САБИРОВА ЮЛИЯ ФАРХАТОВНА

«8D06104 – Математикалық және компьютерлік модельдеу» білім беру бағдарламасы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алу үшін «Сызықты емес деформацияланатын жүйелердің динамикасын және дірілден қорғауын модельдеу» тақырыбындағы диссертациясына

АҢДАТПА

Жұмыстың жалпы сипаттамасы. Бұл жұмыс деформацияланатын жүйелердің сызықтық емес динамикасын модельдеуге, сондай-ақ оларды талдау әдістерін дамытуға және мұнай-газ өндіру саласындағы бұрғылау жабдықтарына қатысты мәселелерді шешуге бағытталған. Материал параметрлерінің сызықтық еместігінің және құрылымның қабаттылығының дірілден қорғау құралдарының жұмыс істеуіне әсері зерттелді.

Зерттеу тақырыбының өзектілігі. Қазіргі заманғы зерттеулер деформацияланатын жүйелердегі сызықтық емес мәселелерді шешуге бағытталған. Мұндай жүйелердің сызықтық еместігі деформация шамаларына қойылатын шектеулердің алынып тасталуымен, конструкция материалының физикалық сызықтық еместігімен, динамикалық жүйелердің сызықтық емес инерциялық қасиеттерімен және басқа да факторлармен байланысты. Бұл жаңа математикалық модельдер мен оларды талдау әдістерін, есептеу алгоритмдерін және бағдарламалық қамтамасыз етуді әзірлеу мен жетілдіру қажеттілігін туындатады. Мұның барлығы қолданбалы мәселелерді жаңа сапалық деңгейде шешуге мүмкіндік береді.

Бұл зерттеулер мұнай-газ өндіру саласында қолданылатын бұрғылау жабдықтарының дірілден қорғау жүйелерін дамыту контекстінде ерекше өзекті болып табылады. Мұндай жүйелер қажетсіз тербелістердің және элементтердің мерзімінен бұрын тозуының алдын алуға бағытталған. Демпферлер сияқты конструктивтік элементтердің физикалық сызықтық емес қасиеттерінің бұрғылау бағаналарының сызықтық емес динамикасына әсер етуі ерекше қызығушылық тудырады. Қазіргі заманғы материалтанудың дамуы жоғары тиімді демпферлер ретінде күрделі көпқабатты композиттік құрылымдарды пайдалануға көшуге ықпал етеді. Осындай көпфункционалды жоғары контрастты композиттердің азаматтық, өнеркәсіптік, аэроғарыштық және автомобиль жасау салаларында кеңінен қолданылуы біртекті және/немесе әлсіз біртекті емес құрылымдар үшін әзірленген қолданыстағы іргелі теорияны нақтылауды талап етеді. Себебі жоғары контрастты ламинаттарда байқалатын практикалық тұрғыдан маңызды шеттік әсерлер қосымша зерттеуді қажет етеді.

Жұмыстың мақсаты: деформацияланатын жүйелердің сызықтық емес динамикасын математикалық модельдеу әдістерін дамыту, оның ішінде бұрғылау бағаналарының өзекті элементтері мен жұқа қабырғалы қабатты демпферлік муфталарды зерттеу арқылы дірілден қорғау құралдарының тиімділігін арттыру.

Қойылған мақсатқа сәйкес келесі **зерттеу міндеттері** анықталды:

– дірілден қорғау құралдарын ескере отырып, өзекті жүйелер динамикасының жалпыланған сызықтық емес модельдерін әзірлеу;

– әзірленген модельдерді сандық түрде іске асыруға арналған, біртекті емес құрылымдардың динамикалық сипаттамаларын жоғары дәлдікпен талдауды қамтамасыз ететін бағдарламалық-есептеу кешенін құру;

– әзірленген бағдарламалық-есептеу кешенін әдебиетте белгілі нәтижелермен салыстыру арқылы верификациялау;

– сыртқы факторлардың әсерін ескере отырып, бұрғылау бағаналарының сызықтық емес динамикасына көппараметрлік талдау жүргізу; әртүрлі пайдалану режимдерінде дірілден қорғау құрылғыларының жұмыс істеу заңдылықтарын анықтау;

– жоғары контрастты қабатты пластиналар мен Винклер типті иілгіш сызықтық емес негіздегі пластиналар үшін антиплостық ығысуға қатысты шеттік есептерді асимптотикалық талдау.

