частных производных членов системы уравнений. Для того чтобы конечно-разностная схема была устойчивой в этом случае, необходимо выполнение условия Куранта $\Delta t \cdot c / \Delta x \leq 1$. В данной работе получено предельное состояние условия Куранта, т.е. соотношение $\Delta t \cdot c = \Delta x$. Если выполнено условие $\Delta t \cdot c / \Delta x < 1$, то в полученных результатах появляются паразитные осцилляция. Это может привести к неверным выводам при анализе результатов.

Рассмотрим достоверность приведенного выше логического алгоритма решения системы динамических уравнений в модели сухого трения.

Теорема: Для того чтобы решение системы уравнений (1) и (2), аппроксимированной с помощью приведенных выше конечно-разностными схемами (4), (5) и (6), полученное на основе условий 1, 2 и логического алгоритма I, II, приблизилось к точному решению, достаточно, чтобы, кроме

условия Куранта, было выполнено условие $\Delta t \cdot |v_g - v|/u_m < \delta$ при произвольном малом числе $\delta > 0$. Здесь $u_m = 1$ м — константа единицы измерения.

Вычисления производились при следующих исходных данных $L = 1000$ м; $D = 0.61$ м; $F = 0.019$ м²; $c = 5000$ м/с; $k_x = 10^7$ Н/м³; $f = 0.3$; $\tau_0 = 5.3$ кПа; $\Delta t = 0.0001$ с; максимальная скорость частиц в грунте $v_{gm} = 0.3$ м/с (используется для нормализации значений параметров в графиках).

На рис. 2 приведены графики деформаций грунта и трубопровода при представлении сейсмической волны в виде прямоугольного импульса. При этом приведены расчетные результаты для случаев $c_g > c$ (рис. 2а) и $c_g < c$ (рис. 2б)

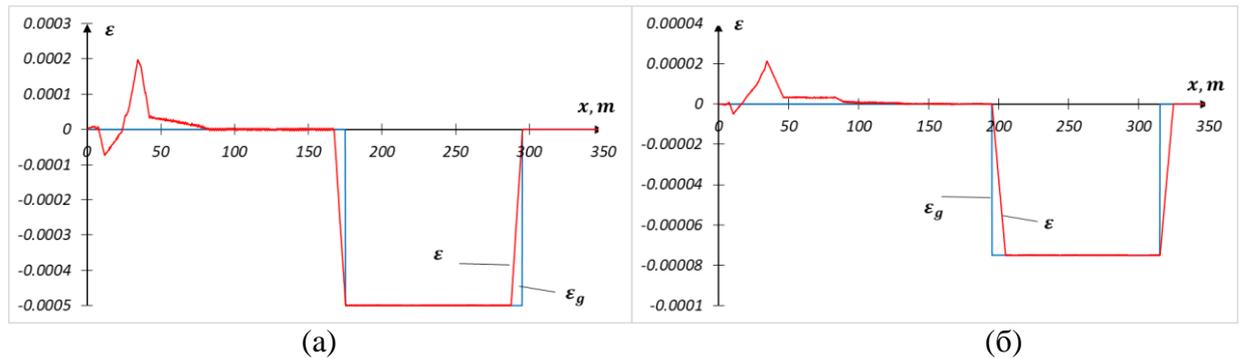


Рис. 2. Деформации грунта (ε_g) и трубопровода (ε).
(а) – $c_g = 6000$ м/с, (б) – $c_g = 4000$ м/с

При сравнении численного решения задачи (рис. 2а) с решением, рассчитанным методом характеристик, результаты достаточно хорошо совпадают.

На рис. 3 представлены графики деформаций грунта и трубопровода при воздействии волны скоростей в виде прямоугольного импульса при $c_g = 600$ м/с. Если скорость распространения волны в грунте достаточно мала, деформация в трубопроводе не достигает значения деформации в грунте, поэтому в этом случае вместо волны в форме прямоугольника формируется волна треугольной формы.

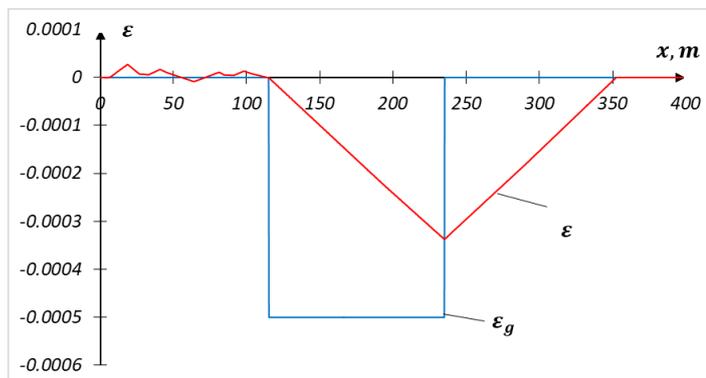


Рис. 3. Деформации грунта (ε_g) и трубопровода (ε) в момент времени $t = 0.4$ с

При воздействии волны скоростей в виде импульса одного периода косинуса $v_g = v_{gm} \cos(\omega(t - x/c_g)) \cdot H(t - x/c_g)$ и $c_g < c$ в начале процесса взаимодействия в трубопроводе (где функция H – Хевисайда), впереди фронта волны в грунте, идет предвестник волны сжатия, а также и за фронтом идет

волна сжатия. По мере распространения волны, за фронтом волны сжатия в грунте, на волну сжатия в трубопроводе надвигается волна растяжения. Это похоже на процесс надвигания волны разгрузки Х.А. Рахматулина. При прохождении определенного расстояния фронтом волны в грунте, за этим фронтом в трубопроводе возникает растягивающая волна треугольной формы и затем волна сжатия, также треугольной формы. На определенном расстоянии от левого торца трубопровода формируется волна зигзагообразной формы (см. рис. 4), максимальная амплитуда которых зависит от давления на боковую поверхность и коэффициента сухого трения. За задним фронтом волны в грунте, в трубопроводе возникает остаточная деформация. На рис. 4 представлены графики деформаций грунта и трубопровода.

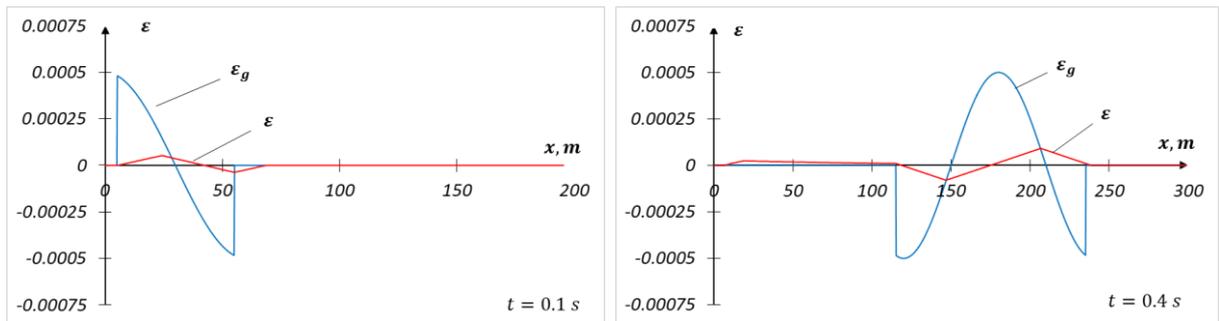


Рис. 4. Деформации грунта (ε_g) и трубопровода (ε) в различные моменты времени при $c_g=600$ м/с, $\omega=31.4$ с⁻¹

На рис. 5 представлены графики деформаций грунта и трубопровода при воздействии гармонической волны $v_g = a \cos(\omega(t - x/c_g)) \cdot H(t - x/c_g)$. Поведение волны в трубопроводе около фронта волны в грунте подобно случаю воздействия импульса одного периода косинуса. По мере удаления от фронта волны формируется зигзагообразная форма волны в трубопроводе.

