

МРНТИ 67.09.33

<https://doi.org/10.62724/202620702>

**Джумабаева Камар Муратовна\*<sup>1</sup>**

PhD докторанты,

Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті,  
Орал, Қазақстан, [dzhumabayeva@inbox.ru](mailto:dzhumabayeva@inbox.ru), ORCID ID: 0000-0001-7633-4064

**Нариков Канат Амангельдиевич<sup>2</sup>**

техника ғылымдарының кандидаты,

Батыс Қазақстан инновациялық-технологиялық университеті,  
Орал, Қазақстан, [knarik1969@mail.ru](mailto:knarik1969@mail.ru), ORCID ID: 0000-0001-6459-140X

**Ідірісов Бексұлтан Лепесұлы<sup>3</sup>**

техника ғылымдарының магистрі,

Батыс Қазақстан инновациялық-технологиялық университеті,  
Орал, Қазақстан, [beksultan.idirisov@mail.ru](mailto:beksultan.idirisov@mail.ru), ORCID ID: 0000-0002-3586-7128

## **ТӨМЕН КӨМІРТЕКТИ ГЕОПОЛИМЕРЛІ БЕТОНДАРДЫ ӘЗІРЛЕУДІҢ ҒЫЛЫМИ АЛҒЫШАРТТАРЫ**

**Аңдатпа.** Мақалада құрылыс индустриясында қолданылатын геополимерлі және клинкерсіз тұтқыр материалдардың қазіргі даму бағыттары қарастырылған. Негізгі назар металлургиялық және энергетикалық өндірістерден шығатын күл, қож, микрокремнезем және кальциденген каолин сияқты техногендік шикізаттарды тиімді пайдалану мүмкіндіктеріне аударылған. Геополимер түзілуінің физика-химиялық ерекшеліктері, сілтілік активаторлардың құрамы мен модулінің әсері, сондай-ақ қатаю режимдерінің материалдың құрылымдық қалыптасуы мен механикалық қасиеттеріне ықпалы талданған. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, оңтайлы технологиялық параметрлерді таңдау арқылы жоғары беріктікке, су және аязға төзімділікке ие композиттер алуға болады. Сонымен қатар, экологиялық аспектілер, көмірқышқыл газының шығарылуын азайту және өндірістік қалдықтарды қайта өңдеу мәселелері қарастырылған. Қазақстан аумағындағы күл-қож ресурстарының мол қоры бұл бағыттың ғылыми және өндірістік тұрғыдан перспективалы екенін дәлелдейді. Геополимерлі байланыстырғыштар дәстүрлі портландцементке экологиялық және энергия үнемдеуші балама ретінде маңызды орын алады және тұрақты құрылыс материалдарын дамытуға ықпал етеді.

**Кілт сөздер.** тұтқыр материалдар, геополимер, күл-қож, шлак, экология, беріктік.

**Джумабаева Камар Муратовна\*<sup>1</sup>**

Докторант PhD,

Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана,  
Уральск, Казахстан, [dzhumabayeva@inbox.ru](mailto:dzhumabayeva@inbox.ru), ORCID ID: 0000-0001-7633-4064

**Нариков Канат Амангельдиевич<sup>2</sup>**

кандидат технических наук,

Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет,  
Уральск, Казахстан, [knarik1969@mail.ru](mailto:knarik1969@mail.ru), ORCID ID: 0000-0001-6459-140X

**Идирисов Бексултан Лепесович<sup>3</sup>**

магистр технических наук,

Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет,  
Уральск, Казахстан, [beksultan.idirisov@mail.ru](mailto:beksultan.idirisov@mail.ru), ORCID ID: 0000-0002-3586-7128

## НАУЧНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗРАБОТКИ НИЗКОУГЛЕРОДНЫХ ГЕОПОЛИМЕРНЫХ БЕТОНОВ

**Аннотация.** В статье рассмотрены современные направления развития геополимерных и безklinkерных вяжущих материалов, применяемых в строительной индустрии. Основное внимание уделено возможностям эффективного использования техногенного сырья, такого как зола, шлак, микрокремнезем и кальцинированный каолин, образующихся в металлургической и энергетической промышленности. Проанализированы физико-химические особенности формирования геополимеров, влияние состава и модуля щелочных активаторов, а также воздействие режимов твердения на структурообразование и механические свойства материалов. Результаты исследований показывают, что при оптимальном выборе технологических параметров можно получить композиты с высокой прочностью, водо- и морозостойкостью. Также рассмотрены экологические аспекты, включая снижение выбросов CO<sub>2</sub> и переработку промышленных отходов. Подчеркивается, что значительные запасы золошлаковых материалов в Казахстане делают данное направление перспективным с научной и производственной точек зрения. Геополимерные вяжущие рассматриваются как экологически и энергосберегающая альтернатива традиционному портландцементу, способствующая развитию устойчивых строительных материалов.