Диссертациялық жұмыстың зерттеу нысаны сызықтық емес деформацияланатын жүйелер, атап айтқандай, бұрғылау жабдықтарының өзекті элементтері мен жартылай шексіз серпімді пластиналар болып табылады.

Зерттеу пәні бұрғылау жабдықтарын дірілден қорғау әдістерін әзірлеу барысында туындайтын деформацияланатын денелер механикасы есептерін математикалық модельдеуді қамтиды.

Зерттеу әдістері. Жұмыста механиканың іргелі қағидаларына (қозғалыс теңдеулерін шығару үшін Остроградский–Гамильтон вариациялық принципі және В. В. Новожиловтың деформациялануның сызықтық емес теориясының қатынастары), орталар мен материалдарды математикалық модельдеудің заманауи әдістеріне (физикалық сызықтық емес элементтерді сипаттау үшін Трелоар серпімділік потенциалын, жұқа серпімді пластиналар мен өзектер теориясын қолдану), аналитикалық әдістерге (асимптотикалық талдау әдістері, эллиптикалық теңдеулерді шешу және өшу шарттарын анықтау үшін Фурье әдісі), сандық және дискреттік әдістерге (жиынтық параметрлер әдісі, Рунге–Кутта әдісі), сондай-ақ компьютерлік модельдеу әдістеріне (C++, Python, OpenMP) негізделген к ешенді тәсіл қолданылды.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы өзекті жүйелер динамикасының нақтыланған сызықтық емес модельдерін құрудан тұрады. Бұл модельдерде геометриялық және физикалық сызықтық емес тұтас деформацияланатын денелер ретінде модельденетін өзектің орын ауыстырулары мен демпферлік элементтердің өзіндік кинематикасының байланысы алғаш рет өзара қарастырылды. Күрделі жүктемелер жағдайында (бұралу, осьтік сығылу, орталар ағыны) бұрғылау бағаналарының кеңістіктік қозғалыстарын талдауға бейімделген, параллель есептеулерді қолданатын C++ тіліндегі түпнұсқалық алгоритмдік және бағдарламалық кешен әзірленді. Асимптотикалық әдіс негізінде жоғары контрастты қабатты пластиналардағы және Винклердің сызықтық емес серпімді негізіндегі пластиналардағы антиплостық ығысу есептері үшін нақтыланған шеттік шарттар (Сен-Венан принципі) алғаш рет алынды.

Қорғауға ұсынылатын ғылыми қағидалар:

– өзекті жүйелердің сызықтық емес математикалық модельдер кешені әзірленді, онда жүйенің өзгермелі құрылымы және континуалды демпферлік элементтермен өзара байланысы ескерілген. Дірілден қорғау құрылғыларының өзіндік кинематикасын ескеру дәстүрлі дискреттік модельдер шеңберінде сипатталмайтын динамикалық әсерлерді анықтауға мүмкіндік беретіні негізделді;

– параллель бағдарламалау технологияларын қолдана отырып, жиынтық параметрлер әдісіне негізделген алгоритмдік іске асыру және бағдарламалық кешен әзірленді. Ұсынылған архитектура күрделі жүктемелерге (айналу, орталар ағыны, сызықтық емес байланыстар) ұшырайтын жүйелер үшін үлкен өлшемді есептерді жоғары есептеу тұрақтылығымен тиімді шешуді қамтамасыз етеді;

– бұрғылау бағаналары динамикасына жүргізілген көппараметрлік талдау нәтижелері алынды. Тұрақтандырғыштардың геометриялық параметрлері, сызықтық емес муфталардың сипаттамалары және жүйенің динамикалық сипаттамалары арасындағы тәуелділіктер анықталды. Дыбыстан жоғары ағынмен орағыту және осьтік сығылу жағдайларында кеңістіктік тербелістерді басу үшін резеңке-кордты элементтерді қолданудың тиімділігі дәлелденді;

– антиплостық ығысу жағдайында Сен-Венан принципі үш қабатты жоғары контрастты пластиналарға және Винклер типті иілгіш сызықтық емес негізге сүйенетін біртекті пластиналарға қолдану үшін жалпыланды.