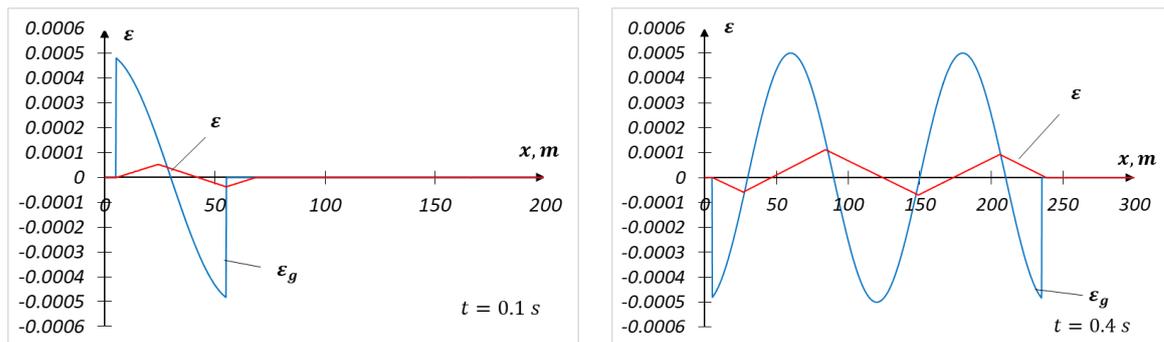


Рис. 5. Деформации грунта (ε_g) и трубопровода (ε) в различные моменты времени при $c_g=600$ м/с, $\omega=31.4$ с⁻¹

На рис. 6 представлены графики нормированных деформаций грунта $\varepsilon_{gn} = \varepsilon_g / \varepsilon_{gm}$ и трубопровода $\varepsilon_n = \varepsilon / \varepsilon_{gm}$, а также бокового касательного напряжения $\tau_n = \tau / \tau_0$ в момент времени $t=0.5$ с в случаях взаимодействия по модели сухого трения (рис. 6а) и по модели идеального упругопластического тела (рис. 6б). Где ε_{gm} – максимальное абсолютное значение деформации грунта. Видно, что в случае модели взаимодействия идеального упругопластического тела перед фронтом волны в грунте в трубопроводе идет «предвестник», а за фронтом

волны картина близка к картине с сухим трением. Также видно изменение направления силы сухого трения в процессе распространения волны. В случае модели сухого трения сила сухого трения резко меняет свое направление. В идеально упругопластическом случае изменение направления силы происходит через некоторый промежуток времени, сила взаимодействия должна преодолеть упругий участок.

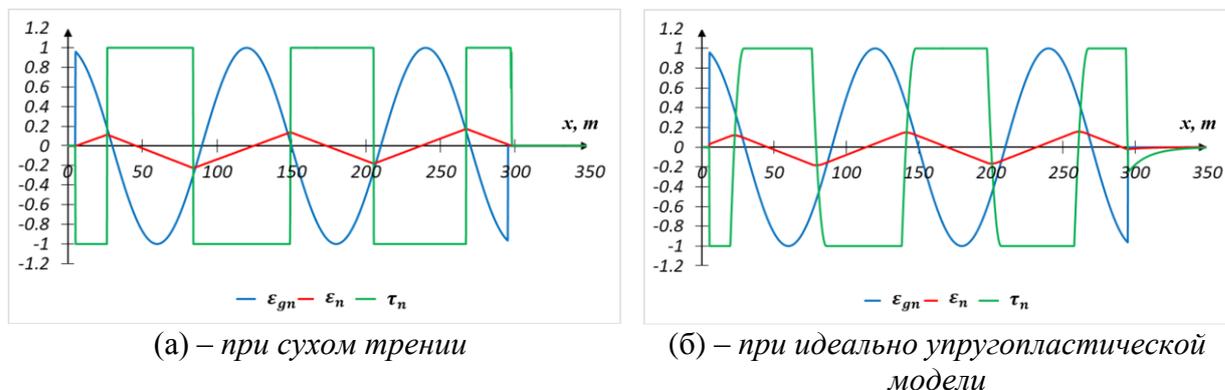


Рис. 6. Нормированные деформации грунта (ε_{gn}) и трубопровода (ε_n), а также бокового касательного напряжения (τ_n) при $c_g=600$ м/с, $\omega=31.4$ с⁻¹ ($\varepsilon_{gm}=0.0005$)

Если в идеальной упругопластической модели значение k_x велико, процесс быстрее достигнет состояния сухого трения. Также в этом случае ощутимый процесс сжатия в участке трубы перед фронтом волны в грунте присутствует на сравнительно небольшом участке.

В третьей главе диссертации под названием «**Решение динамических задач с моделью сухого трения в граничных условиях, проблема сейсмической изоляции зданий и сооружений**» приведен новый алгоритм решения сейсродинамических задач сейсмоизолированных зданий и сооружений с использованием модели сухого трения между фундаментом и ростверком для конструкций с распределенными и сосредоточенными параметрами.

Сначала сравнены результаты, полученные с использованием разных моделей. В них приняты обозначения Mod1 – сдвиговая модель с сосредоточенными массами на уровнях этажей, Mod2 – модель балки Тимошенко с распределенными и сосредоточенными параметрами, Mod3 – модель балки Бернулли-Эйлера с распределенными и сосредоточенными параметрами.

Для землетрясений интенсивностью 8 и 9 баллов сдвиговые силы, рассчитанные с использованием моделей балки Тимошенко и балки Бернулли-Эйлера с распределенной и сосредоточенной массами, отличаются от модели сдвига с сосредоточенными массами зданий до 20% и 60% соответственно.

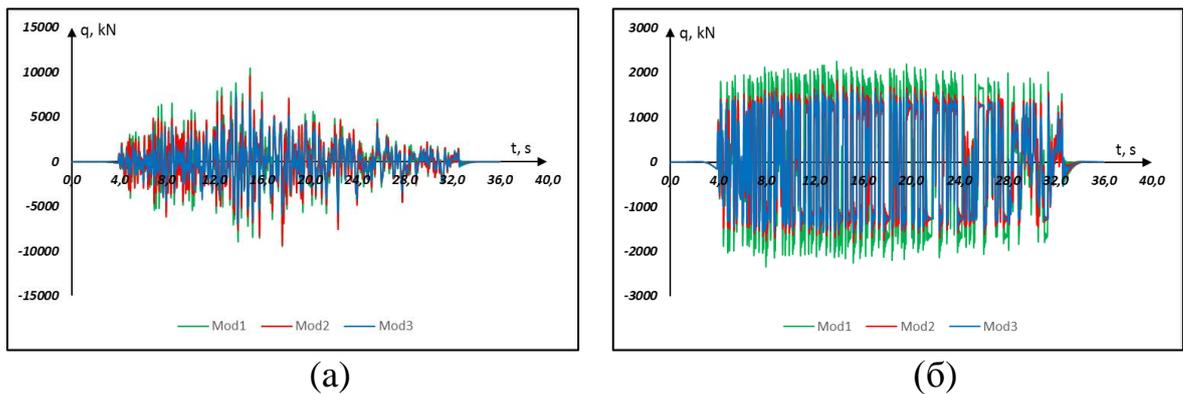


Рис. 7. Изменения перерезывающих усилий по времени в уровне первого этажа девятиэтажного здания при землетрясении Abhag (Иран) для случаев без учета (а) и с учетом (б) скользящего элемента.

