

ТУРАРОВ АМАНКЕЛЬДЫ КАБДЫГАЛИЕВИЧТІҢ

«ГАЗЛИФТ ҮРДСІНІҢ КӨПФАЗАЛЫ ДИНАМИКАЛЫҚ ҮЛГІСІН САНДЫҚ ШЕШУ»

**8D05401 – «Математика» білім беру бағдарламасы бойынша философия докторы (PhD) ғылыми дәрежесін алу үшін ұсынылған диссертациясына
АННОТАЦИЯСЫ**

Жұмыстың жалпы сипаттамасы. Диссертациялық жұмыс газлифттік процестің көпфазалы динамикалық моделін сандық тұрғыда шешу әдістерін құруға және зерттеуге арналған. Жұмыста сығылатын газ үшін Навье–Стокс теңдеулерімен сипатталатын тікелей және кері есептер қарастырылады. Сонымен қатар, сұйықтық ағысының осьтік симметриялы екіөлшемді аймақтағы моделі үшін сандық әдістер жасалып, талданған, бұл ұңғымаларды пайдалану жағдайларындағы күрделі геометрия мен параметрлердің кеңістіктік таралуын ескеруге мүмкіндік береді.

Зерттеудің өзектілігі. Газлифттік процесс мұнай өндіру саласында мұнай бергіштігін арттырудың тиімді тәсілі ретінде кеңінен қолданылады. Алайда бұл процесті, әсіресе айдалатын газдың көлемі мен қысымның бастапқы шарттарын басқару бөлігінде, оңтайландыру үшін адекватты математикалық модельдер мен сандық алгоритмдерді құру қажет. Ең тиімді тәсіл – кері есептер әдісі. Кері есептерді шешудің заманауи әдістері оларды оңтайлы басқару есептеріне келтіруге негізделген, бұл вариациялық талдау мен үйлескен теңдеулер әдістерін қолдануға мүмкіндік береді. Бұл жұмыстың өзектілігі – газлифттік ұңғымаларды басқару тиімділігін арттыру мақсатында мұндай кластағы есептерді шешуге арналған орнықты және жинақталатын сандық әдістерді құру қажеттігімен айқындалады.

Бұл диссертациялық жұмыс мұнай өндірудегі газлифттік процесті сипаттайтын үзіліс коэффициенттері бар сығылатын газ үшін Навье–Стокс теңдеулерін әрі қарай зерттеуге арналған. Аталған теңдеулер үшін кері есепті сандық шешу барысында вариациялық тәсіл қолданылады. Мақсатты функционалды минимизациялау нәтижесінде сәйкесінше түйіндес есепке келеміз. Тура есептің бастапқы шарттарын сандық түрде анықтау үшін градиенттік итерациялық әдіс қолданылады. Алынған теориялық нәтижелерді растау үшін сандық есептеулер жүргізілді.

Сондай-ақ, диссертациялық жұмыста шығу шекарасында қысым $p = p_{\text{вых}}$ берілген және кіріс пен шығыс аймақтарында жылдамдық векторының жанама құраушысы нөлге тең (бірқалыпты ағыс) болатын тұтқыр сұйықтықтың L -тәрізді аймақ арқылы ағу есебі зерттеледі. Бұл есеп мұнай өндіру ұңғымасының кірісіндегі қатпар қысымын $p = p_{\text{пл}}$ анықтауға мүмкіндік береді және практикалық тұрғыдан маңызды. Есепті шешу үшін Навье–Стокс теңдеулері жүйесі пайдаланылады.

Геометриялық тұрғыдан стандартты емес шекаралар үшін шекаралық шарттарды дұрыс қою мәселелері қарастырылған. Пласт ішінде және өндіруші ұңғыманың шығу бөлігінде қысым мен жылдамдықтың жанама компонентіне шарттар қойылады.

