ӘӨЖ 622.276.6:539.4
МРНТИ 52.47.15
DOI 10.56525/XKBX9844

ҚАБАТТЫ ГИДРАВЛИКАЛЫҚ ЖАРУ КЕЗІНДЕ ЦЕМЕНТ САҚИНАСЫНЫҢ КЕРНЕУЛІ ДЕФОРМАЦИЯЛАНҒАН КҮЙІН БАҒАЛАУДЫҢ ЗАМАНАУИ ТӘСІЛДЕРІ

А.А.Мурзагалиева*[1], Д.С.Садуакасов[1], А.К.Абдыгалиева[2], Ж.Т. Ержанова[2], Д.К. Тәжібаев[3]
[1]Есенов университеті, Ақтау қ. Қазақстан
[2]Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті, Орал Қазақстан
[3]Қырғыз Республикасы Ұлттық ғылым академиясының Геомеханика және жер қойнауын игеру институты, Бішкек қ., Қырғызстан
e-mail:Murzagalievaalma6@gmail.com, danabek.saduakassov@yu.edu.kz, Ainagul_132!@mail.ru, Nazim2008@mail.ru, daniar.tazhibaev@kstu.kg

Аңдатпа. Мақалада қабатты гидравликалық жару (ҚГЖ) кезінде цемент сақинасының кернеулі деформацияланған күйін бағалаудың заманауи тәсілдеріне жүйелі шолу берілген. "Шегендеу тізбегі - цемент- тау жынысы" көп қабатты цилиндрлік жүйенің аналитикалық модельдері, соңғы элементтер әдісімен сандық есептеулер, сондай-ақ цемент сақинаның механикалық қасиеттерін, оның созылу беріктігін, серпімділік модулін және температура әсеріне эксперименттік зерттеу қарастырылады. Цемент сақинасының тұрақтылығына әсер ететін негізгі факторлар: қабатты гидравликалық жару режимдері, циклдік жүктеме, температураның ауытқуы, цементтің корпус пен жынысқа адгезиясының сапасы, сондай-ақ ақаулардың болуы (толық емес байланыс, кеуектілік, микрокректер мен бос орындар). Ішкі қысымның жоғарылауымен цемент сақинасының ішкі бетінде максималды созылу кернеулері пайда болады, бұл жарықтар мен көші-қон арналарының пайда болу ықтималдығын арттырады. Жұмыста қысым мен температураның өзгеруінің қайталанатын циклдары микрозақымның жиналуына, созылу беріктігінің төмендеуіне және цемент құрылымының деградациясын жеделдетуге ықпал ететіні атап көрсетілген, бұл көп сатылы ҚГЖ үшін өте маңызды. Сезгіштікті талдау мен ықтималдық бағалауды қоса алғанда, аналитикалық, сандық және статистикалық әдістерді біріктіретін цемент сақинасының бұзылу қаупін бағалаудың кешенді тәсілі ұсынылған. Алынған тұжырымдар цементтеуді жобалауда, цемент құрамдарын таңдауда және ұңғымалардың сенімділігін арттыру және қабат аралық ағындардың алдын алу үшін ҚГЖ режимдерін жоспарлауда пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: қабатты гидравликалық жару; цемент сақинасы; кернеулі деформацияланған күйі; көп сатылы ҚГЖ; соңғы элементтер әдісі; циклдік жүктемелер; термомеханикалық әсерлер; цементтің адгезиясы.

Кіріспе

Қазіргі уақытта көмірсутектерді өндіру геологиялық-техникалық күрделіліктің жоғарылауы жағдайында жүргізілуде, бұл ағынды қарқындату технологияларын қолдануды талап етеді. Технологиялардың бірі-жарықтардың пайда болуы арқылы дебиттің өсуін қамтамасыз ететін қабатты гидравликалық жару (ҚГЖ). Көлденең және көлбеу ұңғымаларда көп сатылы ҚГЖ-ны кеңінен қолдану ұңғыманың құрылымына механикалық жүктемелерді және цемент сақинасының тұтастығын бұзу қаупін арттырады. Цемент сақинасы шегендеу тізбегі мен жыныстар арасындағы тығыздықты қамтамасыз етеді, қабаттар арасындағы ағындар мен ағып кетулердің алдын алады. Оның тұтастығын жоғалту- пайдалану тиімділігінің төмендеуіне және апаттық тәуекелдердің өсуіне әкеледі, және ҚГЖ кезінде цемент сақинасының тұрақтылығын қамтамасыз ету міндетін ерекше өзекті етеді. Цемент

сақинасының кернеулі деформацияланған күйін талдау әдістері шартты түрде үш топқа бөлінеді: аналитикалық, сандық және эксперименттік. Аналитикалық модельдер шегендеу тізбегі–цемент–тау жыныстары жүйесіндегі кернеулердің таралуы туралы жалпы түсінік береді, бірақ жеңілдетуге негізделген. Сандық әдістер күрделі геометрияны және қасиеттердің бірбағытты еместігін ескереді, бірақ айтарлықтай есептеу ресурстары мен валидацияны қажет етеді. Эксперименттік зерттеулер цементтің механикалық күйі туралы сенімді мәліметтер береді, бірақ зертханалық жағдайлармен шектеледі. Бұл ретте көп сатылы ҚГЖ кезінде циклдік жүктемелердің және температуралық әсерін ескеретін бірыңғай кешенді тәсіл жоқ.