При расчете зданий со скользящим фундаментом (рис. 7) рекомендуется использовать модель балки Тимошенко, так как эта модель учитывает колебания изгиба и сдвига зданий. В нашей задаче в рассматриваемых зданиях характеристики грунта не учитываются, и поскольку они работают в основном на сдвиг, мы сравниваем результаты, рассчитывая следующие задачи в модели сдвига с сосредоточенными массами.

Расчетная схема многоэтажного здания с учетом сейсмоизоляции с сухим трением по нормативному документу принимает следующий вид (рис. 8).

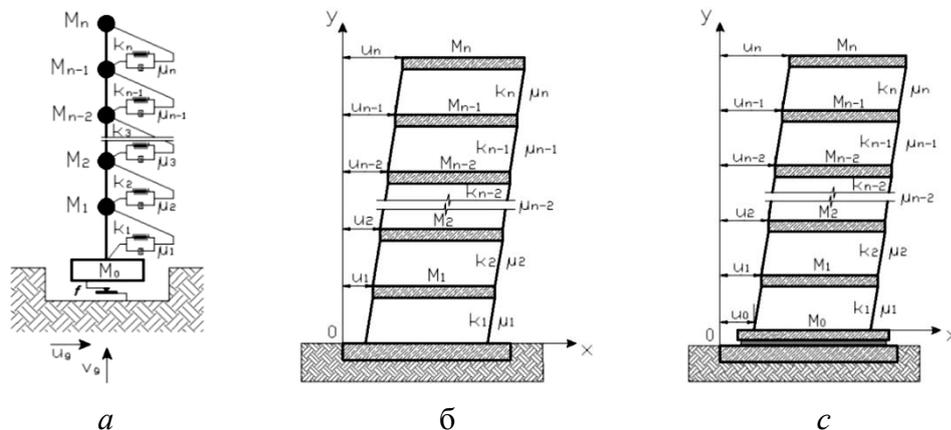


Рис. 8. Консольная расчетная схема в виде упругого стержня с сосредоточенными массами (а), расчетная схема многоэтажного здания в плоскости с жестким защемлением основания (б) и с сейсмоизоляцией (с)

Здание представим одномерной сдвиговой моделью с сосредоточенными массами и безынерционными упругими связями. Для данной конструкции применяем конечные элементы смещения, в результате чего приходим к следующей системе простых дифференциальных уравнений

$$[M] \cdot \{\ddot{U}\} + [C] \cdot \{\dot{U}\} + [K] \cdot \{U\} = \{Q(t)\}, \quad (7)$$

$$\{U\} = \{U_{st}\}, \quad \{\dot{U}\} = 0 \text{ при } t = 0$$

где $[M]$ – диагональная матрица масс, массы расположены в уровнях этажей, $[K]$ – матрица жесткостей, $[C]=\alpha\cdot[M]+\beta\cdot[K]$ – матрица демпфирования строится отдельно для каждого элемента по методу Рэлея в следующем виде

$$[C^e]=\alpha_i\cdot[M^e]+\beta_i\cdot[K^e]$$

α_i, β_i – коэффициенты затухания колебаний определяются либо через процент потерь, либо через логарифмический декремент и собственные частоты. $\{U\} = \{u_0, u_1, \dots, u_n, v_1, \dots, v_n\}^T$ – вектор перемещений, u_i, v_i – горизонтальные и вертикальные перемещения масс, $\{U_{st}\}$ – вектор перемещений в начальный момент времени, элементы, соответствующие сдвиговому перемещению равны нулю, а вертикальному перемещению определяются из решения статической задачи. Условие взаимодействия массы $[M_0]$ со скользящим нижним фундаментом имеет вид

$$u_0 = u_g - u_r, \text{ если } |F_0| < |F_{fr}|, \text{ т.е. при совместном движении,} \quad (8)$$

$$F_0 = F_{fr}, \text{ при скольжении,} \quad (9)$$

где u_0, v_0 – перемещения ростверка, u_g, v_g – горизонтальное и вертикальное перемещения нижней части фундамента, т.е. аппроксимированные функции оцифрованной сейсмограммы землетрясения, u_r – величина сдвига в момент времени в начале текущего совместного движения без скольжения нижней части фундамента и движения ростверка, т.е. разность между значениями перемещений нижней части фундамента и ростверка (в начальный момент времени $u_r=0$), F_0 – неизвестное значение силы сцепления между верхним и нижним фундаментами, $F_{fr} = \text{sign}(\dot{u}_g - \dot{u}_0) \cdot f \cdot P$ – значение силы сухого трения, f – коэффициент сухого трения, P – сила давления на скользящий элемент фундамента в динамическом процессе, если не учитывать вертикальные колебания, тогда это вес здания.

Следует отметить, что вертикальные колебания не зависят от горизонтальных колебаний зданий, а горизонтальные колебания зависят от вертикальных колебаний зданий через условие (9), так как во время вертикальных колебаний давление на скользящий фундамент изменяется.

При совместном движении перемещение u_0 определяется по равенству (8) и уравнение движения массы M_1 имеет вид

$$M_1 \ddot{u}_1 + k_1 u_1 + c_1 \dot{u}_1 - k_2 (u_2 - u_1) - c_2 (\dot{u}_2 - \dot{u}_1) = k_1 u_0 + c_1 \dot{u}_0 \quad (10)$$

В этом случае $Q_1 = k_1 u_0 + c_1 \dot{u}_0$, остальные элементы вектора $\{Q\}$, соответствующие горизонтальным перемещениям сосредоточенных масс, равны нулю. Уравнение вертикального движения массы M_1 имеет вид, подобный (10).

Скольжение с сухим трением наступает только тогда, когда выполняется условие (9). Рассматриваемая задача (7), (8), (9) является нелинейной задачей, при этом отсутствуют условия вычисления неизвестной функции F_0 , а также во время динамического процесса изменяются размерности матриц $[M]$ и $[K]$. При скольжении имеет место уравнение для массы $[M_0]$

$$M_0 \cdot \ddot{u}_0 - k_1(u_1 - u_0) - c_1(\dot{u}_1 - \dot{u}_0) = F_{fr}, \text{ при этом } Q_0 = F_{fr}$$

Для решения задачи в целом воспользуемся следующим алгоритмом. На каждом шаге по времени решаем задачи в трех постановках:

1. Уравнение (7) решаем с условием (8);
2. Уравнение (7) решаем с условием (9), при $F_0 = f \cdot P$;
3. Уравнение (7) решаем с условием (9), при $F_0 = -f \cdot P$

При этом матрицы $[M]$ и $[K]$ в первой постановке имеют размер $2n \times 2n$ (здесь n количество этажей здания), а во второй и третьей постановках $(2n+1) \times 2n$. Выбор действительного решения из этих трех решений осуществляется на основе логического алгоритма, представленного в главе II.

В процессе расчета измерения матриц $[M]$, $[K]$, $[C]$ изменяются. Все три задачи решаются методом Ньюмарка оцифрованная сейсмограмма землетрясения аппроксимируется линейной функцией в интервале шага записи, когда шаг аппроксимации по времени меньше шага записи землетрясения. Когда приблизительный временной дек меньше шага регистрации землетрясения, оцифрованная сейсмограмма землетрясения аппроксимируется линейной функцией между шагами регистрации. В методе Ньюмарка используются значения скорости и ускорения, включая их значения в данной сейсмической волне. Прямой ввод оцифрованных сейсмограмм приводит к большим ошибкам в расчетах скорости и ускорения. Следовательно, сейсмическая волна задается как ускорение, а затем скорости и смещения рассчитываются в соответствии с формулами Ньюмарка. Сплайн Эрмита используется для обеспечения того, чтобы вычисления выполнялись с меньшими временными шагами по сравнению с шагом нумерации.