**Ключевые слова.** вяжущие материалы, геополимер, золошлаковые материалы, шлак, экология, прочность.

**Dzhumabaeva Kamar Muratovna<sup>\*1</sup>**

PhD doctoral student,

Khan West Kazakhstan Agrarian and Technical University, Uralsk, Kazakhstan,  
[dzhumabayeva@inbox.ru](mailto:dzhumabayeva@inbox.ru), ORCID ID: 0000-0001-7633-4064

**Narikov Kanat Amangeldievich<sup>2</sup>**

Candidate of Technical Sciences,

West Kazakhstan Innovation and Technological University,  
Uralsk, Kazakhstan, [knarik1969@mail.ru](mailto:knarik1969@mail.ru), ORCID ID: 0000-0001-6459-140X

**Idirisov Beksultan Lepsuly<sup>3</sup>**

Master of Technical Sciences,

West Kazakhstan Innovative and Technological University,  
Uralsk, Kazakhstan, [beksultan.idirisov@mail.ru](mailto:beksultan.idirisov@mail.ru), ORCID ID: 0000-0002-3586-7128

## SCIENTIFIC BASIS FOR THE DEVELOPMENT OF LOW-CARBON GEOPOLYMER CONCRETES

**Abstract.** The article examines current trends in the development of geopolymer and non-clinker binder materials used in the construction industry. Special attention is given to the effective utilization of industrial by-products such as fly ash, slag, microsilica, and calcined

kaolin generated in the metallurgical and energy sectors. The physicochemical characteristics of geopolymer formation, the influence of the composition and modulus of alkaline activators, as well as the effect of curing regimes on structure formation and mechanical properties of the materials are analyzed. The research results show that, with optimal selection of technological parameters, composites with high strength, water resistance, and frost resistance can be obtained. Environmental aspects are also considered, including the reduction of CO<sub>2</sub> emissions and recycling of industrial waste. It is emphasized that the significant reserves of ash and slag materials in Kazakhstan make this direction promising from both scientific and industrial perspectives. Geopolymer binders are regarded as an environmentally friendly and energy-efficient alternative to traditional Portland cement, contributing to the development of sustainable construction materials.

**Key words.** binder materials, geopolymer, ash-slag materials, slag, ecology, strength.

**Кіріспе.** Құрылыс материалдары өндірісінде тұтқыр заттар маңызды рөлдердің бірін атқарады. Олар құрылыс ерітінділері, бетон және жасанды тас материалдарын дайындауда байланыстырғыш компонент ретінде пайдаланылады. Тұтқыр материалдар негізінен органикалық немесе минералдық текті ұсақ дисперсті заттардан тұрады. Су қосылған кезде олар пластикалық күйге ауысып, белгілі бір уақыт өткеннен кейін қатайып, берік құрылым түзеді. Осы процестің нәтижесінде толтырғыш бөлшектері өзара байланысып, тұтас материал қалыптасады [1].

Тұтқыр заттар шығу тегіне байланысты минералдық және органикалық болып жіктеледі. Құрылыс саласында кеңінен қолданылатын минералдық тұтқырлардың ішінде портландцемент болып табылады. Оның технологиялық тиімділігі және жоғары беріктігі, әртүрлі жағдайларда қолдану мүмкіндігі портландцемент материалының әлемдік құрылыс тәжірибесінде кең таралуына ықпал етті.

Цемент өндіру процесі өндіріс барысында атмосфераға көп көлемде көмірқышқыл газы мен шаң-тозаң бөлуі себепті қоршаған ортаға айтарлықтай әсер етеді. Осыған байланысты цементтен толық бас тарту мүмкін болмағанымен, оның үлесін азайту мақсатында экологиялық тұрғыдан анағұрлым қолайлы клинкерсіз тұтқыр материалдарды пайдалану мәселесі маңызды болып отыр. Мұндай материалдарға әк, гипс және олардың негізінде алынатын композициялық байланыстырғыштар жатады.