Жұмыстың мақсаты – мұнай өндірудің газлифттік процесін сипаттайтын сығылатын газ үшін Навье–Стокс теңдеулеріне арналған тура және кері есептерді шешуге арналған сандық әдісті құру және зерттеу. Сонымен қатар, ұңғыманың қабаттық қысымын анықтау әдісін әзірлеу.

Зерттеу міндеттері:

- 1) Сығылатын газ үшін Навье–Стокс теңдеулері үшін тікелей есепті шешуге арналған ақырлы-айырма схемалар жүйесін құру;
- 2) Дискреттік модельдің дұрыстығы мен сандық шешімнің орнықтылығын зерттеу;
- 3) Кері есепті қосымша шартпен берілген оңтайлы басқару есебі ретінде тұжырымдау;
- 4) Лагранж теңбе-теңдігі негізінде түйіндес есепті шығару;
- 5) Функционалды минимизациялау үшін градиенттік әдісті әзірлеу;
- 6) Бастапқы шарттарды қалпына келтіру және газлифт процесінің өнімділік қисығын құру үшін сандық эксперименттер жүргізу;
- 7) Навье–Стокс теңдеулерін стандартты емес шекаралық шарттармен шешудің сандық әдісін әзірлеу.

Зерттеу нысаны – газлифттік мұнай өндіру процесін сипаттайтын сығылатын газ үшін Навье–Стокс теңдеулері.

Зерттеу пәні – осы процесті модельдеу кезінде туындайтын тікелей және кері есептерді шешуге арналған сандық әдістер.

Зерттеу әдістері. Жұмыста кері есептерді шешудің сандық әдістері, вариациялық есептеу, оңтайлы басқару теориясы, сандық талдау, сондай-ақ туындысы бар теңдеулер үшін айырма схемаларының теориясы қолданылады. Алгоритмдердің бағдарламалық жүзеге асырылуы Python 3.13.2 тілінде орындалған.

Ғылыми жаңалығы:

- 1) Газлифттік процесті моделдейтін Навье–Стокс теңдеулері үшін кері есептегі функционалды минимизациялау кезінде туындайтын қосарланған ретроспективті есепті шешудің ақырлы-айырма схемасы ұсынылды. Бұл схеманың орнықтылығы мен жинақтылығы дәлелденді.
- 2) Соңғы уақыттағы шешім мен оның туындыларына қосымша шарттар қойылған жағдайда функционалды минимизациялайтын газлифт процесінің кері есебі үшін градиенттік әдістің сандық алгоритмі әзірленді. Қосарланған есеп Лагранж теңбе-теңдігі негізінде құрылған және тікелей есептің шешімі туралы маңызды ақпарат береді.
- 3) Қосарланған есептің шешімі мен функционал градиенті арасындағы байланыс орнатылып, бұл қосарланған теңдеулер әдісін ретроспективті қойылымда тиімді жүзеге асыруға мүмкіндік берді.
- 4) Соңғы уақыт қабатындағы белгілі мәндер бойынша бастапқы шарттарды (қысым мен шығынды) қалпына келтіру мүмкіндігін көрсететін

сандық эксперименттер жүргізілді, бұл кері есептің вариациялық қойылымының дұрыстығын растайды.

5) Ұсынылған әдіс газлифттік ұңғыманың өндірістік сипаттамаларын анықтауда тиімділігін көрсетті және бұл мұнай кен орындарын жобалау мен пайдалану режимін басқаруда маңызды қолданбалы мәнге ие.

6) Күрделі геометриялы (L-тәрізді) аймақта қабаттық қысымды анықтауға арналған сандық алгоритм жасалды, ол Навье–Стокс теңдеулерін «ағын функциясы – жылдамдық құйыны» айнымалыларына түрлендіріп, шекара бойымен интегралдау әдісіне негізделген. Шығыс қысымы белгілі болған жағдайда кіріс қысымын есептеудің түпнұсқа тәсілі ұсынылды.