Четырехэтажное здание серии 76-017СА/53 имеет следующие характеристики: кирпичное здание размером в плане 389.88 м^2 ; сосредоточенные массы в уровнях верхней части фундамента и этажей $M_0=698000 \text{ кг}$, $M_1=495000 \text{ кг}$, $M_2=495000 \text{ кг}$, $M_3=495000 \text{ кг}$, $M_4=497575 \text{ кг}$, при этом общий вес здания, давящий на нижнюю часть фундамента, равен $P=26269635 \text{ Н}$; сдвиговые жесткости по этажам одинаковы $k_i=16.08 \cdot 10^8 \text{ Н/м}$; вязкость материала здания по этажам одинаковы $\mu_i=26.9 \cdot 10^5 \text{ Нс/м}$. Значения частот собственных колебаний с жесткой заделкой фундамента: $\omega_1=34 \text{ Гц}$, $\omega_2=62 \text{ Гц}$, $\omega_3=87 \text{ Гц}$, $\omega_4=106 \text{ Гц}$.

Девятиэтажное здание серии 76-017СП/53 имеет следующие характеристики: крупнопанельное здание размером в плане 291.6 м^2 ; сосредоточенные массы в уровнях верхней части фундамента и этажей $M_0=449000 \text{ кг}$, $M_1=379500 \text{ кг}$, $M_2=379500 \text{ кг}$, $M_3=379500 \text{ кг}$, $M_4=379500 \text{ кг}$, $M_5=379500 \text{ кг}$, $M_6=379500 \text{ кг}$, $M_7=379500 \text{ кг}$, $M_8=379500 \text{ кг}$, $M_9=341000 \text{ кг}$, при этом общий вес здания, давящий на нижнюю часть фундамента, равен $P=37494800 \text{ Н}$; сдвиговые жесткости по этажам одинаковы $k_i=32.357 \cdot 10^9 \text{ Н/м}$; вязкость материала здания по этажам одинаковы $\mu_i=10.58 \cdot 10^6 \text{ Нс/м}$. Значения частот собственных колебаний с жесткой заделкой фундамента: $\omega_1=79 \text{ Гц}$, $\omega_2=160 \text{ Гц}$, $\omega_3=239 \text{ Гц}$, $\omega_4=314 \text{ Гц}$, $\omega_5=380 \text{ Гц}$.

При численном решении задач с сухим трением, не зависимо от выбора явной или неявной конечно-разностной схемы, шаг по времени необходимо подбирать для обеспечения достаточной точности. В наших примерах расчетов шаг по времени был равен 0.0001 с. Мы решаем проблему уменьшения сейсмических волн в зданиях и сооружениях, используя характеристики 4 и 9 этажных зданий, перечисленных выше, и существующие записи сильных землетрясений в европейской базе данных.

Ниже сравниваются результаты четырех и девятиэтажных зданий с учетом воздействия горизонтальных и одновременных горизонтальных и вертикальных компонентов в реальных записях землетрясений.

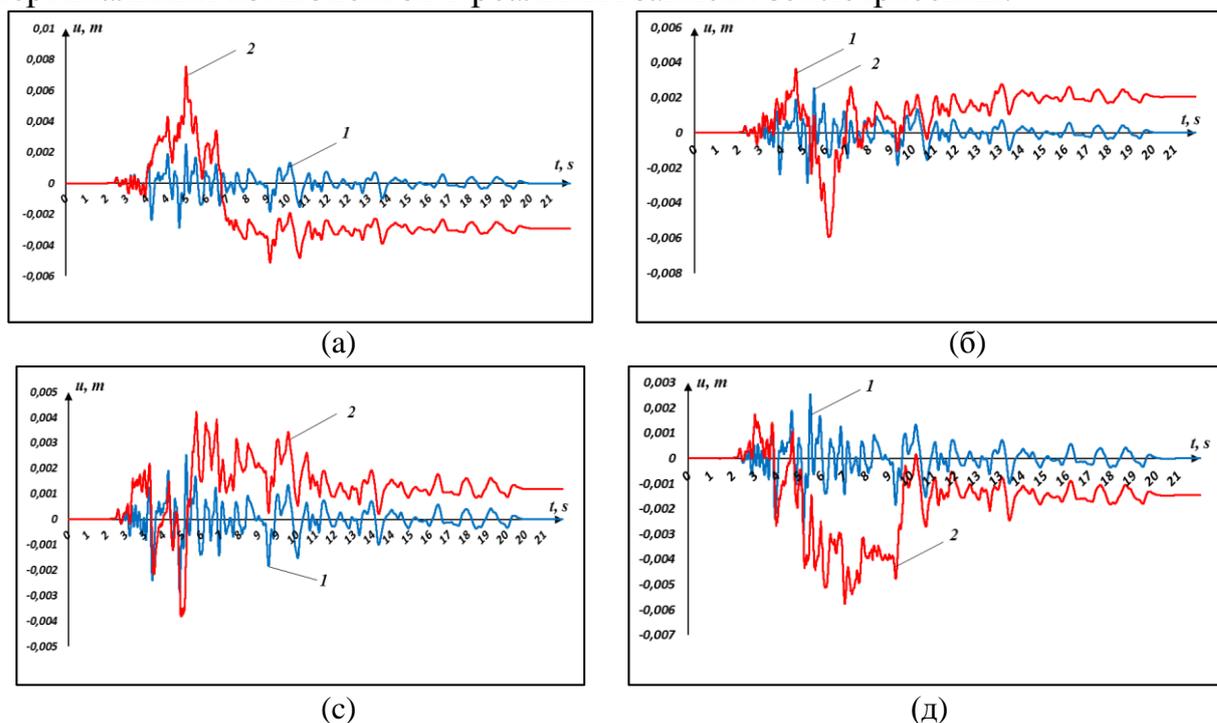


Рис. 9. Горизонтальное смещение нижних (1) и верхних (2) фундаментов четырехэтажных (а, б) и девятиэтажных (в, д) зданий под воздействием при реальных записях землетрясений Саїгано (Италия) записей по горизонтали (а, в) и одновременно горизонтального и вертикального (б, д).

Возникновение первого скольжения связано с изменением направления движения нижнего фундамента. Далее происходит смена перехода от скольжения с сухим трением к совместному движению и обратно много раз, в зависимости от рассмотренных выше условий. К концу процесса остаточный сдвиг равно на четырех этажах 0.0028 м (Рис. 9а), на девятом этаже 0.0011 м (Рис. 9в) при горизонтальном воздействии и на четырех этажах 0.0019 м (Рис. 9б), на девятом этаже 0.0014 м (Рис. 9д), при учете вертикального движения.