Р. Фере [2] еңбектерінде қож негізіндегі байланыстырғыш материалдарды алу мүмкіндіктері мен олардың қасиеттерін зерттеу бағытындағы алғашқы ғылыми жұмыстар көрініс тапқан. Аталған зерттеулерде байланыстырғыш материалдарды тиімді пайдалану мақсатында металлургиялық қождарды белсендіру үшін сілтілі металл тұздарын және аз мөлшердегі арнайы қоспаларды пайдалану тәсілдері қарастырылған. Ғалымдар жүргізген тәжірибелерде натрий хлориді, әртүрлі сульфаттар мен карбонаттар, каустикалық сода және сұйық шыны сияқты активаторлар қолданылған. Әкпен бірге пайдаланылған жағдайда алынған материалдардың су әсеріне төзімділігі жоғарылайтыны зерттеу нәтижелері бойынша анықталған. Сонымен қатар, портландцемент құрамына шамамен 1,5 %-ға дейін натрий және калий нитриттерін, сұйық шыны енгізу арқылы олардың пластификациялаушы әсері мен төмен температура жағдайындағы тұрақтылығы бағаланған [3].

Қазақстанда геополимерлі байланыстырғыштарды өндіруге керекті техногендік және минералдық шикізат қорлары жеткілікті. Осы техногендік қалдықтардың ішінде маңызды орын алатын екінші реттік материалдардың бірі – жылу электр станцияларында түзілетін күл-қож қалдықтары. Бұл қалдықтар электр энергиясын өндіру процесінің екінші реттік шикізат ретінде пайдалануға болатын жанама өнімі болып табылады.

Қазақстандық қалдық күлдердің көп бөлігі салыстырмалы түрде төмен реакциялық белсенділікпен сипатталады. Сондықтан оларға қосымша белсендіргіш қоспаларды енгізу арқылы қолдану қажет. Күл құрамындағы кремний диоксиді ( $\text{SiO}_2$ ), темір оксиді ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), алюминий оксиді ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) және кальций оксиді ( $\text{CaO}$ ) сияқты негізгі компоненттердің мөлшері геополимерлену реакциясының жылдамдылығына және алынатын материалдың қасиеттеріне тікелей ықпал етеді [4].

Гранулданған домна шлагы металлургия өнеркәсібінде түзілетін жанама өнімдердің бірі болып табылады. Оның құрамындағы аморфты кальций-силикатты қосылыстар геополимерлік жүйелердің белсенділігін арттырып, әсіресе күл негізіндегі байланыстырғыштардың ерте жастағы беріктік көрсеткіштерін жақсартуға ықпал етеді [4].

Силика түтіні феррокорытпа өндірісінен шығатын жоғары дисперсті техногендік өнім болып саналады. Оның болшектерінің орташа мөлшері шамамен 0,1 мкм құрайды. Өте ұсақ құрылымының арқасында силика түтіні геополимер матрицасының тығыздалуына әсер етіп, кеуектілікті және су сіңіру қабілетін төмендетеді [5].

Геополимерлі байланыстырғыштарды синтездеуге Қазақстандағы бірқатар өндірістік қалдықтар перспективалы шикізат көзі болып табылады. Олардың қатарына Жезқазған және Теміртау металлургиялық кәсіпорындарының шлактары, Павлодар жылу электр станцияларының күлдері, сондай-ақ «Тәу-Кен Темір» ЖШС өндірісінен алынатын силика түтіні жатады. Геополимерлік композицияларды өндіруде реакциялық қабілеті жоғары кремний диоксиді маңызды болып табылады. Бұл материалдардың құрамында кремний диоксиді дәуір мөлшері кездесетіндіктен тиімді пайдалануға болады [5].

Zhanbolat Artyk және әріптестері жүргізген зерттеулерде төмен реакциялық белсенділігі бар күл мен гранулданған домна қожы негізінде гибриді талшықтармен күшейтілген композициялық материалдар әзірлеген. Зерттеу нәтижелері бойынша алынған үлгілердің жылу өткізгіштік коэффициенті 0,25 Вт/мК мәнінен төмен, ал қысу кезіндегі беріктігі 20 МПа-дан жоғары екендігі анықталған [4].