Зерттеудің теориялық және практикалық маңызы. Диссертациялық жұмыстың нәтижелері газлифттік процесті автоматтандырылған басқару жүйелерін әзірлеу барысында, сондай-ақ өнімділік қисықтарын құру және қабат қысымын бағалау кезінде пайдаланылуы мүмкін. Ұсынылған сандық әдістер туындысы бар теңдеулерге арналған оңтайлы басқару есептерінің кең ауқымына да қолданылуға жарамды.

Қорғауға ұсынылатын негізгі ережелер:

- Кері есептің вариациялық тұжырымдамасы және оған сәйкес қосарланған есеп;
- Қосарланған есеп шешімі арқылы функционал градиентін анықтай отырып, градиенттік әдістің сандық іске асырылу алгоритмі;
- Газлифт процесін сипаттайтын Навье–Стокс теңдеулері үшін орнықты және жинақты айырма схемалар;
- Стандартты емес шекаралық шарттармен берілген Навье–Стокс теңдеулерін шешудің сандық әдісі;
- Әдістің тиімділігін дәлелдейтін сандық эксперименттердің нәтижелері.

Ғылыми қағидалардың, тұжырымдар мен нәтижелердің дәлдігі мен негізділігі. Зерттеу нәтижелерінің ғылыми негізділігі теңдеулердің қатаң математикалық туындылануымен, дәл аппроксимациямен, айырма схемаларының орнықтылығын теориялық талдаумен, сондай-ақ дәлдігі мен жинақтылығы бақыланған сандық эксперименттермен қамтамасыз етілген.

Жұмыстың апробациясы. Жұмыстың негізгі ережелері мен зерттеу нәтижелері келесі ғылыми конференцияларда баяндалып, талқыланды:

- академик Г.И. Марчуктың 90 жылдығына арналған «Есептеу және қолданбалы математиканың өзекті мәселелері» атты халықаралық конференция (Новосибирск қ., 2015 ж. 19–23 қазан);
- V Халықаралық конференция «Control and Optimization with Industrial Applications» (Баку қ., Әзірбайжан, 2015 ж. 27–29 тамыз);
- «Ғылымда, техникада және білімде есептеу және ақпараттық технологиялар» атты халықаралық конференция (Алматы қ., 2015 ж. 24–27 қыркүйек);

– I Халықаралық ғылыми-техникалық конференция «Қазақстанның инновациялық дамуына жастардың шығармашылығы» (Өскемен қ., 2015 ж. 9–10 сәуір);

– «International Conference on Mathematical Sciences and Statistics» (Куала-Лумпур қ., Малайзия, 2016 ж. 26–28 қаңтар);

– «Third International Conference on Analysis and Applied Mathematics» (Алматы қ., 2016 ж. 7–10 қыркүйек);

– Бакин мемлекеттік университетінің қолданбалы математика ғылыми-зерттеу институтының академик Ф.А. Алиев басқарған ғылыми семинары (Баку қ., Әзірбайжан, 2016 ж. 12 сәуір);

– Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің ақпараттық технологиялар және бизнес факультетінің, С. Аманжолов атындағы ШҚМУ-дың математика кафедрасының ғылыми семинарларында, сондай-ақ д.ф.-м.н., профессор Н.М. Темирбеков басқарған «Физикалық және техногендік үдерістердің математикалық модельдеуі» атты университетаралық ғылыми семинарда (Өскемен қ.).

– Жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті тарапынан 2013–2015 жылдарға арналған «Ауыр мұнайды алу үшін бу айдау процестерін математикалық модельдеу және оңтайландыру» тақырыбындағы ғылыми-техникалық бағдарламалар мен жобаларды гранттық қаржыландыру аясында орындалды, мемлекеттік тіркеу нөмірі: 0113РК00815 (Қосымша А).