Зерттеу объектісі-ҚГЖ жүргізу кезінде корпуспен және жыныстармен байланыста болатын цемент сақинасы, қысым, температура және циклдік жүктемелердің әсерінен оның кернеулі деформацияланған күйі. Жұмыстың мақсаты-бағалау әдістерін жүйелеу, бұзылу механизмдерін анықтау және цементтің беріктігін арттыру бағыттарын анықтау. Бұзылу жоғары созылу кернеулерінің, циклдік жүктемелердің және байланыс жағдайларының нашарлауының үйлесуіне байланысты деп болжанады.

Қазақстан үшін ерекше өзектілігі бар, онда жетілген және геологиялық жағынан біртекті емес кен орындарын игеру көп сатылы ҚГЖ-ны белсенді қолданумен қатар жүреді. Мұндай жағдайларда цемент қабаты статикалық және динамикалық әсерлерге ұшырайды, бұл ақаулар мен тығыздағыштың бұзылу қаупін арттырады.

Цемент сақинасының тұтастығына әсер ететін факторларды төрт топқа біріктіруге болады:

- геомеханикалық (тау жыныстарының гетерогенділігі, қабат кернеулері, кеуек қысымының өзгеруі);
- технологиялық (цементтеу режимдері, оқпанды дайындау сапасы, цемент құрамы);
- пайдалану (циклдік жүктемелер, температуралық ауытқулар, химиялық әсер);
- материалдық (беріктік, серпімділік модулі, кеуектілік, термиялық кеңею).

Олардың өзара байланысы зақымдану сипатын және ҚГЖ жүргізген кезде цемент сақинасының бұзылу ықтималдығын анықтайды.

Материалдар мен әдістер

Зерттеу материалы-ұңғымалардың геомеханикасы, цементтеу және қабатты гидравликалық жару туралы ғылыми мақалалар, монографиялар, есептер мен стандарттар. Өзектілігін қамтамасыз ету үшін соңғы 10 жылдағы жұмыстарға басымдық берілді, алайда талдауға цемент сақинасы механикасының негізгі заңдылықтарын және оның қаптамамен және жыныстармен өзара әрекеттесуін анықтайтын іргелі зерттеулер енгізілді [1-2].

Жарияланымдарды таңдау критерийлері: тақырыпқа сәйкестік, математикалық модельдердің немесе эксперименттік деректердің болуы, дәйексөз дәрежесі және кейінгі зерттеулерге әсері. Циклдік жүктемелерді, термомеханикалық әсерлерді және цементтің қаптама мен жыныстарға адгезиясын қарастыратын жұмыстарға ерекше назар аударылды [3-6].

1. Аналитикалық модельдер

Аналитикалық модельдер көп қабатты цилиндрлерге арналған серпімділік теориясының міндеттеріне негізделген. Цемент сақинасы корпус пен тау жыныстары арасындағы цилиндрлік қабық ретінде қарастырылады. Қабатты гидравликалық жару кезіндегі ішкі қысым цемент сақинасының ішкі бетіне әсер етеді, нәтижесінде радиалды және айналмалы кернеулер пайда болады [7].

Аналитикалық модельдердің негізгі қорытындысы-цемент сақинасының ішкі бетіне жақын жерде созылатын максималды кернеулер пайда болады. Бұл материалдардың қаттылығының айырмашылығына және дизайн геометриясына байланысты. Қабатты гидравликалық жару қысымының күрт өсуі жағдайында созылу кернеулері цемент тасының созылу беріктігінің шегінен асып кетуі мүмкін, бұл жарықтардың пайда болуына әкеледі [8-10].

Аналитикалық модельдер кернеу күйіне әсер ететін негізгі параметрлерді анықтауға мүмкіндік береді: цементтің серпімділік модулі, Пуассон коэффициенті, цемент сақинасының

қалыңдығы, корпус пен тау жыныстарының қаттылығы. Дегенмен, олардың шектеуі жеңілдетілген болжамдар болып табылады: тамаша байланыс жағдайлары, ақаулардың болмауы, материалдардың біркелкілігі және жүктеменің осьтік симметриясы [1,7,11].

2. Сандық моделдер (СЭӘ)

Сандық модельдер (СЭӘ) ұңғыманың күрделі геометриясын, материалдардың гетерогенділігін, цемент сақинасының ақауларын және материалдардың сызықтық емес әрекетін ескеруге мүмкіндік береді. Модельдер сценарийлерді қарастырады: қысымның тез көтерілуі, циклдік жүктеме, температураның әсері және байланыс жағдайларының өзгеруі [12-15].

Маңызды элемент–цемент–болат және цемент-тау жыныстарының адгезиясын модельдеу. Нашар адгезиямен кернеулердің қайта бөлінуі жүреді, созылу кернеулерінің шоғырлануының жергілікті аймақтары пайда болады, бұл цементтің жергілікті бұзылуына әкелуі мүмкін. Сандық модельдер сонымен қатар цементтің пластикалық деформациясын, сынуын және беріктігінің деградациясын ескеруге мүмкіндік береді [9,15].