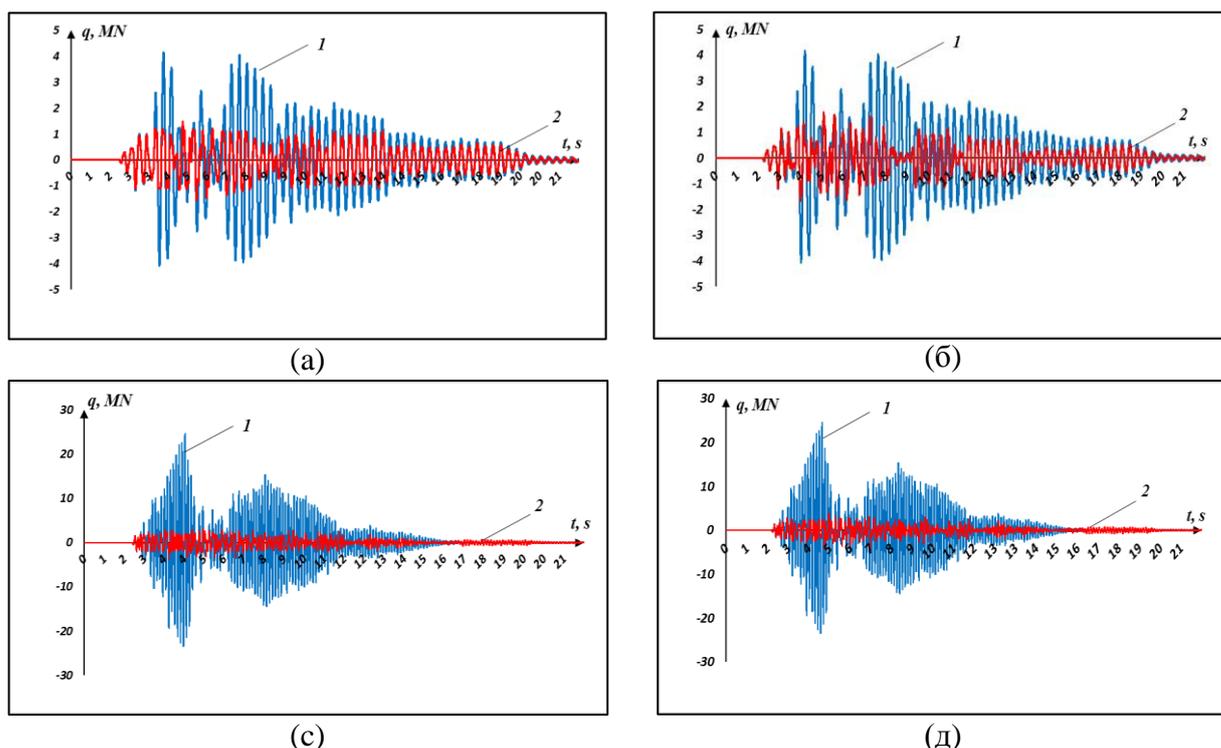
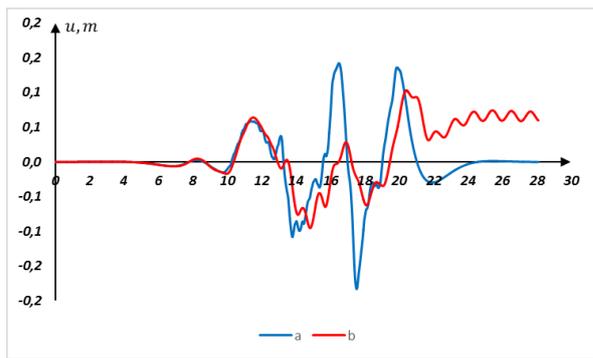


Рис. 10. Изменение силы сдвига на первом этаже четырехэтажных (а, б) и девятиэтажных (с, д) зданий, записей по горизонтали (а, с) и одновременно горизонтального и вертикального (б, д), без учета скольжения (1) и с учетом скольжения (2) с учетом воздействия при реальных записях землетрясений Сагано (Италия)

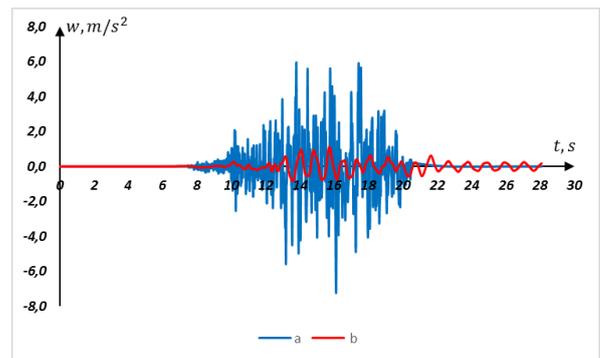
Из этих графиков видно, что использование скользящего фундамента с фторопластом с коэффициентом сухого трения $f=0.05$ приводит к снижению максимального значения сдвигового усилия в 2.7 (Рис. 10а) и 6.4 (Рис. 10с) раза по отношению к случаю отсутствия скользящего фундамента, при этом учет вертикального движения снижает в 2.3 (Рис. 10б) и 5.4 (Рис. 10д) раза, соответственно для четырехэтажного и девятиэтажного зданий. На колебания зданий при землетрясениях также сильное влияние оказывает вертикальная компонента сейсмического воздействия.

Рассматривается вопрос сейсмоизоляции турбинной установки атомной электростанции (АЭС) с использованием элементов сухого трения. Масса турбоагрегата $2.5 \cdot 10^6$ кг, масса фундамента турбоагрегата $5.0 \cdot 10^6$ кг. Жесткость эквивалентной пружины на сдвиг между турбоагрегатом и фундаментом $1.0 \cdot 10^8$ Н/м, а ее вертикальная жесткость $2.0 \cdot 10^9$ Н/м. Горизонтальная и вертикальная жесткости фундамента соответственно равны $1.0 \cdot 10^{10}$ Н/м и $2.0 \cdot 10^{10}$ Н/м. Коэффициенты затухания равны $\alpha=0.94$ с⁻¹, $\beta=0.00116$ с. В расчетах коэффициент сухого трения между основанием и фундаментом принимали в двух вариантах 0.025 и 0.05.



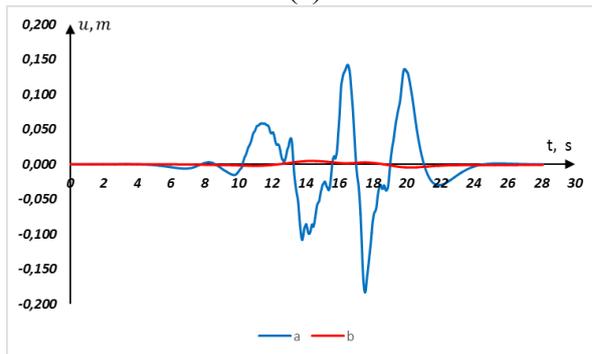
a: $u_{\max} = 0.183$ м; b: $u_{\max} = 0.103$ м

(с)



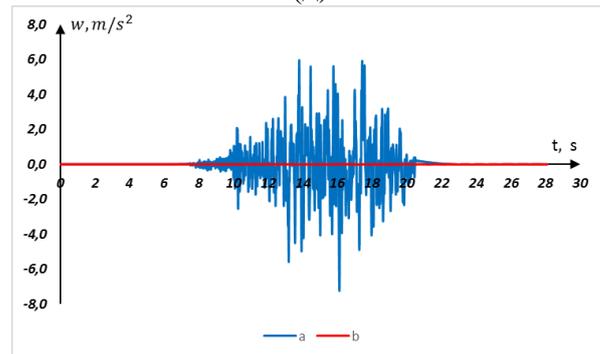
a: $w_{\max} = 7.23$ м/с²; b: $w_{\max} = 1.12$ м/с²

(д)



a: $u_{\max} = 0.183$ м; b: $u_{\max} = 0.00499$ м

(е)



a: $w_{\max} = 7.23$ м/с²; b: $w_{\max} = 0.0112$ м/с²

(ф)

Рис. 11. Графики смещений (с, е) и ускорений (д, ф) основания (а) и турбоагрегата (б).

