

ИБРАЕВ ГУЛАМА-ГАРИП АЛИШЕР ЕРИКЖАНОВИЧ

ВЕРТИКАЛЬ РОТОРЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕР ДИНАМИКАСЫ

6D060300 – «Механика» мамандығы бойынша
философия докторы (PhD) дәрежесін алу үшін дайындалған
диссертация

АННОТАЦИЯСЫ

Жұмыс тақырыбының өзектілігі. Қазіргі таңда роторлық жүйелердің бейсызық динамикасын зерттеуге бағытталған көптеген жұмыстар бар. Бұндай жүйелердің кең таралғандығына қарамастан жартылай толтырылған сұйықтың, сыртқы консервативті күштердің, сызықтық және бұрыштық теңгерілмегендік факторларының әсерін бірегей ұйытқу ретінде қарастыру қиындықтарына байланысты олардың динамикасы аз зерттелген.

Роторлық машиналардың конструкциясында жүйенің жұмысқа жарамдылығы мен беріктігін анықтайтын сызықсыз модельдермен сипатталатын маңызды бөлшектердің ішіндегі ең маңыздысы серпімді негіздер болып табылады, ұсынылған жұмыста серпімді негіздер ретінде домалау мойынтіректері алынды. Мойынтіректердің сызықсыз қасиеттерін ескермеу роторлық жүйелерді сапалық және сандық талдау нәтижелерін нашарлатады. Бұл жағдайлар домалау мойынтіректері бар сызықты роторлық жүйелерді талдау кезінде мойынтіректердің қатаңдық және демпферлеу қасиеттерін жиі жуық түрде алумен түсіндіріледі, ал шын мәнінде мойынтірек қатаңдығы түсірілген жүктемеден, яғни роторлық жүйенің жұмыс режимінен, мойынтіректердегі ойықтардың геометриясы мен өлшемдерінен, мойынтіректің ішкі және сыртқы сақинасының орнықтыру шамасынан тәуелді болады.

Роторлық машиналардың көптеген түрлерінің ішінде қуысы жартылай сұйықпен толтырылған (білігі сұйықпен салқындатылатын турбомашиналар, сұйықтықты гироскоптар, центрифугалар, сеператорлар және т.б.) роторлық жүйелер көп кездеседі. Қуысы жартылай сұйықпен толтырылған роторлар консервативті емес жүйелерге жатады. Жүйенің консервативті емес болуының және жүйеде автотербелістердің пайда болу себебі ротор қуысын жартылай толтыратын сұйықтық болып табылады. Сұйықтың реакция күшінің жүйе қозғалысына әсері көбіне ішкі үйкеліске ұқсас, яғни ол ротордың критикалық жылдамдығынан жоғары жиіліктерде біліктің айналу энергиясын оның тербеліс энергиясына айналдырады да, жүйенің орнықсыз күйге келуіне себепші болады. Эксперименталды жұмыстарға негізделген әдеби шолу нәтижесі белгілі бір жағдайларда ротор қуысын толтыратын сұйықтық орнықсыз жүйе қозғалыс режимінің негізгі көзі болып табылатынын көрсетті. Бұл құбылыстың физикалық себебі сұйық бөлшектерінің центден тепкіш үдеуі мен қарама-қарсы бағытта әсер ететін қысым градиенті арасындағы тепе-теңдік күйінің бұзылуы болып табылады.

Роторлық машиналарды жобалау және вибрациялық сипаттамаларын бағалау кезінде корпус тербелісінде ескеру қажет, яғни «ротор-сұйық-фундамент» динамикалық жүйесін толық қарастыру керек. Қуысы ішінара сұйықпен толтырылған роторлық жүйелер динамикасына бағытталған көптеген теориялық және тәжірибелік зерттеулерде тек қана сұйықпен толтырылған ротордың тербелісі қарастырылып, ал фундамент қозғалыссыз деп қарастырылады. Мұндай жорамалдар роторлық жүйелердің динамикалық және кинематикалық сипаттамаларын бағалау кезінде үлкен қателіктерге алып келеді. Роторлық жүйелер сияқты динамикалық жүйелер үшін, тәжірибелік зерттеулер фундамент вибрациясын ескеру және оны төмендету әдістерін әзірлеу қажет екендігін көрсетеді.