Ержан Күлдеевтің жетекшілігімен жүргізілген зерттеулерде өндірістік қалдықтардың химиялық және минералдық құрамы егжей-тегжейлі талданған. Атап айтқанда, құрамындағы кремний диоксиді мен алюминий оксидінің жоғары мөлшері, сондай-ақ бөлшектердің морфологиялық ерекшеліктері олардың геополимерлік байланыстырғыштар өндірісінде тиімді қолданылу мүмкіндігін дәлелдеген [5].

Түзілетін қалдықтардың басым бөлігі арнайы күл-қож сақтау алаңдарында, тұндырғыш полигондарда және гидротехникалық қоймаларда орналастырылады. Алайда олардың ұзақ уақыт бойы жиналуы топыраққа, су ресурстарына және атмосфералық ортаға теріс әсерін тигізеді. Соның салдарынан экологиялық мәселелердің туындауына себеп болады.

Сол себепті күл-қож қалдықтарын қайта өңдеу және оларды шаруашылық айналымға енгізу өзекті міндеттердің бірі болып табылады. Мұндай тәсіл экологиялық жүктемені төмендетеді. Сонымен қатар екінші реттік шикізат ресурстарын ұтымды пайдалануға және өндірістің экономикалық тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Қазіргі кезде күл-қож материалдары құрылыс саласында кеңінен зерттелуде. Яғни атап айтатын болсақ, геополимерлі байланыстырғыштарды, сондай-ақ портландцементтің үлесін азайтатын композициялық тұтқыр материалдарды өндіруде тиімді шикізат ретінде қарастырылады.

Сонымен қатар, күл-қож негізіндегі материалдар кеуекті жеңіл толтырғыштар өндіруде, автомобиль жолдарының құрылысында, сондай-ақ әртүрлі қабырғалық және қоршау панельдерін дайындауда кеңінен қолданылады [6].

Шетелдік тәжірибе күл-кож қалдықтарын қайта өңдеудің жоғары тиімділігін көрсетеді. Мысалы, Қытай мен бірқатар Еуропа мемлекеттерінде мұндай қалдықтардың шамамен 60–80 %-ы екінші реттік шикізат ретінде пайдаланылып, негізінен құрылыс және жол инфрақұрылымы салаларына бағытталады. Қазақстанда бұл көрсеткіш айтарлықтай төмен болып, қазіргі уақытта 15–20 % деңгейінде қалып отыр [6].

Осыған орай, күл-кож қалдықтарын тиімді игеру және оларды қайта пайдалану көлемін ұлғайту мақсатында бірнеше басым бағыттарды жетілдіру қажет. Олардың қатарына геополимерлік байланыстырғыштарды өнеркәсіптік деңгейде өндіру технологияларын енгізу, қолданыстағы нормативтік-құқықтық құжаттарды жетілдіру, экологиялық талаптарды күшейту, сондай-ақ қалдықтарды қайта өңдеу саласын ынталандыратын мемлекеттік бағдарламаларды іске асыру жатады.

2022 жылы Mukhametkaliyev және оның әріптестері жүргізген зерттеулерде гранулданған домна қожы, күл-кож және реактивті кальциденген каолин негізіндегі геополимерлік жүйелердің қалыптасуына компоненттерді араластыру кезектілігінің әсері қарастырылған. Зерттеу нәтижелері әрбір шикізат компонентін сілтілік активатор ерітіндісімен алдын ала жеке өңдеу материал құрылымының тығыздығын арттырып, оның механикалық беріктігін жақсартатынын көрсетті. Авторлар бұл әсерді бастапқы компоненттердің диссоциация және кейінгі поликонденсация процестерінің жүру жылдамдықтарының әртүрлі болуымен байланыстырған [7].

Геополимер материалдарының қасиеттеріне сілтілік активатордың құрамы мен модулі де маңызды ықпал етеді. X. Gao, Q. L. Yu және H. J. H. Brouwers жүргізген зерттеулерде активатор модулі мен шлак:күл-кож қатынасының геополимерлену механизмдеріне және түзілетін N-A-S-H гелінің құрылымына тікелей әсер ететіні көрсетілген. Авторлардың мәліметтері бойынша силикатты компонент мөлшерінің артуымен сипатталатын жоғары модульді активаторларды пайдалану гель құрылымының тығыздалуына және қысу кезіндегі беріктіктің жоғарылауына мүмкіндік береді [8].