На рис. 11с показаны смещения основания и турбоагрегата, а на рисунке 11д показаны графики их ускорения. При коэффициенте сухого трения $f=0.025$ максимальное ускорение турбоагрегата уменьшилось в 6.5 раза по сравнению с максимальным ускорением основания. Мы провели расчеты с использованием данных исследования Тарасова и показали, что расчет в его методе, то есть использование пружин вместо сухого трения, приводит к ошибкам (рис. 11е и 11ф). Расчет по линейной теории, когда процесс трения заменяется слабой пружиной, что не соответствует динамическому процессу взаимодействия конструкции с основанием по принципу сухого трения, дает неверный результат.

В четвертой главе диссертации под названием «**Задача определения динамического коэффициента сухого трения Амонтона-Кулона и ее решение**» разработан новая методика проведения лабораторных экспериментов, и динамический коэффициент сухого трения Амонтона-Кулона был определен для различных материалов на основе сравнения результатов эксперимента с аналитическим решением. Лабораторный эксперимент предназначен для горизонтального свободного колебания системы.

На встряхивающем столе был жестко установлен ящик из стальных листов размером $0.45 \times 0.46 \times 0.17$ м. Стальной ящик был заполнен песком на высоту 0.1 м. Стальной лист размером $0.45 \times 0.46 \times 0.005$ м был установлен над песком с помощью гидравлического уровня. Общая масса платформы

составила 131.6 кг. Стальная плита размером $0.355 \times 0.363 \times 0.0224$ м расположена над стальным листом. Масса верхней стальной плиты составляет 22.4 кг. В экспериментальном исследовании масса верхней стальной плиты изменялась за счет обработки контактных поверхностей сталь-сталь, а также различных вариантов со смазкой контактных поверхностей, еще один - со вставкой пары фторопластовых прокладок 4.

Частоты колебаний и уникальность четырех вертикальных пластин были рассчитаны для различных значений колебаний виброплиты с использованием известных соотношений. Затем основные показатели динамического процесса, а именно динамический коэффициент сухого трения (Рис. 12), значения абсолютной максимальной скорости и ускорения, были рассчитаны с использованием специально разработанной программы, основанной на решениях сочленения и скольжения на основе сформулированных уравнений. Чтобы определить значение динамического коэффициента сухого трения, теоретические результаты сравнивали с экспериментальными результатами, и значение этого коэффициента постепенно уменьшалось до тех пор, пока оно не соответствовало смещениям с приемлемой точностью (Рис. 13).

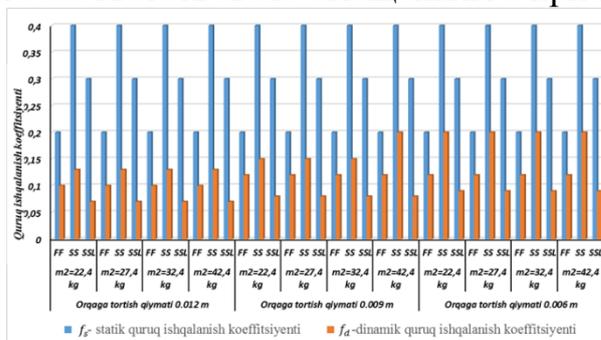


Рис. 12. Гистограмма значений статического и динамического коэффициентов сухого трения для различных материалов.

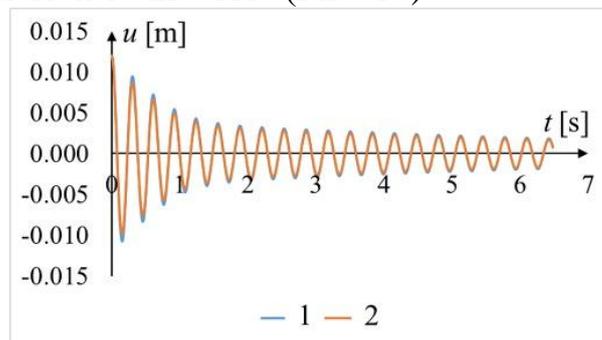


Рис. 13. Графики зависимости перемещений от времени колебаний нижней плиты (1 - эксперимент, 2 - аналитический расчет)

Хорошее согласие этих результатов объясняется тем, что параметры имитационной модели μ и k_1 определялись путем измерения логарифмического декремента демпфирования и точного измерения периода колебаний системы без проскальзывания. Переход от совместного движения масс к их движению со скольжением происходит, когда абсолютное значение ускорения системы превышает $g \cdot f_d$. При равенстве скоростей происходит переход от скольжения к совместному движению масс без скольжения.

Многие исследователи используют функцию SIGNUM для решения проблем сухого трения. Сравнивая результаты, полученные с использованием функции SIGNUM, с результатами, полученными с использованием сгенерированного логического алгоритма, мы показали ниже, что использование функции SIGNUM приводит к ошибкам.

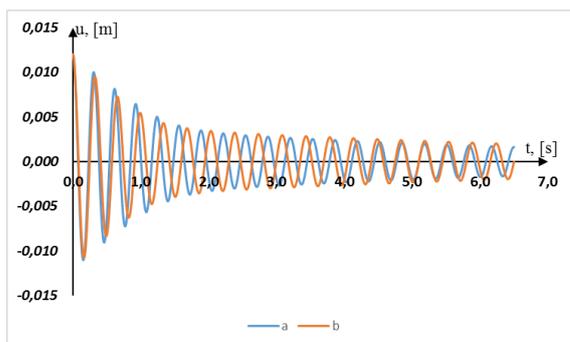


Рис. 14. Сравнение решения задачи использованием функции SIGNUM (a) с решением по алгоритму авторов (b)

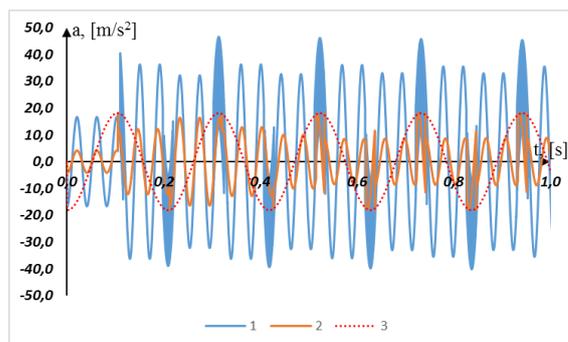


Рис. 15. Сравнение графиков ускорений: 1 – использованием функции SIGNUM; 2 – использование логического алгоритма; 3 – ускорение индентера

На рис. 14 показано сравнение решений, полученных в результате введения экспериментальных значений в созданный логический алгоритм (б) с использованием функции SIGNUM. На рис. 15 приведено сравнение графиков ускорения тела, рассчитанных с помощью двух алгоритмов. Из результатов численных решений различных задач видно, что прямое использование функции SIGNUM не всегда приводит к правильному решению. Неправильные значения рассчитанных ускорений приводят к неправильным значениям силы инерции, а в некоторых случаях к неправильным результатам решения задач.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов диссертационной работы по теме «Динамические задачи для конструкций при наличии элементов с сухим трением» были получены следующие выводы:

1. разработан алгоритм решения специфических нелинейных задач для определения динамических процессов в конструкциях при наличии силы сухого трения на основе численных методов и логического алгоритма;

2. впервые решены динамические задачи для конструкции при наличии силы сухого трения с учетом режима “stick-slip” с использованием горизонтального и вертикального составляющих реальных записей землетрясений применением логического алгоритма определения времени начала скольжения и движения без скольжения;

3. решением поставленной динамической задачи выявлены волны, подобные “волне Рахматулина”, в трубопроводе под действием сейсмической волны, когда взаимодействие длинного подземного трубопровода с грунтом представлено моделью сухого трения;

4. в случае, когда скорость распространения волны в грунте больше скорости распространения волны в трубе, после достижения процессом стационарного состояния, деформации в грунте и трубе одинаковы, а вблизи волнового фронта наблюдается различие деформаций за счет нестационарности.