Диссертациялық жұмыстың ғылыми ережелерінің, қорытындылары мен нәтижелерінің дұрыстығы және негізділігі континуумдық механиканың белгілі іргелі заңдарын қолданумен қамтамасыз етіледі. Математикалық модельдер практикада кеңінен қолданылатын әдістемеге сәйкес әзірленді. Әзірленген бағдарламалық кешен тестілік есептер мен әдебиетте белгілі нәтижелермен салыстыру арқылы верификацияланды.

Параметрлік талдау нәтижелері мен энергия графиктері физикалық тұрғыдан негізделген нәтижелерді көрсетеді.

Зерттеудің теориялық және практикалық маңызы. Сызықтық емес деформацияланатын жүйелердің жаңа математикалық модельдерін құру және қолданыстағы модельдерді жалпылау тербелістердің табиғаты туралы қазіргі түсініктерді кеңейтіп, қатты денелердің деформациялануы саласындағы теориялық білімді толықтырады. Зерттеудің бірыңғай әдістемесін әзірлеу инженерлік есептеулерді нақтылауға және деформацияланатын орталар механикасында шешілетін есептер класын кеңейтуге мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижелері машиналар мен механизмдердің динамикасын зерттеуде кеңінен қолданылуы мүмкін.

Осы жұмыстың басқа ғылыми-зерттеу жұмыстарымен байланысы. Диссертациялық жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің гранттық қаржыландыру бағдарламасы аясындағы үш ғылыми жоба (1-3-т.), сондай-ақ Ұлыбританияның Keele University және German Aerospace Center (DLR) ұйымдарының бірлескен ғылыми жобасы (4-т.) шеңберінде орындалды.

1) «Машиналар динамикасындағы күрделі сызықты емес қасиеттері және өзгермелі құрылымы бар механикалық деформацияланатын жүйелердің талдау әдістері мен математикалық моделдерін дамыту» **(2020-2022 гг., AP08857255-ОТ-22);**

2) « Кен өндіруші өнеркәсіптегі ұңғымаларды бұрғылау есептерін шешуге арналған сызықты емес модельдерді және бағдарламалық модульдерді әзірлеу» **(2021-2023 гг., AP09261135-ОТ-23).**

3) «Тау-кен өнеркәсібіндегі мәселелерді шешу үшін күрделі жағдайларда сызықты емес деформацияланатын жүйелер мен гетерогенді наноқұрылымдардың динамикасын модельдеу» **(2024-2026 гг., AP23490543)**

4) Asymptotic analysis of boundary value problems for strongly inhomogeneous multi-layered elastic plates **(2024-2026, EP/Y021983/1)**

Жұмыстың апробациясы. Жұмыстың нәтижелері келесі ғылыми іс-шараларда баяндамалар түрінде апробациядан өтті:

– 58-ші «МНСК-2020» Халықаралық студенттік ғылыми конференциясы (Новосібір, Ресей, 2020 ж.);

– XLVIII «Advanced Problems in Mechanics» Халықаралық жазғы мектеп-конференциясы (Санкт-Петербург, Ресей, 2020 ж.);

– «Dynamical Systems – Theory and Applications» 16-шы Халықаралық конференциясы (Лодзь, Польша, 2021 ж.);

– «Youth Digital Forum YDF-2022» III Халықаралық студенттік ғылыми-практикалық конференциясы (Алматы, 2022 ж.);

– техника ғылымдарының докторы, профессор Р.Г. Бияшевтің құрметіне арналған «Informatics and Applied Mathematics» VIII Халықаралық ғылыми-практикалық конференциясы (Алматы, 2023 ж.);

– әл-Фараби атындағы ҚазҰУ-дың 90 жылдығына және академик Ш. С. Смағұловтың 75 жылдығына арналған «Computational and Information Technologies in Science, Engineering and Education» халықаралық конференциясы (Алматы, 2024 ж.);

– Сызықтық емес динамика бойынша V Халықаралық NODYCON 2026 конференциясында (Рим, Италия, 2026 ж.);

– әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті механика-математика факультетінің ғылыми семинарлары (Алматы, 2020–2026 жж.);

– әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің Математикалық және компьютерлік модельдеу кафедрасы ғылыми семинарлары (Алматы, 2020–2026 жж.).