**Зерттеу материалдары мен әдістері.** Геополимерлі байланыстырғыштардың қасиеттері мен қалыптасу механизмдерін терең зерттеу мақсатында заманауи физика-химиялық талдау әдістерінің кең спектрі қолданылады. Бұл әдістер материалдардың микроқұрылымын, фазалық және минералдық құрамын, механикалық қасиеттерін, сондай-ақ олардың экологиялық қауіпсіздік көрсеткіштерін жан-жақты бағалауға мүмкіндік береді.

Қазақстандық ғалымдар Жұмаділов және оның әріптестері [9] Екібастұз көмірінің күлін зерттей отырып, оның минералогиялық құрамын бағалап, геополимерлік байланыстырғыштар алу үшін қолдану мүмкіндігін қарастырған.

Геополимер материалдарының пайдалану қасиеттері көбінесе олардың микроқұрылымдық ерекшеліктеріне тәуелді болады. Әсіресе беріктік пен ұзақ мерзімді қызмет ету қабілеті құрылымның тығыздығы мен біртектілігіне байланысты қалыптасады.

Күлдеев бастаған қазақстандық зерттеушілер тобы [10] күл мен металлургиялық кож негізінде алынған геополимер материалдарының морфологиялық сипаттамаларын салыстырмалы түрде талдап, олардың құрылымдық ұйымдасуындағы айырмашылықтарды SEM талдауы арқылы көрсеткен.

Геополимерлі байланыстырғыштардың сапалық көрсеткіштерін бағалауда олардың физика-механикалық қасиеттерін анықтайтын сынақтардың маңызы ерекше. Мұндай зерттеулер материалдың нақты пайдалану жағдайларындағы мінез-құлқын сипаттауға мүмкіндік береді.

Қазақстандық ғалымдар Абдурахманова және әріптестері [11] күл негізіндегі

геополимерлік материалдардың экологиялық қауіпсіздігін зерттей отырып, олардың экожүйеге теріс әсерін төмендету әлеуеті жоғары екенін көрсеткен.

Геополимер материалдарының экологиялық тиімділігін жан-жақты бағалау үшін өмірлік циклді талдау әдісі кеңінен қолданылады. Бұл тәсіл материалдың пайда болуынан бастап, шикізатты дайындау, өндіру, пайдалану және соңғы кезеңдегі кәдеге жаратуға дейінгі барлық кезеңдерін қамтиды [12].

Геополимерлі тұтқыр жүйелерді синтездеу барысында негізгі шикізат ретінде құрамында кремний мен алюминий элементтерінің жоғары үлесі бар минералдық материалдар пайдаланылады. Мұндай шикізат көздері табиғи, техногендік және жасанды жолмен алынған топтарға бөлінеді. Олардың қатарына жылу энергетикасы мен металлургия өндірістерінің қалдықтары (ұшпа күл, домна және феррокорытпа шлактары), табиғи алюмосиликатты минералдар (каолин, бентонитті саз, пемза), сондай-ақ технологиялық оңдеу нәтижесінде алынатын микрокремнезем мен метакаолин жатады.

1. Ұшпа күл. Көмірді жағу процесі нәтижесінде жылу электр станцияларында түзілетін бұл өнім өндірістік қалдықтардың ең кең таралған түрлерінің бірі болып саналады. Оның жоғары таралуы мен химиялық құрамының ерекшелігі оны геополимерлі байланыстырғыштар өндірісінде негізгі шикізат ретінде қолдануға мүмкіндік береді. Khan және оның ғылыми тобы [13] жасанды интеллект негізіндегі әдістерді қолдана отырып, күл негізіндегі геополимерлі бетонның қысу беріктігін болжауға арналған модель әзірлеген.