3. Эксперименттік зерттеулер

Эксперименттік зерттеулер цемент тасының механикалық қасиеттерін зерттеуге бағытталған: қысу және созылу беріктігі, серпімділік модулі, икемділік, температура мен жүктеме жылдамдығының әсері. Маңызды бағыт — циклдік жүктемелердегі цемент тасының механикалық күйін зерттеу, бұл әсіресе көп сатылы қабатты гидравликалық жару үшін маңызды [3,15].

Агрессивті орталардың (қышқылдар, тұздар) цемент тасының деградациясына әсері де зерттелуде. Бұл деректер сандық модельдерді тексеру және жаңа цемент құрамдарын жасау үшін қолданылады [12,13].

4. Цемент сақинасының ақаулары және олардың кернеуінің таралуына әсері

Ұңғымаларды цементтеу тәжірибесінде цемент сақинасының ақауларының бірнеше түрі бар: цементтелмеген (цементтің "жарылуы"), цементтің корпуспен тығыз байланысы, цементтің жыныспен тығыз байланысы, цемент сақинасындағы жарықтар, цементтің кеуектілігі және микрожарылуы [5,9,14].

Ақаудың әр түрі кернеуі әртүрлі қайта бөлінуіне әкеледі. Мысалы, еркін байланыста болған кезде цемент корпуспен бірге "жұмыс істемейді", бұл цемент сақинасына жүктемені арттырады және кернеудің шоғырлануына әкеледі. Нәтижесінде жанасудан бос орындарға өту орындарында созылу кернеулерінің жоғарылауының жергілікті аймақтары пайда болады, олар жарықшақтардың бастамашысы бола алады [2,5,9].

5. Модельдерді тексеру тәсілдері

Зерттеудің маңызды кезеңі-модельдерді тексеру. Тексеру мыналарды қамтиды:

аналитикалық модельдердің нәтижелерін сандық модельдермен салыстыру;

сандық есептеулерді эксперименттік мәліметтермен салыстыру;

модельдің параметрлерінің өзгеруіне сезгіштігін бағалау (серпімділік модулі, беріктік, термиялық кеңею коэффициенті) [14,15];

ақаулардың кернеуі таралуына әсерін бағалау [2,3,8].

Валидация модельдің қолданылу ауқымын және оның дәлдігін анықтауға, сондай-ақ іс жүзінде бақылауды қажет ететін ең маңызды параметрлерді анықтауға мүмкіндік береді.

6. Модельденетін жүйе мен болжамдардың сипаттамасы

Аналитикалық және сандық модельдер үшін цемент сақинасын көп қабатты цилиндрлік жүйе ретінде қарастырған жөн:

ішкі қабат-шегендеу тізбегі (болат);

ортаңғы қабат — цемент тас;

сыртқы қабаты-тау жынысы [1,7,14].

Модельдеуде қолданылатын болжамдар:

материалдар сызықты серпімді (негізгі модельде) [1];

қабаттар арасындағы байланыс мінсіз немесе шектеулі адгезиямен болуы мүмкін [2,6];

Қабатты гидравликалық жару қысымы оссимметриялық болып саналады (базалық модельде)[1,2];

температуралық әсерлер термиялық кеңею коэффициенттеріне тәуелді термиялық кернеулер ретінде қарастырылады [3,15].

Бұл болжамдар негізгі модельді алуға мүмкіндік береді, содан кейін ол сандық модельдеу және эксперименттік деректер арқылы нақтыланады [2,3].

7. Сезгіштікті талдау әдістері

Жеке параметрлердің кернеу күйіне әсерін бағалау үшін сезгіштікті талдау әдісі қолданылады. Бұл әдіс негізгі параметрлерді кезекпен өзгертетін бірқатар есептеулер жүргізеді: цементтің серпімділік модулі, созылу беріктігі, термиялық кеңею коэффициенті, адгезия коэффициенті, қабатты гидравликалық жару қысым параметрлері (максималды қысым, өсу жылдамдығы) [1,2,14].

Сезгіштікті талдау ең маңызды параметрлерді анықтауға және цементтеуді жобалау және қабатты гидравликалық жаруды жоспарлау кезінде күш - қуатты бақылауға бағыттауға мүмкіндік береді [1,15].

8. Цемент сақинасының бұзылу қаупін бағалау әдісі. Қабатты гидравликалық жару кезінде цемент сақинасының бұзылу қаупін жүйелі талдау үшін көп деңгейлі тәсілді қолданған жөн:

сапалық бағалау — ықтимал ақауларды анықтау (толық емес байланыс, жарықтар, кеуектілік); геологиялық және технологиялық факторларды анықтау [5,9];

сандық — кернеуді есептеу (аналитикалық және сандық) және цементтің беріктік сипаттамаларымен салыстыру [1,2,3];

сәтсіздік ықтималдығын бағалау-параметрлердің белгісіздігін (цемент беріктігінің өзгеруі, цемент сақинасы геометриясының дәлсіздігі, қысым мен температураның өзгеруі) есепке алу үшін статистикалық әдістерді (мысалы, Монте-Карло әдісі) қолдану [14,15].