Жарияланымдар. Диссертация тақырыбы бойынша барлығы 11 ғылыми еңбек жарияланды, оның ішінде: Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik журналында 1 мақала (SJR=0.806, CiteScore percentile=81, Q1) [1], Applied Mathematical Modelling (AMM) журналында 1 мақала (SJR = 1.126, CiteScore percentile = 97, Q1) [3], Symmetry журналында

1 мақала (SJR = 0.467, CiteScore percentile = 93, Q2) [4]. Аталған жарияланымдар Scopus және Web of Science дерекқорларында индекстеледі. Сонымен қатар, Scopus және Web of Science дерекқорларында индекстелетін әрі Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым және жоғары білім саласындағы сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынған басылымдар тізбесіне енгізілген басылымда 1 мақала жарияланды [5]. Бұдан бөлек, халықаралық ғылыми конференциялар материалдарында 7 жарияланым жарық көрді [2, 6–11], оның ішінде 4 жарияланым шетелдік конференциялар материалдарында жарияланған [2, 8– 11].

1. Kaplunov J., Prikazchikova L., **Sabirova Yu.,** Erbaş B. A refined decay condition for a high-contrast sandwich plate subject to antiplane shear // Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik. – 2026. – Vol. 77. – No 10. – Art. 281.
2. **Sabirova Yu.**, Khajiyeva L., Sabirova R. Impact of a Continuous Damping Sleeve on Nonlinear Drill String Dynamics in Fluid Flow // NODYCON 2026: Fifth International Nonlinear Dynamics Conference: Book of Abstracts. – Rome, Italy : Sapienza University of Rome, 2026. – P. 156.
3. Khajiyeva L., **Sabirova Yu.,** Kudaibergenov Askar, Kudaibergenov Askat. Application of the lumped-parameter method for modeling nonlinear vibrations of drill strings with stabilizers in a supersonic gas flow // Applied Mathematical Modelling. – 2022. – Vol. 110. – P. 748–766.
4. Khajiyeva L., Andrianov I., **Sabirova Yu.,** Kudaibergenov A. Analysis of Drill String Nonlinear Dynamics Using the Lumped-Parameter Method // Symmetry. – 2022. – Vol.14. – No 7. – Art. 1495.
5. Khajiyeva L., **Sabirova Yu.,** Sabirova R. Modelling of horizontal drill string motion by the lumped-parameter method // Вестник КазНУ. Серия математика, механика, информатика. – 2022. – Т. 115. – № 3. – С. 132-142.
6. **Sabirova Yu.,** Prikazchikova L. Decay conditions for antiplane shear of a high-contrast sandwich plate // Proc. Int. Conf. “Computational and Information Technologies in Science, Engineering and Education”. – Almaty, 2024. – P. 215.
7. **Sabirova Yu.,** Sabirova R. Development of a numerical model of a drill string in a fluid flow by the lumped-parameter method // Proc. VIII Int. Sci.-Pract. Conf. “Informatics and Applied Mathematics”. – Almaty, 2024. – P. 101-106.
8. **Sabirova Yu.** Mathematical modeling and computer visualization of drill string dynamics using OpenGL // Proc. III Int. Student Sci.-Pract. Conf. “Youth Digital Forum YDF-2022 (YDF-2022)”. – Almaty, 2022. – P. 263-264 (in Russian).
9. Khajiyeva L., Kudaibergenov A., **Sabirova Yu.** Application of the lumped parameter method for modelling nonlinear vibrations of drill strings with complicating factors // Abstracts 16th Int. Conf. “Dynamical Systems – Theory and Applications (DSTA 2021)”. – Lodz, Poland, 2021. – P. 751-752 (online).
10. Khajiyeva L., Kudaibergenov A., **Sabirova Yu.** Modeling of dynamics of a drill string with variable structure by the lumped parameters method // Abstracts XLVIII Int. Summer School-Conf. “Advanced Problems in Mechanics”. – St. Petersburg, Russia, 2020. – P. 57-58 (online).
11. **Sabirova Yu.** Numerical modeling of dynamic systems with variable structure by the lumped-parameter method // Proc. 58th Int. Sci. Conf. – Novosibirsk, Russia, 2020. – P. 99 (in Russian).