2. Металлургиялық шлактар. Домналық және феррокорытпа өндірісінің жанама өнімдері болып табылатын бұл материалдар геополимерлі жүйелер үшін маңызды шикізат көзі ретінде қарастырылады. Bernal және әріптестері [14] шлак пен метакаолин негізіндегі жүйелердің құрылымдық өзгерістерін рентгендік дифракция әдісі арқылы зерттеп, олардың фазалық трансформация ерекшеліктерін сипаттаған. Ал қазақстандық зерттеушілер Күлдеев және серіктестері [15] Павлодар ЖЭС ұшпа күлі мен «Тау-Кен Темір» кәсіпорнының феррокорытпа шлактарының химиялық құрамы мен құрылымдық қасиеттерін салыстырмалы түрде талдаған.

3. Метакаолин. Каолинді сазды 650–800 °C аралығында термиялық өндеу (кальцинация) арқылы алынатын метакаолин жоғары реакциялық қабілетке ие алюмосиликатты материалдардың бірі болып табылады және геополимер синтезінде кеңінен қолданылады.

4. Бентонитті саз. Бұл табиғи алюмосиликатты материал геополимерлік жүйелерде қосымша реакциялық компонент ретінде қолданылады және алынатын құрылымның тығыздалуына ықпал етеді. Қазақстан аумағында, әсіресе Оңтүстік Қазақстан және Ақтөбе өңірлерінде бентонит кен орындары кең таралған. Қазіргі уақытта осы шикізатты геополимер өндірісінде пайдалану мүмкіндігін зерттеу бағытында ғылыми жұмыстар жүргізілуде [16].

5. Микрокремнезем. Ферросилиций өндірісі кезінде түзілетін бұл техногендік өнім өте ұсақ бөлшекті және жоғары дисперсті құрылымымен ерекшеленеді. Zhang және әріптестері [17] микрокремнезем енгізілген геополимерлі көбікті бетондардың физика-механикалық қасиеттері жақсарып, жылуоқшаулағыштық қабілетінің едәуір артатынын тәжірибелік түрде дәлелдеген.

6. Қосымша компоненттер мен белсендіруші агенттер.

- Сілтілік активаторлар ретінде натрий гидроксиді (NaOH), калий гидроксиді (KOH) және натрий силикаты ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ерітінділері геополимерлену

реакциясын бастау және жеделдету үшін негізгі химиялық орта ретінде пайдаланылады [18].

- Минералдық қоспалар (табиғи пемза, диатомит, вулкандық күл) жүйенің реакциялық белсенділігін арттырып, алынатын материалдың құрылымдық тұрақтылығын жақсартуға әсер етеді [19].

- Талшықты арматуралар (базальт, шыны және полипропилен талшықтары) геополимерлердің созылу және иілу кезіндегі беріктігін арттырып, жарықшақтардың пайда болуын тежейді [20].

**Нәтижелер және оларды талқылау.** Зерттеулер нәтижелері құрылыс индустриясында дәстүрлі портландцементтің орнына клинкерсіз байланыстырғыштарды қолдану экологиялық тұрғыдан да, экономикалық тұрғыдан да тиімді бағыт екенін көрсетеді. Әсіресе металлургия және энергетика салаларынан шығатын қождар мен күл сияқты техногендік қалдықтар жоғары реакциялық белсенділікке ие болғандықтан, оларды экологиялық қауіпсіз геополимерлі тұтқыр материалдарды өндіруде перспективалы шикізат ретінде пайдалануға болады.

Геополимер түзілу процесінің тиімділігі бірқатар негізгі факторларға тәуелді. Олардың ішінде алюмосиликатты бастапқы шикізаттың табиғаты, сілтілік активатордың құрамы мен модулі (NaOH пен  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  арақатынасының шамамен 1,5–2,0 болуы), сондай-ақ қатаю температурасы мен ұзақтығы маңызды рөл атқарады. Бұл параметрлердің оңтайлы мәндері материалдың ішкі құрылымының тығыздалуына ықпал етіп, N-A-S-H және C-A-S-H типті гельдік фазалардың түзілуін күшейтеді.

Қазақстанда жүргізілген зерттеулер Павлодар жылу электр станциясының күлін және «Тау-Кеп Теміг» кәсіпорнының металлургиялық қождарын пайдалану арқылы қысу беріктігі шамамен 20–40 МПа аралығында болатын, сондай-ақ суға және аязға төзімділігі жоғары геополимерлі материалдарды алуға болатынын дәлелдеген. Қоспа құрамына кальциденген каолин мен микрокремнеземді енгізу материалдың микроструктурасын тығыздап, оның ұзақ мерзімді беріктік сипаттамаларын жақсартатыны анықталған.