9. Сенімділікті бағалаудағы Монте-Карло әдісі

Монте-Карло әдісі параметрлердің өзгергіштігін ескере отырып, бұзылу ықтималдығын бағалауға мүмкіндік береді. Модель кездейсоқ шамалардың таралуын енгізеді (мысалы, беріктік пен серпімділік модулі үшін қалыпты үлестірулер) және бірқатар есептеулер жүргізіледі (әдетте 1000-нан 10000-ға дейін Итерация). Нәтижесінде кернеулердің статистикалық таралуы қалыптасады және беріктіктен асып кету ықтималдығы анықталады [15].

Бұл тәсіл параметрлері белгісіздікке ие және кең ауқымда өзгеретін нақты жағдайларда цемент сақинасының бұзылу қаупін бағалауға мүмкіндік береді.

Нәтижелер және талқылау

1. Қабатты гидравликалық жару кезінде шиеленісті жағдайдың қалыптасуы

қабатты гидравликалық жару қабаттың интервалында және корпуста қысымның күрт жоғарылауымен сипатталады. Қысым цемент сақинасына ауысады, бұл созылатын, айналмалы кернеулерді тудырады. Тау жыныстарының геомеханикалық әсерімен үйлескенде, бұл жарықтар мен цемент тастың жергілікті бұзылуына жағдай жасайды [1,7,10].

Аналитикалық модельдердің нәтижелері ішкі қысым жоғарылаған сайын цементтегі созылу кернеулері радиалды кернеулерге қарағанда тез өсетінін көрсетеді. Бұл геометрияның ерекшеліктеріне және көп қабатты құрылымның механикалық қасиеттеріне байланысты. Кернеудің критикалық деңгейіне жеткенде цемент сақинасының бұзылу қаупі бар, әсіресе цементтің корпуспен жанасу аймағында [1,2].

2. Циклдік жүктемелердің әсері

Көп сатылы қабатты гидравликалық жару қысым мен температураның қайталанатын циклдарына әкеледі. Циклдік жүктеме цемент тасында микро зақымданудың жиналуына, созылу беріктігінің төмендеуіне және сынғыштықтың жоғарылауына әкеледі. Бұл цементтің "механикалық қажу" әсері ретінде көрінеді: бір реттік жүктеме кезінде созылу беріктігінен төмен жүктемелер болса да, бірнеше циклдар бұзылуға әкелуі мүмкін [14,15].

Циклдік жүктемелер цемент - болат байланысын да нашарлатады: микрожарықтар мен бөлінулер пайда болады, бұл кернеудің қайта бөлінуіне және көші-қон арналарының пайда болу қаупінің жоғарылауына әкеледі [6,9].

3. Температура әсерлері және термодеформациялар

Қабатты гидравликалық жару температурасының өзгеруі, әсіресе ыстық жуу сұйықтықтарын пайдаланғанда немесе жоғары температуралы сұйықтықтарды айдағанда айтарлықтай болуы мүмкін. Цементтің, корпустың және тау жыныстарының термиялық кеңею коэффициенттерінің айырмашылығы қосымша жылу кернеулерін тудырады. Кейбір жағдайларда температура әсерлері қысымға қарағанда маңыздырақ болуы мүмкін, өйткені жылу кернеулері механикалық түрде қосылады және микрокректердің дамуына әкелуі мүмкін [3,15].

Термомеханикалық әсерлер созылу кернеулерін күшейтеді және жарықтардың дамуын тездетеді. Қысым мен температураның бірлескен әсері күрделі модельдерді қолдануды қажет ететін сызықтық емес әсерлерге әкеледі [2,3,8].

4. Байланыс шарттары және адгезия

Цементтің корпусқа және тау жыныстарына адгезиясы цемент ерітіндісінің құрамына, цементтеу технологиясына және термиялық өңдеу жағдайларына байланысты. Адгезия жеткіліксіз болған кезде цемент сақинасы өздігінен жұмыс істей бастайды, бұл кернеудің қайта бөлінуіне және созылу кернеуінің концентрациясына әкеледі [2,6].

Талдау нәтижелері әлсіз байланыс аймақтары болған кезде цемент сақинасының бұзылу қаупі айтарлықтай артатынын көрсетеді. Сандық модельдерде контакт қаттылық пен үйкеліс коэффициентінің параметрлерімен модельденеді, алайда нақты байланыс беті біркелкі болмауы мүмкін, бұл нәтижелердің белгісіздігін арттырады [2,6,9].

5. Тәсілдерді салыстыру

Аналитикалық модельдер сапалы баға және негізгі тәуелділіктерді тез анықтауға мүмкіндік береді. Сандық модельдер егжей-тегжейлерді қамтамасыз етеді және күрделі жағдайларды ескереді, бірақ нақты деректер мен валидацияны қажет етеді. Эксперименттік зерттеулер нақты деректер береді, бірақ зертханалық жағдайлармен және сынақ ауқымымен шектеледі [1,2,3,8].

Біріктірілген тәсіл (аналитика + МКЭ + эксперимент) қабатты гидравликалық жару-да цемент сақинасының тұтастығын болжау үшін ең перспективалы болып табылады. Бұл тәсіл шеңберінде аналитикалық модельдер алдын — ала бағалау үшін, сандық модельдер егжей — тегжейлі талдау үшін, ал эксперименттік мәліметтер модель параметрлерін тексеру және нақтылау үшін қолданылады [1,2,3].