5. Установлено, что использование фторопласта - материала, обеспечивающего особое скольжение между фундаментом и ростверком, при сейсмоизоляции зданий и сооружений, в несколько раз снижает воздействие сейсмических волн на верхние этажи.

6. По результатам лабораторного эксперимента определения динамического коэффициента сухого трения установленный динамический коэффициент трения в три раза меньше статического коэффициента трения железо-железо в случае смазки и до двух раз в случае фторопласта-фторопласт4.

7. Сравнивая решения нелинейной задачи, представленные в исследовательской работе, с результатами лабораторных экспериментов и решениями других исследователей, была продемонстрирована достоверность логического алгоритма в решении динамической задачи.

**ONE-TIME SCIENTIFIC COUNCIL PhD.15/03.06.2023.FM/T.73.08
AWARDING SCIENTIFIC DEGREE AT THE TASHKENT STATE
TRANSPORT UNIVERSITY**

TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY

TURDIEV MALIKJON SAYFIDDIN O'G'LI

**DYNAMIC PROBLEMS FOR STRUCTURES WITH DRY FRICTION
ELEMENTS**

01.02.04 – Mechanics of deformable rigid body

**DISSERTATION ABSTRACT OF DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD) ON PHYSICAL
AND MATHEMATICAL SCIENCES**

Tashkent – 2025

The theme of the dissertation of Doctor of Philosophy (PhD) was registered at the Supreme Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under number B2023.4.PhD/FM928

The dissertation has been prepared at the Tashkent state transport university.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of the Scientific Council (<https://tstu.uz/page/122>) and the website of "ZiyoNet" Information and educational portal (www.ziynet.uz).

Scientific supervisor:

Mirzayev Ibrakhim

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor

Official opponents:

Mardonov Batir

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor

Safarov Ismoil Ibrokhimovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor

Leading organization:

**National University of Uzbekistan named after
Mirzo Ulugbek**

The defence will take place "17" yanvar, 2025 at 2⁰⁰ p.m. at the one-time meeting of the Scientific Council under the PhD.15/03.06.2023.FM/T.73.08 scientific council at the Tashkent State Transport University (Address: 1, Temiryo'Ichilar str., Tashkent 100167, Uzbekistan, room No.259. Phone: (+99871) 299-00-01, fax: (99871) 239-57-54, e-mail: rektorat@tstu.uz).

The dissertation is available for review in Information-Resource Centre of the Tashkent State Transport University (Registered number №. ____). (Address: 1, Temiryo'Ichilar str., Tashkent 100167, Uzbekistan. Phone: (+99871) 299-05-66).

Abstract of the dissertation was distributed on "____" _____ 2025 year.
(mailing report No. __ on "____" _____ 2025 year).

Kh.M. Shadimetov

Chairman of the One-time Scientific
Council for awarding degrees, Doctor of Physical
and Mathematical Sciences, Professor

F.A. Nuraliyev

Scientific secretary of the One-time Scientific
Council for awarding degrees, Doctor of Physical
and Mathematical Sciences, Professor

D.B. Eshmamatova

Chairman of Scientific Seminar at the One-time
Scientific Council for awarding degrees,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Docent

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The purpose of the study is to develop an algorithm for solving a unique nonlinear dynamic problem by numerical methods and a logical algorithm that takes into account the dry friction force in the elements of building structures and underground structures under the influence of seismic waves, and analyze the results obtained.

The object of the study is an extended underground pipeline, high-rise buildings and structures, as well as a turbine unit of a nuclear power plant (NPP).

The subject of the study is the development of an algorithm for the numerical solution of dynamic equations of an extended underground pipeline under the action of seismic waves, in which the interaction of the pipeline with the ground is described by a dry friction model, and the development of numerical algorithms for solving a nonlinear dynamic problem of protecting buildings and structures from seismic waves based on existing earthquake records.

Research methods. During the research work, methods of deformable solid mechanics, computational mathematics and mathematical modeling, as well as finite element and finite difference methods were used.

The scientific novelty of the study is as follows:

an algorithm has been developed for solving specific nonlinear problems for determining dynamic processes in structures in the presence of dry friction based on finite element methods, as well as finite differences and a logical algorithm;

for the first time, dynamic problems for a structure with a dry friction force were solved taking into account the "stick-slip" mode using the horizontal and vertical components of real earthquake records selected from the earthquake database, based on the application of a logical algorithm for determining the time of sliding and moving without sliding;

the solution of the dynamic problem identified waves similar to the "Rakhmatulin wave" in the pipeline under the action of a seismic wave, when the interaction of a long underground pipeline with the ground is represented by a dry friction model;

it is shown on the basis of the developed algorithm for solving dynamic problems and computational experiment that the use of a sliding foundation to protect buildings and structures from seismic waves is an effective way of seismic isolation;

a new technique for conducting a laboratory experiment has been developed, and based on comparing the results of the experiment with an analytical solution, the dynamic coefficient of Amonton-Coulomb dry friction for various materials has been determined.

Implementation of the research results. Based on the scientific results of the thesis on the study of dynamic problems for structures in the presence of elements with dry friction:

The results obtained based on the use of calculation algorithms presented in the research paper were used in the design process of a 7-storey residential building

located at 15 Dustlik Street, Asaka city, Andijan region (Certificate of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Republic of Uzbekistan dated April 15, 2024, reference number 24-06/3804). As a result of the application of scientific results in the process of designing a construction object, it became possible to save up to 1.18 times the calculation time, make preliminary necessary conclusions for the design and achieve effective use of modern computer technologies. By applying these results to design work, the quality of work and labor productivity are improved. The results of the dissertation work have theoretical and practical significance and can be used to prevent damage and destruction of buildings, structures, and their foundations under the influence of earthquakes, as well as to save time and resources spent on design work.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and an appendix. The volume of the dissertation is 115 pages.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I bo'lim (I часть; I part)

1. Mirzaev I. Turdiyev M. S. Vibrations of Buildings with Sliding Foundations under Real Seismic Effects // Construction of Unique Buildings and Structures. Volume 94 Article No 9407. 2021. pp. 1-15 (01.00.00; № 27)

2. Мирзаев И., Ювмитов А. С., Турдиев М.С. Влияние вертикальных колебаний на сдвиговые колебания зданий на скользящем фундаменте при землетрясении // Проблемы механики. 2022. № 4. – С. 49-55. (01.00.00; № 4)

3. Ibrakhim Mirzaev and Malikjon Turdiyev. Seismic Isolation of NPP Turbine Unit Using Dry Friction Devices // Proceedings of MPCPE 2022, Lecture Notes in Civil Engineering, 335. 2023. pp. 53-67. (Scopus, № 11, IF=0.162, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-30570-2_6)

4. Мирзаев И., Шомуродов Ж.Ф., Турдиев М.С. Сейсמודинамика протяженного подземного трубопровода по модели сухого трения // “ҚарДУ хабарлари”. Илмий-назарий, услубий журнал. 2023. № 1. – С. 34-40. (01.00.00; № 295/6)

5. Мирзаев И., Турдиев М.С. Колебания зданий с подвижным фундаментом при реальных сейсмических воздействиях разного спектра частот // Transportda resurs tejankor texnologiyalar. 2023. – С. 502-506. (03.12.2022 у.; 01-06/274016-sonli xati)