Берілген жұмыста қуысы жартылай сұйықпен толтырылған серпімді фундаментке тік орналастырылған домалау мойынтіректерінде айналмалы қозғалыс жасайтын роторлық жүйелер зерттеледі. Айналу дәлдігі мен ротордың айналу жылдамдығын арттыруға бағытталған талаптарға байланысты домалау мойынтіректерінің серпімді қасиеттерін ескеру қажеттігі туындайды. Мұндағы ротор динамикасына айтарлықтай әсер ететін фактор домалау мойынтірегінің, домалау денесінің домалау жолдарымен жанасу нүктесіндегі деформациясы есебінен туындайтын радиалдық иілгіштік кезіндегі сызықсыз қатаңдық қасиеттері болып табылады.

Центрифугалық техникада пайда болған жаңа тенденциялар центрифугалардың әртүрлі конструкцияларының пайда болуына әкелді, олардың кейбіреулерін белгілі жолдар арқылы сандық және сапалық тұрғыдан бағалау қиын болып табылады. Бұл тақырыпқа арналған көптеген ғылыми жұмыстар, патенттер мен авторлық куәліктер алынған, қатты бөлшектерді сұйықтықтардан центрифугалау арқылы механикалық бөлу әдістері және оны жүзеге асыру үшін көптеген құрылғылар ұсынылған.

Бұл жұмыста бөлшектің кеңістіктік қозғалысы және оның вертикаль центрифугада тұну уақыты зерттеледі, қатты бөлшектерді сұйықтықтан бөлу процесін толық бағалау үшін ротордың, түтіктердің бұрыштық айналу жылдамдығының шамасы және олардың көлбеу бұрышы уақытқа байланысты өзгермелі шамалар екендігі ескеріледі, бұл сонымен қатар бөлшектердің және механикалық жүйенің дифференциалдық теңдеулерінің жалпы шешімін табуды күрделендіреді. Бірнеше осыған дейін жарық көрген еңбектер мен жарияланымдар негізінде суспензияны өңдеу үшін пайдаланылатын роторлық қондырғыға арналған сепарация мен седиментация үдерістерін сипаттау үшін қолданылатын аналитикалық зерттеу және бағалау жұмыстарының әдістемесі жасалды.

Жұмыстың мақсаты: «ротор-сұйықтық-фундамент» жүйесінің өзара байланысқан тербелістерін ескеретін бейсызықты роторлық жүйелердің жалпыланған динамикалық модельдерін жасау, сондай-ақ вертикаль роторлық жүйелердегі қатты бөлшектерді бөлу үдерісін зерттеу болып табылады. Жұмыста келесі есептер шешіледі:

– вертикаль сұйықтығы бар роторлардың және фундамент қозғалысын және бейсызықтықты ескерген кездегі өзара байланысты динамикасын

зерттеуге мүмкіндік беретін, «ротор-сұйықтық-фундамент» жүйесінің жалпыланған динамикалық моделін құру және зерттеу;

– қуысы сұйықтықпен жартылай толтырылған вертикаль роторлық жүйелердің меншікті және мәжбүрлі бейсызық тербелістерінің амплитудасын, сонымен қатар критикалық және резонанстық жиіліктерін есептеудің аналитикалық әдістемесін әзірлеу;

– вертикаль роторлық жүйелердегі қатты бөлшектерді сепарациялау үдерісінің негізгі сипаттамаларын есептеу әдістемесін жасау.

Зерттеу әдістері:

– теориялық және тұтас орта механикасының негізгі іргелі заңдары;
– сызықты және бейсызық тербелістер теориясының әдістері;
– бейсызық дифференциал тендеулерді шешуге арналған дәлдігі жоғары классикалық сандық әдістер.

Ғылыми жаңалығы. Берілген жұмыста қуысы жартылай сұйықпен толтырылған, сипаттамасы бейсызық болып табылатын домалау мойынтіректерінде айналатын, серпімді фундаментке орнатылған роторлық жүйелердің кешенді шешімі көрсетіледі. Дуффинг тендеуімен сипатталатын бейсызық роторлық жүйелердің Якоби эллиптикалық функциялары арқылы шешімі анықталып, меншікті, мәжбүрлі тербелістері зерттеледі. Қуысы сұйықпен толтырылған бейсызық «Ротор – сұйықтық – фундамент» жүйелерінің меншікті, мәжбүрлі және автотербелістер орын алатын жиіліктері анықталады. Сұйықтығы бар вертикаль роторлардың, фундамент қозғалысын және бейсызықтықты ескерген кездегі, өзара байланысты тербелістерін зерттеуге мүмкіндік беретін «Ротор-сұйықтық-фундамент» жүйесінің жалпыланған динамикалық моделі жасалды. Алғашқы рет қуысы сұйықтықпен жартылай толтырылған вертикаль роторлық жүйелердің меншікті және мәжбүрлі бейсызық тербелістерінің амплитудасын, критикалық және резонанстық жиіліктерін есептеудің аналитикалық әдістемесі дайындалды. Алғашқы рет вертикаль роторлық жүйелердегі қатты бөлшектерді сепарациялау үдерісінің негізгі сипаттамаларын есептеу әдістемесі жасалды.