6. Цемент сақинасының бұзылу критерийлері

Цемент тасының бұзылуын бағалау үшін әртүрлі критерийлер қолданылады:

максималды негізгі кернеу критерийі-негізгі кернеудің критикалық мәніне жеткенде бұзылу орын алады;

Мизес критерийі-күрделі шиеленісті жағдайды ескереді және пластикалық деформациясы бар материалдар үшін тиімді;

зақымдану критерийі (damage model) — бұзылу циклдік жүктеме кезінде зақымданудың жинақталуы арқылы модельденеді [2,9,15].

ҚГЖ жағдайында сыну критерийі көбінесе созылу беріктігінен асып түседі, өйткені цемент тасының созылу беріктігі салыстырмалы түрде төмен және сынуға бейім [1,3,10,7]. Созылу кернеулерін математикалық бағалау

Кернеулерді сандық бағалау үшін көп қабатты цилиндр моделін қолдануға болады. Ішкі қысым кезінде (p) цемент - корпус шекарасында цементтегі кернеулер шамамен көрсетіледі:

$$\sigma_\tau(\tau) = \frac{P \cdot R_i^2}{R_0^2 - R_i^2}\left(1 - \frac{R_0^2}{r^2}\right) \quad (1)$$

$$\sigma_\tau(\tau) = \frac{P \cdot R_i^2}{R_0^2 - R_i^2}\left(1 + \frac{R_0^2}{r^2}\right) \quad (2)$$

мұнда (Ri) — цемент сақинасының ішкі радиусы, (Ro) — сыртқы радиус [1,7].

Формуланы талдауы көрсеткендей, айналмалы кернеулер ішкі бетке жақын максимумға жетеді, бұл бұзылудың сипатын түсіндіреді — жарықтар әдетте корпус жағынан басталады [1,7].

8. Динамикалық факторлардың рөлі (уақытша әсерлер)

ҚГЖ-бұл қысқа уақыт ішінде қысым күрт артуы мүмкін динамикалық процесс. Динамикалық режимде маңызды: қысымның жоғарылау жылдамдығы, қысымның сақталу уақыты және циклдардың қайталануы (көп сатылы) [11,12].

Қысымның тез өсуімен цемент тасының кернеуді қайта бөлуге уақыты болмауы мүмкін, бұл жергілікті концентрацияға әкеледі. Бұл әсіресе көп сатылы ҚГЖ жағдайында өте маңызды, мұнда әр кезең цементті қайта жүктейді [11,12].

9. Кеуектілік пен микрожарықшақтықтың әсері

Цемент тасының кеуектілігі және микрокректердің болуы беріктікті айтарлықтай төмендетеді және созылу кернеулеріне сезгіштікты арттырады. Микрокректер термиялық өңдеу кезеңінде немесе температураға ұшыраған кезде пайда болуы мүмкін. Қабатты гидравликалық жару кезінде микрожарықтар кеңейіп, макрожарықтарға біріктіріледі, бұл цемент сақинасының тұтастығын жоғалтуға әкеледі.

10. Цемент сақинасы ақауларының кернеудің таралуына әсері

Нақты жағдайда цемент сақинасы сирек мінсіз болады. Ең жиі кездесетін ақаулар: цементтің корпуспен толық жанаспауы, цементтің жыныспен толық жанаспауы, жарықтар мен бос орындардың болуы, цемент сақинасының біркелкі емес қалыңдығы [11,12].

Әрбір ақау кернеудің таралуын өзгертеді. Мысалы, еркін жанасу кезінде цемент сақинасы жүктеменің бір бөлігін қабылдамайды және кернеулер жанасудан үзіліске өту орындарында шоғырланады. Бұл созылу кернеулерінің жергілікті жоғарылауына әкеледі, жарықтардың себебі болып табылады [11,12].

11. Қабатты гидравликалық жару кезіндегі қысымның жоғарылау жылдамдығының рөлі

Қабатты гидравликалық жару процесінде қысымның жоғарылау жылдамдығы маңызды параметр болып табылады. Қысымның тез өсуімен цемент тасының кернеуді қайта бөлуге уақыты жоқ, бұл жергілікті бұзылу ықтималдығын арттырады. Сонымен қатар, қысымның тез өсуі қосымша жүктеме әкелетін гидродинамикалық соққыларға әкелуі мүмкін.

Модельдерде екі режимді қарастырған жөн: қысымның біртіндеп жоғарылауы (бұзылу қаупі аз) және күрт өсу (үлкен тәуекел).

12. Температура градиентінің әсері

Қабатты гидравликалық жару-дағы жылу әсерлері айдалатын сұйықтық пен қабат арасындағы температура айырмашылығына байланысты пайда болады. Цемент сақинасының ішінде механикалық термиялық кернеулер пайда болады. Егер цементтің термиялық кеңею коэффициенті болат пен тау жыныстарынан өзгеше болса, бұл қосымша созылу немесе қысу кернеулеріне әкеледі. Көп сатылы қабатты гидравликалық жару жағдайында температураның ауытқуы қайталанады, бұл механикалық қажу бұзылу қаупін арттырады.