6. Мирзаев И., Ювмитов А. С., Турдиев М.С. Колебания зданий с комбинированной сейсмоизоляцией на уровне фундамента при реальных сейсмических воздействиях // Проблемы механики. 2023. № 4. – С. 122-127. (01.00.00; № 4)

7. Турдиев М.С. Сейсмоизоляция турбоагрегата аэс с использованием устройств сухого трения // “ҚарДУ хабарлари”. Илмий-назарий, услубий журнал. 2024. № 1. – С. 15-21. (01.00.00; № 295/6)

8. Mirzaev I., Sagdiev Kh., Yuvmitov A., Turdiyev M., Egamberdiev B. Experimental determination of dynamic coefficient of Amonton-Coulomb dry friction // Facta Universitatis Series Mechanical Engineering, Vol. 22, №3, Special Issue, 2024, pp. 503-512. (SCOPUS CiteScore: 10.4 (Q1 ranking), IF=7.9, doi: <https://doi.org/10.22190/FUME231225016M>)

II bo'lim (II часть; II part)

9. Турдиев М.С. Колебания зданий со скользящим фундаментом при реальных сейсмических воздействиях с разными максимальными значениями горизонтальных перемещений // Республика кўп тармоқли илмий саммит материаллари тўплами. 2021. – С. 733-736.

10. Ibrakhim Mirzaev, Anvar Yuvmitov, Malikjon Turdiyev and Jakhongir Shomurodov. Influence of the Vertical Earthquake Component on the Shear

Vibration of Buildings on Sliding Foundations // E3S Web of Conferences 264, 02022. 2021. pp. 1-11.

11. Mirzaev I., Turdiev M.S. Vibrations of buildings with a sliding foundation having lateral yielding contact under real seismic impacts // AIP Conference Proceedings 2432, 030050. 2022. pp. 1-6.

12. Турдиев М.С., Аскарлова Д.С. Влияние размера горизонтального зазора между фундаментом и скользящим ростверком на колебание здания при землетрясении // “Yosh ilmiy tadqiqotchi” xalqaro ilmiy-amaliy anjumani. 2022. – С. 183-189.

13. Mirzaev I., Turdiyev M.S. The effect of the size of the horizontal gap between the foundation and the sliding grillage on the oscillation of the building during an earthquake // "Modern Materials Science: Topical Issues, Achievements and Innovations" (ISCMSTIAI-2022), pp. 369-376.

14. Mirzaev I.; Turdiyev M.S. AES turboagregatini quruq ishqalanish yordamida seysmik izolyatsiya qilish // “Mexanika va matematikaning amaliy muammolari” Respublika ilmiy-amaliy konferensiya. 2022. 126-131 b.

15. Турдиев М.С., Джумаев Х. Колебания системы с двумя степенями свободы при взаимодействии масс по закону сухого трения // Курилишда инновациялар, биналар ва иншоотларнинг сейсмик хавфсизлиги Халқаро миқёсидаги илмий ва илмий-техник конференция материаллари тўплами. 2022. – С. 563-566.

16. Mirzaev I., Turdiev M.S. The effect of the size of the horizontal gap between the foundation and the sliding grillage on the oscillation of the building during an earthquake // AIP Conference Proceedings 2612, 040033. 2023. pp. 1-11.

17. Мирзаев И., Турдиев М.С. Влияние ограничителя движения скользящего ростверком на колебания здания при землетрясении // “Qurilishda innovatsion texnologiyalar” Xalqaro ilmiy-texnik anjuman, 2023. – С. 68-72.

18. Мирзаев И., Шомуродов Ж.Ф., Турдиев М.С. Сейсמודинамика протяженного подземного трубопровода по модели сухого трения // Международной научной конференции “Актуальные проблемы обеспечения сейсмической безопасности населения и территорий”, посвященной 80-летию Академии наук Республики Узбекистан, 2023. – С. 309-315.

19. Мирзаев И., Ювмитов А. С., Турдиев М.С. Сейсмоизоляция зданий с использованием скользящего фундамента // Международной научной конференции “Актуальные проблемы обеспечения сейсмической безопасности населения и территорий”, посвященной 80-летию Академии наук Республики Узбекистан, 2023. – С. 303-308.

20. Mirzaev I., Askarova D.S., Shomurodov J.F., Turdiev M.S. Shear oscillations of bridge on sliding foundation during earthquake // E3S Web of Conferences 401, 01074. 2023. pp. 1-11.

21. Мирзаев И., Шомуродов Ж.Ф., Турдиев М.С. Нестационарные волны в сейсמודинамике протяженного подземного трубопровода с взаимодействием по модели сухого трения // Международная научно-практическая конференция «Рахматулинские чтения» 2023. – С. 27-29.

22. Mirzaev I., Turdiyev M.S. Zilzila vaqtida bino konstrusiyalarida paydo boʻladigan seysmik kuchlarni quruq ishqalanish yordamida kamaytirishning hisobiy algoritmi // «Математик моделлаштириш ва ахборот технологияларининг долзарб масалалари» халқаро илмий-амалий анжумани. Нукус 2-3 май. 2023. 101-103 б.

23. Мирзаев И., Турдиев М.С. Сравнение Моделей Колебания Зданий С Подвижным Фундаментом При Реальных Сейсмических Воздействиях // Механика ва matematikaning amaliy muammolari Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi. 2024. С. 113-117.

24. Mirzaev I., Shomurodov J., Turdiev M. Seismodynamics of an extended underground pipeline using the dry friction model // AIP Conf. Proc. 3119, 020006. 2024. Pp. 020006-1–020006-7. Doi: <https://doi.org/10.1063/5.0214822>

25. Mirzayev I., Turdiyev M.S., Shomurodov J.F. The Effect of Inertial Force on the Process of Stick-Slip of Two Bodies with Dry Friction // Advanced Mechanics: Structure, Materials, Tribology Samarkand, Uzbekistan, September 23-26, 2024, pp 22-22.

26. Мирзаев И., Ювмитов А. С., Турдиев М.С. Сейсмик таъсирлар остида сирпанадиган (курук ишқаланиш модели) пойдевордаги биноларнинг тебранишларини ҳисоблаш // О‘zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi huzuridagi intellektual mulk agentligi. № DGU 12715. 24.09.2021 у.

27. Мирзаев И., Ювмитов А. С., Турдиев М.С. Икки массанинг қуруқ ишқаланишдаги динамик ўзаро таъсирини ҳисоблаш учун дастур // О‘zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi. № DGU 19576. 12.10.2022 у.

28. Mirzaev I., Askarova D.S., Turdiyev M.S. Zilzila ta’sirida poydevor ustida sirpanuvchan ko’priknig siljish tebranishlarini sonli modellashtirish dastur // О‘zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi. № DGU 25540. 12.05.2023 у.

Avtoreferat “TDTU xabarnomasi” Ilmiy-amaliy jurnali tahririyatida tahrirdan o‘tkazildi va o‘zbek, rus, ingliz tillari matnlarni o‘zaro mosligi tekshirildi.
(_____2024 y)

Qog‘oz bichimi 84x60 ¹/₁₆ Rizograf bosma usuli “Times New Roman” garniturasida.
Shartli bosma tabog‘i: 2,8 b.t. Adadi 100 nusxa. Buyurtma _____
Nashirga ruxsat etildi_____.2024 y.

Toshkent davlat transport universiteti bosmaxonasida chop etildi.
Bosmaxona manzili: 100167, Toshkent sh., Temiryo‘lchilar ko‘chasi, 1-uy.