Қорғауға шығарылатын ғылыми тұжырымдамалар:

– вертикаль роторлардың сұйықтықпен өзара байланысты қозғалыстарының динамикасын зерттеуге мүмкіндік беретін «ротор-сұйықтық-фундамент» жүйесінің жалпыланған динамикалық және математикалық моделі;

– қуысы сұйықтықпен жартылай толтырылған вертикаль роторлық жүйелердің меншікті және мәжбүрлі тербелістерінің критикалық және резонанстық жиіліктерін және амплитудаларын есептеудің бейсызықтық орын алған кезде аналитикалық әдістемесі;

– вертикаль роторлық жүйелердегі қатты бөлшектерді сепарациялау үдерісінің негізгі сипаттамаларын есептеу әдістемесі.

Ғылыми тұжырымдамалардың, диссертациялық жұмыс қорытындылары мен нәтижелерінің дұрыстығы мен негізділігі. «Қатты дене-сұйықтық» жүйесінің динамикалық моделін құру кезінде екінші текті

Лагранж теңдеулері және Эйлердің гидродинамикалық теңдеуі қолданылады. Жылжымалы мойынтіректердің бейсызық сипаттамасы Герц теориясына сәйкес модельденеді. Қатты дененің қозғалысының сызықты емес дифференциалдық теңдеулерінің шешімдерін анықтау үшін комплексті амплитуда әдісі, гармоникалық баланс және т.б. әдістері пайдаланылады. Мәжбүрлі және меншікті тербелістердің, ротордың және фундаменттің субгармоникалық және ультрагармоникалық тербелістерінің амплитудасын анықтау үшін сызықтық емес тербелістер теориясындағы есептерді шешу әдістері қолданылады.

Зерттеудің теоретикалық және практикалық өзектілігі. Жұмыс нәтижелері қуысы сұйықтықпен жартылай толтырылған роторлық жүйелердің бейсызық динамикасындағы зерттеулерді жетілдірудің ғылыми негізі болып табылады және жоба алдындағы есептеулерді ең аз шығындармен жүргізуге, сапалық және сандық сипаттамалар жасауға және жаңа вертикаль роторлық машиналардың жобалау уақытын қысқартуға, олардың жұмысының сапасы мен қауіпсіздігін арттыруға мүмкіндік береді. Ұсынылған жұмыстың практикалық маңызы машина жасау және машинатану салаларының күрделі облысын құрайтын роторлық құрылғылар саласында бейсызықтықтың өндіріс үдерісіне әсерін зерттеуге бағытталып, сонымен қатар мұнайды өзге компоненттерінен тазалау, ауыр мұнайдан құнды және бағалы элементтерді, жеңіл көмірсудан парафин бөлу сияқты көптеген мәселелерді шешуге болатын вертикаль үздіксіз үдерісті центрифугалардың динамикасын сипаттау арқылы мұнайдың құбырлармен ағуын арттырады, мұнай өңдейтін зауыт жабдықтары мен құбырлардың жарамдылық мерзімін ұзартады, аймақтардың экологиялық жағдайын жақсартуға бағытталған.

Жұмыстың басқа ғылыми-зерттеу жұмыстарымен байланысы. Ұсынылған жұмыс энергетика және машина жасау ғылымдары саласындағы қолданбалы зерттеулерді гранттық қаржыландыру бағдарламасының «Жоғары жиілікті электромагниттік өріс әсері мен тіректердің бейсызықтығын ескергендегі көпфазалы сұйық орталарды бөлуге арналған роторлық машиналардың динамикасын зерттеу және жобалау» (2020-2022 жж., АР08856167) шеңберінде жасалды.