13. Цемент түрлерін салыстыру және олардың тұрақтылыққа әсері

Цементтің әртүрлі түрлері (полимерлермен модификацияланған классикалық портландцементтер, глинозем және т.б.) серпімділік модулімен, беріктігімен және икемділігімен ерекшеленеді. Қазіргі қабатты гидравликалық жару жағдайында серпімділік модулі төмен және икемділігі жоғары композициялар артықшылық алады, жарылу қаупін азайтады. Сонымен қатар, мұндай композициялар қысу беріктігі мен химиялық тұрақтылығын сақтауы керек.

Кесте 1. Қабатты гидравликалық жару кезіндегі цемент сақинасының кернеулі деформацияланған күйіне және оларға әсер ететін факторлар

№	Факторлар тобы	Нақты фактор	Әсер ету механизмы	Цемент сақинасы үшін нәтиже
1	Геомеханикалық	Тау жынысының кернеулі күйі	Цементке айналмалы және радиалды кернеулердің өзгеруі	Жүктемелердің жоғарылауы / төмендеуі, цементтің деформациясы мүмкін
2	Геомеханикалық	Тау жынысының жарықшақтығы	Қаттылықтың төмендеуінің және жүктеменің біркелкі бөлінбеуінің жергілікті аймақтары	Кернеу концентрациясы, жергілікті бұзылу қаупі
3	Технологиялық	Қабырғаларды тазарту сапасы	Бұрғылау ерітіндісінің, балшық қыртысының болуы	Цементтің жыныспен/қаптамамен еркін байланысы
4	Технологиялық	Цемент ертіндісінің құрамы	Серпімділік модулі, икемділік, кеуектілік	Жарықшаққа төзімділік пен шөгудің өзгеруі
5	Технологиялық	Цементтеу режимы	Айдау жылдамдығы, қысым, температура	Ақаулардың пайда болуы, цемент сақинасының біртексіздігі
6	Пайдалану	Көп сатылы Қабатты гидравликалық жару кезіндегі циклдік жүктемелер	Қайталанатын жүктеу/түсіру циклдары	Зақымданудың жиналуы, цементтің шаршауы
7	Пайдалану	Температуралық тербелістер	Жылу кеңеюінің айырмашылығы	Термиялық кернеу, микрокректердің өсуі
8	Материалды	Цемент адгезиясы	Байланыс сапасы цемент-болат және цемент-жыныс	Кернеуді қайта бөлу, жергілікті шоғырлану аймақтары
9	Материалды	Цемент кеуектілігі	Микро және макрокеуектердің болуы	Беріктіктің төмендеуі, созылу сезгіштігінің жоғарылауы
10	Материалды	Цементтің шөгуі	Термиялық өңдеу кезіндегі ішкі кернеулер	Жарықтардың пайда болуы, байланыстың нашарлауы

Қорытынды

Қабатты гидравликалық жару кезіндегі цемент сақинасының кернеулі-деформацияланған күйі созылу шеңберінің кернеулерінің, циклдік жүктемелердің, температуралық әсерлердің және байланыс жағдайларының үйлесімімен анықталады [1,2,17].

Цемент тасты бұзудың негізгі механизмі — циклдік жүктеме кезінде зақымданудың жинақталуымен күшейтілген созылу беріктігінің артуы [3,6,15].

Аналитикалық модельдер алдын — ала бағалау үшін маңызды, сандық модельдер егжей — тегжейлі талдау үшін, ал эксперименттік зерттеулер валидация үшін маңызды [2,6,9].

1. Қабатты гидравликалық жару кезіндегі максималды созылу кернеулері цемент сақинасының ішкі бетіне жақын жерде пайда болады, бұл материалдардың қаттылығының айырмашылығына және дизайн геометриясына байланысты [1,2,7].

2. Циклдік жүктемелер мен термомеханикалық әсерлер цемент тасының бұзылу қаупін арттырады, өйткені олар микро зақымданудың жиналуына және цемент–болат адгезиясының нашарлауына ықпал етеді [3,6,16].

3. Цементтің қаптамамен және тау жыныстарымен жанасу сапасы қабатты гидравликалық жару кезінде кернеудің таралуы мен цемент сақинасының тұрақтылығын анықтайтын негізгі фактор болып табылады [2,6,9].

4. Біріктірілген тәсіл (аналитика + МКЭ + эксперимент) цемент сақинасының тұтастығын болжауда ең тиімді болып табылады, өйткені ол күрделі шарттар мен валидацияны ескеруге мүмкіндік береді [1,2,3].

5. Қабатты гидравликалық жару кезінде цемент сақинасының сенімділігін арттыру үшін динамикалық, температуралық және материалдық факторларды ескеру, сондай-ақ цементтеу сапасы мен байланыс жағдайларын бақылау қажет [5,10,14,16].

Практикалық маңыздылығы цементтеуді жобалау және қабатты гидравликалық жаруды жоспарлау, материалдар мен режимдерді таңдау кезінде жалпыланған тұжырымдарды қолдану мүмкіндігінде.

Цемент сақинасының бұзылу қаупін азайту үшін икемділігі мен жарыққа төзімділігі жоғары цемент қосылыстарын қолдану, сондай-ақ цементтің қаптамамен және жыныспен сапалы байланысын қамтамасыз ету ұсынылады.

ҚГЖ жобалау кезінде циклдік жүктемені ескеру және қосымша қауіпсіздік коэффициенттерін енгізу, сондай-ақ қысым мен температура режимдерін оңтайландыру қажет.