Сонымен қатар, зерттеу нәтижелерінің апробациясы 2024–2026 жылдарға арналған «Жас ғалым» жобасы аясында жас зерттеушілердің ғылыми зерттеулерін гранттық қаржыландыру шеңберінде жүргізілуде. Жоба ИРН АР22683374 бойынша «Газлифттік процестің көпфазалы динамикалық моделін сандық шешу» тақырыбына іске асырылуда.

Басылымдар және ізденушінің жеке үлесі.

Бірлескен ғылыми жұмыстарда ғылыми кеңесшіге есептің қойылымы тиесілі, ал ізденушіге – теориялық нәтижелерді алу, есептік эксперименттерді жүргізу және олардың талдауын жасау жатады.

Диссертациялық зерттеудің негізгі нәтижелері 12 ғылыми еңбекте жарияланған, олардың ішінде: 2 мақала Scopus дерекқорына кіретін журналдарда (процентильдері 95 және 65), 4 мақала – Қазақстан Республикасының Ғылым және жоғары білім министрлігіне қарасты Ғылым және жоғары білім сапасын қамтамасыз ету комитеті ұсынған журналдарда, 6 жұмыс – халықаралық ғылыми конференция материалдарында жарияланған.

Диссертацияның құрылымы мен көлемі. Диссертация кіріспеден, үш бөлімнен, қорытындыдан, пайдаланылған әдебиеттер тізімінен және қосымшалардан тұрады. Жұмыс бірізді әрі логикалық тұрғыда үйлесімді құрылымға ие. Диссертацияның жалпы көлемі – 131 бет.

Диссертацияның негізгі мазмұны. Бірінші бөлімде газлифттік процесті сипаттайтын Навье–Стокс теңдеулері үшін есепті қоюдың теориялық негіздері қарастырылады. Мұнай ұңғымасының көтергіш құбыры мен

сақиналы кеңістігіндегі газ бен газ-сұйық қоспасының ағынының физикалық процесі сипатталады. Бірөлшемді және екіөлшемді жағдайлар үшін Навье–Стокс теңдеулер жүйесіне негізделген математикалық модель келтіріледі. Тікелей және кері есептер тұжырымдалады. Кері есеп соңғы уақыт қабатында берілген қосымша шарттармен оңтайлы басқару есебіне келтіріледі. Лагранж теңбе-теңдігі негізінде қосарланған ретроспективті есеп шығарылады.

Екінші бөлімде тікелей және кері есептерді шешудің сандық әдістері баяндалған. Тікелей есеп үшін дифференциалдық есептің ерекшеліктері мен коэффициенттердің мүмкін болатын үзілістерін ескеретін орнықты ақырлы-айырма схемалар құрастырылған. Қосарланған есепті және мақсаттық функционалды минимизациялау үшін градиенттік әдістің сандық алгоритмі әзірленген. Мақсаттық функционалдың градиентін есептеу тәсілі келтірілген. Итерациялық әдістің жинақтылығы дәлелденіп, есептеулердің дұрыстығы негізделген.

Үшінші бөлімде пайдаланылатын мұнай ұңғымасының кірісіндегі қабаттық қысымды сандық анықтау есебі қарастырылады. Есептің қойылымы екіөлшемді L-тәрізді аймақта Навье–Стокс теңдеулерін «ағын функциясы – жылдамдық құйыны» айнаымалыларында беру арқылы жүзеге асырылады. Навье–Стокс теңдеулерін шешу және ағын функциясы мен құйын мәндері бойынша кірістегі қысымды есептеу үшін ақырлы-айырма схемалары құрастырылған. Кіріс қысымын анықтауға арналған сандық интегралдау алгоритмі шекара бойымен интегралдау арқылы алынған. Сандық нәтижелерге талдау жүргізілген: қысым мен жылдамдық компоненттерінің таралуы алынған, кіріс және шығыс бөліктеріндегі қысымның профильдері салынған. Ұсынылған алгоритмнің қабаттық қысымды қалпына келтіру және мұнай ұңғымасының өндірістік сипаттамаларын анықтаудағы тиімділігі көрсетілген.