Жұмыс апробациясы. Жұмыстың негізгі нәтижелері: әл-Фараби атындағы ҚазҰУ «Механика» кафедрасының профессоры А.Б.Қыдырбекұлының басшылығымен өткен, 2019 ж. Keele University (United Kingdom) Mathematics Research Centre факультетінде профессор J.Kaplunov басшылығымен өткен, 2020 ж. Florida Atlantic University (Boca Raton, USA) Ocean and Mechanical Engineering Department факультетінде профессор I.Elishakoff басшылығымен өткен ғылыми семинарларында; сонымен қатар International Conference on «Modern Achievements of Science and Education» (Paris, France, 2013), 1st International Conference on Mathematical Methods & Computational Techniques in Science & Engineering (Athens, Greece, 2014), XII International conference on the Theory of Machines and Mechanisms (Liberec, Czech Republic, 2016), «Приоритетные задачи и стратегия технических наук» (Тольятти, Россия, 2017), «Актуальные проблемы информатики, механики и

робототехники. Цифровые технологии в машиностроении» (Алматы, Казахстан, 2018), XIII International conference on the Theory of Machines and Mechanisms (Liberec, Czech Republic, 2021) ғылыми-практикалық конференцияларында және Ө. А. Жолдасбековтың 90-жылдығына арналған екінші халықаралық «Механика будущего» атты симпозиумында (Алматы, Казахстан, 2021) баяндалды.

Жарияланымдар. Диссертацияның негізгі ғылыми нәтижелері 12 жарияланымда жарық көрді, яғни ҚР БҒМ БҒСБК ұсынған журналдарда 3 мақала, Scopus деректер базасымен рецензияланатын ғылыми журналдарда 4 мақала, оның ішінде нөлдік емес импакт-фактормен 2 мақала, халықаралық конференциялар еңбек жинақтарында 6 жарияланым, және 1 патент.

Автордың қосқан жеке үлесі. Диссертациялық жұмыста жасалған зерттеулердің негізгі нәтижелерін автор өзі алды.

Диссертацияның құрылымы мен көлемі. Диссертациялық жұмыс кіріспе, 3 бөлім, қорытынды, 105 қолданылған әдебиеттер тізімінен тұрады. Жұмыстың көлемі 121 беттен, оның ішінде 3 кесте және 51 суреттен тұрады.

Диссертациялық жұмыстың негізгі мазмұны. Кіріспеде диссертациялық зерттеу тақырыбының өзектілігі, жұмыстың негізгі мақсаты, зерттеу объектісі, пәні мен әдістері, диссертациялық жұмыстың ғылыми жаңалығы, ғылыми-практикалық маңызы сияқты сұрақтар қамтылған.

Бірінші бөлімде зерттелетін мәселенің қазіргі жағдайы сипатталып, қуысы сұйықтықпен жартылай толтырылған қатты дененің бейсызық тербелістері саласындағы жұмыстар мен әдебиеттерге шолу жасалды. Сонымен қатар серпімді тіректердің бейсызықтығын ескергендегі қозғалмалы фундаментте орналастырылған қуысы сұйықтықпен жартылай толтырылған ротордың динамикалық моделі құрылып, «ротор-сұйықтық-фундамент» жүйесінің бейсызық меншікті және мәжбүрлі тербелістеріне талдау жүргізілді.

Екінші бөлімде серпімді тіректердің бейсызықтығын ескергендегі қозғалмалы фундаментте орналастырылған қуысы бос ротордың динамикалық моделі құрылып, «ротор-фундамент» жүйесінің бейсызық меншікті және мәжбүрлі тербелістерінің амплитудасы мен жиіліктерін жоғары дәлдікпен анықтауға мүмкіндік беретін Якоби эллиптикалық функциялар әдісіне негізделген әдістемелер ұсынылып, сәйкесінше белгілі классикалық әдістермен салыстырмалы талдау жасалды. Сонымен қатар берілген жүйенің ротор қуысы бос болған кезде орын алатын суб және ультрагармоникалық резонанстарға кеңінен талдау жүргізілді.

Үшінші бөлімде қарастырылып жатырған роторлық жүйенің өндірісте қолданбалы мысалдарының бірі болып табылатын шикі мұнайды тазартуға арналған сепаратор-центрифуганың ішінде жоғарыда келтірілген тербелістер салдарынан концентрациясы төмен көпфазалы орталарда қатты бөлшектердің сепарациясы мен седиментация үдерістеріне талдау жасалып, маңызды нәтижелер алынды.

Қорытындыда диссертациялық жұмыста алынған негізгі нәтижелер мен қорытындылар келтірілді.