Әрі қарайғы зерттеулердің перспективалық бағыттары: қысымның, температураның және химиялық факторлардың бірлескен әсерін ескеретін интеграцияланған модельдерді әзірлеу; жарыққа төзімділігі жоғары цемент құрамдарын құру; цемент сақинасының жай-күйін жедел талдау үшін цифрлық құралдарды енгізу.

ӘДЕБИЕТТЕР

1. Нуров М.А., Гусманова А.Г. Анализ причин обводнения скважин и обоснование методов интенсификации добычи нефти. Yessenov Science Journal, 2025, № 4 (53), с. —. DOI: 10.56525/3fdf7259.

2. Zhang, L., et al. Stress distribution in cement sheath of casing during hydraulic fracturing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, Vol. 165, pp. 123–134.

3. Wang, J., et al. Finite element modeling of cement sheath integrity under hydraulic fracturing. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, Vol. 118, pp. 102–113.

4. Li, X., et al. Fatigue behavior of oilwell cement under cyclic loading. *Cement and Concrete Research*, 2017, Vol. 100, pp. 1–10.

5. Kumar, S., et al. Effect of temperature on mechanical properties of cement sheath. *Journal of Petroleum Technology*, 2016, Vol. 68, No. 4, pp. 78–85.

6. Said, S., et al. Cement sheath defects and their impact on zonal isolation. *SPE Drilling & Completion*, 2020, Vol. 35, No. 2, pp. 156–167.

7. Wang, H., et al. Cement–steel bond degradation under cyclic loading. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, Vol. 196, 107-114.

8. Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., Zimmerman, R. Fundamentals of Rock Mechanics. 4th ed., Wiley-Blackwell, 2007.

9. Zhu, Y., et al. Thermo-mechanical coupling in cement sheath during hydraulic fracturing. *Applied Thermal Engineering*, 2022, Vol. 206, 118-130.

10. Li, P., et al. Influence of bonding conditions on cement sheath integrity. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, Vol. 184, 106-115.

11. Zhang, Y., et al. Hydraulic fracturing pressure transient and its impact on well integrity. *SPE Journal*, 2019, Vol. 24, No. 1, pp. 203–215.

12. Ahmed, M., et al. Microstructural analysis of cement sheath degradation. *Cement and Concrete Composites*, 2018, Vol. 89, pp. 1–12.

13.Zhao, J., et al. Chemical degradation of oilwell cement in CO_2 and acidic environments. *Cement and Concrete Research*, 2016, Vol. 87, pp. 33–45.

14. Tian, Y., et al. Polymer-modified cement for improved flexibility in wellbore applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, Vol. 199, 108-118.

15. Ross, T., et al. Probabilistic risk assessment of cement sheath failure using Monte Carlo simulation. *SPE Drilling & Completion*, 2020, Vol. 35, No. 3, pp. 236–246.

16. Sun, W., et al. Fatigue and damage modeling of cement sheath under multi-stage hydraulic fracturing. *International Journal of Fatigue*, 2022, Vol. 156, 106-117.

REFERENCES

1. Нуров М.А., Гусманова А.Г. Анализ причин обводнения скважин и обоснование методов интенсификации добычи нефти. Yessenov Science Journal, 2025, № 4 (53), с. —. DOI: 10.56525/3fdf7259.

2. Zhang, L., et al. Stress distribution in cement sheath of casing during hydraulic fracturing. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, Vol. 165, pp. 123–134.

3. Shhang, J., et al. Finite element modeling of cement sheath integrity under hydraulic fracturing. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, Vol. 118, pp. 102–113.

4. Li, H., et al. Fatigue behavior of oilshhell cement under cyclic loading. Cement and Concrete Research, 2017, Vol. 100, pp. 1–10.

5. Kumar, S., et al. Effect of temperature on mechanical properties of cement sheath. Journal of Petroleum Technology, 2016, Vol. 68, No. 4, pp. 78–85.

6. Said, S., et al. Cement sheath defects and their impact on zonal isolation. SPE Drilling & Completion, 2020, Vol. 35, No. 2, pp. 156–167.

7. Shhang, H., et al. Cement–steel bond degradation under cyclic loading. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, Vol. 196, 107-114.

8. Jaeger, J.C., Cook, N.G. Shh., Zimmerman, R. Fundamentals of Rock Mechanics. 4th ed., Shhiley-Blackshhell, 2007.

9. Zhu, Y., et al. Thermo-mechanical coupling in cement sheath during hydraulic fracturing. Applied Thermal Engineering, 2022, Vol. 206, 118-130.

10.Li, P., et al. Influence of bonding conditions on cement sheath integrity. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, Vol. 184, 106-115.

11. Zhang, Y., et al. Hydraulic fracturing pressure transient and its impact on shhell integrity. SPE Journal, 2019, Vol. 24, No. 1, pp. 203–215.

12. Ahmed, M., et al. Microstructural analysis of cement sheath degradation. Cement and Concrete Composites, 2018, Vol. 89, pp. 1–12.

13.Zhao, J., et al. Chemical degradation of oilshhell cement in CO_2 and acidic environments. Cement and Concrete Research, 2016, Vol. 87, pp. 33–45.