Автордың жеке үлесі. Диссертациялық жұмыстың барлық нәтижелерін ізденуші ғылыми кеңесшілердің жетекшілігімен өз бетінше алды. Автордың жеке үлесі жаңа бағдарламалық кешенді әзірлеу және верификациялау, III тарауда ұсынылған жалпыланған модельдерді әзірлеу, IV тарауда қарастырылған есептерге асимптотикалық талдау жүргізу, динамикалық және көппараметрлік талдау жүргізу, сондай-ақ диссертацияның барлық тарауларындағы есептер бойынша графиктерді құру және талдаудан тұрады.

Диссертацияның құрылымы мен көлемі. Диссертациялық жұмыс титулдық беттен, мазмұннан, нормативтік сілтемелерден, белгілеулер мен қысқартулардан, кіріспеден, төрт тараулардан, қорытындыдан, 128 әдебиет көзінен тұратын пайдаланылған әдебиеттер тізімінен және 3 қосымшадан тұрады. Жұмыстың көлемі 183 бет, онда 90 иллюстрация және 18 кесте берілген.

Диссертацияның негізгі мазмұны. Кіріспеде жұмыстың жалпы сипаттамасы, зерттеудің мақсаты мен міндеттері, қолданылған зерттеу әдістері, теориялық және практикалық маңызы, жарияланымдар, зерттеу жүргізілген жобалар, сондай-ақ жұмыстың нәтижелері апробацияланған іс-шаралар тізімі баяндалған.

Бірінші тарауда деформацияланатын жүйелердің сызықтық емес динамикасы саласындағы зерттеулердің қазіргі жағдайына аналитикалық шолу жасалған. Дірілден қорғау элементтерінің әсерін ескеретін бұрғылау бағаналарының математикалық модельдерін жетілдіру қажеттілігі негізделген. Сондай-ақ қабаттарының параметрлері айтарлықтай ерекшеленетін құрылымдардағы толқындық процестердің жеткіліксіз зерттелуіне байланысты жоғары контрастты композиттердегі төмен жиілікті тербелістерді зерттеудің өзектілігі көрсетілген. Зерттеу есептерінің қойылымы берілген.

Екінші тарау бұрғылау бағаналарының жазық және кеңістіктік сызықтық емес орын ауыстыруларын жиынтық параметрлері бар жүйелер ретінде модельдеуді жүзеге асыратын C++ тіліндегі есептеу кешенін құруға арналған. Бағдарламалық кешеннің верификациясы белгілі модельдер негізінде жүргізілген.

Үшінші тарау дірілден қорғау элементтерін (тірек тұрақтандырғыштар мен демпферлік муфталарды) ескере отырып, күрделі динамикалық жүктеме жағдайындағы бұрғылау бағаналарының сызықтық емес динамикасын зерттеуге арналған. Күрделі жүктеме осьтік сығылуды, бұралуды, меншікті салмақты және айналмалы өзекке газ ағынының әсерін қамтиды. Зерттеудің ерекшелігі – геометриялық және физикалық сызықтық емес тұтас дене ретінде модельденетін муфтаның өзіндік кинематикасын ескеру.

Төртінші тарау дірілден қорғау элементтерінің негізгі конструкциялармен жанасу аймақтарындағы жергілікті динамикалық процестерді зерттеуге арналған. Нақтыланған шеттік теория негізінде асимптотикалық талдау әдістерімен жоғары контрастты қабатты пластиналардың антиплостық ығысуы туралы есеп шешіледі. Демпферлік элементтердің сызықтық емес серпімді ортамен (резеңке-кордты қабаттар, ұңғыма негізі) өзара әрекеттесуін ескеру үшін есеп Винклердің сызықтық емес негізіндегі жартылай шексіз пластина жағдайына жалпыланған.

Қорытындыда жұмыстың негізгі нәтижелері, қойылған міндеттердің толық орындалу дәрежесі және алынған нәтижелерді практикалық қолдану бойынша ұсынымдар баяндалған.