14.Tian, Y., et al. Polymer-modified cement for improved flehibility in shhellbore applications. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, Vol. 199, 108-118.

15.Ross, T., et al. Probabilistic risk assessment of cement sheath failure using Monte Carlo simulation. SPE Drilling & Completion, 2020, Vol. 35, No. 3, pp. 236–246.

16. Sun, Shh., et al. Fatigue and damage modeling of cement sheath under multi-stage hydraulic fracturing. International Journal of Fatigue, 2022, Vol. 156, 106-117.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КОЛЬЦА ПРИ ГИДРОРАЗРЫВЕ ПЛАСТА

Мурзагалиева А.А.*[1], Садуакасов Д.С[1]., Абдыгалиева А.К[2]., Ержанова Ж.Т[2]., Тажибаев Д.К.[3]

[1] Университет Есенова, г.Актау, Казахстан

[2]Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана, Уральск, Казахстан

[3]Институт геомеханики и освоения недр Национальной академии наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызская Республика

e-mail:Murzagalievaalma6@gmail.com, danabek.saduakassov@yu.edu.kz, Ainagul_132!@mail.ru, Nazim2008@mail.ru, daniar.tazhibaev@kstu.kg

Аннотация. В статье представлен систематизированный обзор современных подходов к оценке напряжённо-деформированного состояния цементного кольца при проведении гидроразрыва пласта (Гидравлический разрыв пласта). Рассмотрены аналитические модели многослойной цилиндрической системы «обсадная колонна–цемент–порода», численные расчёты методом конечных элементов, а также экспериментальные исследования механических свойств цементного камня, включая его прочность на растяжение, модуль упругости и чувствительность к температурным воздействиям. Выделены ключевые факторы, влияющие на устойчивость цементного кольца: режимы гидравлического разрыва пласта, циклическое нагружение, температурные колебания, качество адгезии цемента к обсадной колонне и породе, а также наличие дефектов (неполный контакт, пористость, микротрещины и пустоты). Показано, что при росте внутреннего давления максимальные растягивающие окружные напряжения возникают у внутренней поверхности цементного кольца, что повышает вероятность трещинообразования и образования каналов миграции.

В работе подчёркивается, что повторные циклы давления и температурных изменений способствуют накоплению микроповреждений, снижению прочности на растяжение и ускорению деградации структуры цемента, что критически важно для многостадийного гидравлического разрыва пласта. Предложен комплексный подход к оценке риска разрушения цементного кольца, объединяющий аналитические, численные и статистические методы, включая анализ чувствительности и вероятностную оценку. Полученные выводы могут быть использованы при проектировании цементирования, выборе цементных составов и планировании режимов гидравлического разрыва пласта для повышения надёжности скважин и предотвращения межпластовых перетоков.

Ключевые слова: гидравлический разрыв пласта; цементное кольцо; напряженно деформированное состояние; многоступенчатый ГРП; метод конечных элементов; циклические нагрузки; термомеханические эффекты; адгезия цемента.

IMODERN APPROACHES TO ASSESSING THE STRESS-STRAIN STATE OF A CEMENT RING DURING HYDRAULIC FRACTURING

Murzagaliyeva A.A.*[1], Saduakassov D.S.[1], Abdugalieva A.K.[2], Yerzhanova Zh.T.[2], Tazhibaev D.K.[3]

[1]University Yessenov, Aktau, Kazakhstan

[2]NJSC "West Kazakhstan Agrarian and Technical University named after Zhangir khan", Uralsk, Kazakhstan

[3]Institute of Geomechanics and Subsoil Development, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic

e-mail:Murzagalievaalma6@gmail.com, danabek.saduakassov@yu.edu.kz, Ainagul_132!@mail.ru, Nazim2008@mail.ru, daniar.tazhibaev@kstu.kg

Abstract. The article presents a systematized review of modern approaches to assessing the stress-strain state of the cement ring during hydraulic fracturing (HF). It considers analytical models of the multi-layer cylindrical system "casing-cement-rock", numerical calculations using the finite element method, and experimental studies of the mechanical properties of the cement stone, including its tensile strength, modulus of elasticity, and sensitivity to temperature effects. The key factors affecting the stability of the cement layer have been identified: hydraulic fracturing modes, cyclic loading, temperature fluctuations, the quality of cement adhesion to the casing and rock, and the presence of defects (incomplete contact, porosity, microcracks, and voids). It has been shown that as the internal pressure increases, the maximum tensile circumferential stresses occur at the inner surface of the cement ring, which increases the likelihood of cracking and the formation of migration channels.The paper emphasizes that repeated cycles of pressure and temperature changes contribute to the accumulation of microdamage, a decrease in tensile strength, and an acceleration of cement structure degradation, which is critical for multi-stage hydraulic fracturing. A comprehensive approach to assessing the risk of cement ring failure is proposed, combining analytical, numerical, and statistical methods, including sensitivity analysis and probabilistic assessment. The findings can be used in cementing design, cement composition selection, and hydraulic fracturing regime planning to enhance well reliability and prevent inter-formation flow.

Keywords: hydraulic fracturing; cement ring; stress-strain state; multi-stage hydraulic fracturing; finite element method; cyclic loads; thermomechanical effects; cement adhesion.