Қатаю процесінің жүруіне температуралық және ылғалдық жағдайлар елеулі әсер етеді. Бу ортасы немесе көмірқышқыл газының қатысуы материалдың беріктігін арттырып, су әсеріне тұрақтылығын жоғарылатады. Дегенмен, қатаю температурасының шамадан тыс көтерілуі құрылым ішінде микрожарықтардың пайда болуына әкеліп, жалпы беріктікке кері ықпал етуі мүмкін.

Күл-қож сияқты өндірістік қалдықтарды құрылыс материалдары өндірісінде қолдану бастапқы шикізатты үнемдеуге, қалдық көлемін азайтуға және көмірқышқыл газының шығарылуын төмендетуге мүмкіндік береді. Жалпы алғанда, геополимерлі және қож негізіндегі байланыстырғыш жүйелер жоғары механикалық беріктікке ие болуымен қатар экологиялық тұрғыдан тиімді, сондықтан олар портландцементтің перспективалы баламасы ретінде қарастырылады.

**Қорытынды.** Құрылыс саласында тұтқыр материалдарды жетілдіру кезінде экологиялық тұрғыдан қауіпсіз әрі энергияны аз қажет ететін технологияларды енгізу қазіргі таңда аса маңызды бағыттардың бірі болып саналады. Дәстүрлі портландцемент өндірісінің энергия сыйымдылығының жоғары болуы және көмірқышқыл газының ( $\text{CO}_2$ ) едәуір мөлшерде бөлінуі баламалы байланыстырғыш жүйелерді іздеуді қажет етеді.

Осы тұрғыдан алғанда, металлургия және энергетика өнеркәсібінен шығатын күл, қож, микрокремнезем және каолин сияқты техногендік және табиғи шикізаттар геополимерлі тұтқыр материалдарды алуда тиімді ресурс ретінде қарастырылады. Сілтілік активтендіру үдерісін және қатаю шарттарын оңтайландыру нәтижесінде жоғары механикалық беріктікке ие, су мен аяз әсеріне төзімді экологиялық қауіпсіз

композиттерді алуға мүмкіндік туады.

Геополимерлі байланыстырғыштардың басты артықшылықтарының бірі – төмен энергия шығынымен өндірілуі, өндірістік қалдықтарды қайта өңдеу арқылы кәдеге жарату мүмкіндігі және қоршаған ортаға зиянының айтарлықтай төмен болуы. Қазақстан аумағында жинақталған күл-қож және металлургиялық қалдықтардың мол қоры бұл бағытты әрі ресурстық, әрі экологиялық тұрғыдан тиімді дамытуға қолайлы жағдай жасайды.

### ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Баженов Ю. М., Комар А. Г. Технология бетонных и железобетонных изделий. – М.: Стройиздат, 1984. – 672 с.
2. Feret R. Slags for the manufacture of cement // *Revue des Matériaux de Construction et de Travaux Publics*. – 1939. – P. 121–126.
3. Глуховский В. Д. Шлакощелочные цементы, бетоны и конструкции // Доклады и тезисы докладов III Всесоюзной научно-практической конференции. – Киев, 1989. – Т. 1. – 256 с.
4. Artyk Z., Kuan Y., Zhang D., Shon C. S., Ogwumeh C. M., Kim J. Development of engineered geopolymer composites containing low-activity fly ashes and ground granulated blast furnace slags with hybrid fibers // *Construction and Building Materials*. – 2024. – Vol. 422. – P. 1–12.
5. Kuldeyev E., Zhumadilova Z., Zhagifarov A., Tolegenova A., Kuttybay M., Alikhan A. Physicochemical properties of silica fume and fly ash from Tau-Ken Temir LLP and Pavlodar CHP for potential use in self-compacting concrete // *Technobius*. – 2025. – Vol. 5, No. 1. – P. 45–55. – DOI: [10.54355/tbus/5.1.2025.0076](https://doi.org/10.54355/tbus/5.1.2025.0076).
6. Saha, A. K., Sarker, P. K. Sustainable use of mine tailings and fly ash in geopolymers // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 226. – P. 579–590.
7. Mukhametkaliyev, T., Ali, M. H., Kutugin, V., Savinova, O., Vereschagin, V. Influence of mixing order on the synthesis of geopolymer concrete // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14, Issue 21. – P. 4501.
8. Palacios, M., Puertas, F. Reaction kinetics, gel character and strength of ambient temperature cured alkali activated slag–fly ash blends // *Construction and Building Materials*. – 2015. – Vol. 80. – P. 225–232. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.065>.
9. Жұмаділов, Ө. Ш., Абдурахманова, Г. К., Жақыпбекова, А. А. Ұшпа күл негізінде геополимерлі құрылыс материалдарын алу // *Қазақ ұлттық техникалық университетінің хабаршысы*. – 2021. – № 3. – Б. 45–52.
10. Күлдеев, Е., Жұмаділова, З. Геополимерлі материалдардағы минералдық қоспалардың әсері // *Technobius*. – 2025. – № 1. – Б. 15–22.
11. Абдурахманова, Г. К., Жақыпбекова, А. А. Геополимерлі байланыстырушы заттар технологиясының даму ерекшеліктері // *Қазақ ұлттық техникалық университетінің хабаршысы*. – 2021. – № 3. – Б. 53–59.
12. Ahmaruzzaman, M. A review on the utilization of fly ash // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2010. – Vol. 36. – P. 327–363.
13. Khan, M. A., et al. Geopolymer concrete using supplementary cementitious materials // *Advances in Civil Engineering*. – 2021. – Vol. 2021. – P. 1–14.
14. Bernal, S. A., Provis, J. L., Rose, V., Mejía de Gutierrez, R. Evolution of binder structure in sodium silicate-activated slag–metakaolin blends // *Cement and Concrete Composites*. – 2011. – Vol. 33, Issue 1. – P. 46–54. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.09.004>.
15. Kuldeyev, E., Zhumadilova, Z., Zhagifarov, A., et al. Mineral admixtures effect in

geopolymer systems // *Technobius*. – 2025. – № 1. – P. 23–31.

16. Алихан, А., Төлегенова, А. Геополимер бетондағы қоспалардың әсері // *Technobius*. – 2025. – № 2. – Б. 41–49.

17. Zhang, Z., Provis, J. L., Reid, A., Wang, H. Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction // *Construction and Building Materials*. – 2014. – Vol. 56. – P. 113–127. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.081>.

18. Provis, J. L., Palomo, A., Shi, C. Advances in alkali-activated materials // *Cement and Concrete Research*. – 2015. – Vol. 78. – P. 110–125.

19. Kong, D. L. Y., Sanjayan, J. G. Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures // *Cement and Concrete Composites*. – 2008. – Vol. 30, Issue 10. – P. 986–991.

20. Artyk, Z., Kuan, Y., Zhang, D., Shon, C. S., Kim, J. Compressive strength and durability of BOFS-based geopolymer mortar // *Construction and Building Materials*. – 2024. – Vol. 412. – P. 134129.

## REFERENCES

1. Bazhenov, Yu. M., Komar, A. G. Tehnologiya betonnyh i zhelezobetonnyh izdelij. [Technology of concrete and reinforced concrete products.]. – M.: Strojizdat, (1984): – 672 s. – (In Rus)

2. Feret, R. Slags for the manufacture of cement // *Revue des Matériaux de Construction et de Travaux Publics*. – 1939. – P. 121–126.

3. Gluhovskij, V. D. Shlakoshchelochnye cementy, betony i konstrukcii // *Doklady i tezisy dokladov III Vsesoyuznoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. [Slag-alkali cements, concretes and structures // Reports and abstracts of the III All-Union Scientific and Practical Conference.]. – Kiev, (1989): – T. 1. – 256 s. – (In Rus)

4. Artyk, Z., Kuan, Y., Zhang, D., Shon, C. S., Ogwumeh, C. M., Kim, J. Development of engineered geopolymer composites containing low-activity fly ashes and ground granulated blast furnace slags with hybrid fibers // *Construction and Building Materials*. – 2024. – Vol. 422. – P. 1–12.

5. Kuldeyev, E., Zhumadilova, Z., Zhagifarov, A., Tolegenova, A., Kuttybay, M., Alikhan, A. Physicochemical properties of silica fume and fly ash from Tau-Ken Temir LLP and Pavlodar CHP for potential use in self-compacting concrete // *Technobius*. – 2025. – Vol. 5, No. 1. – P. 45–55. <https://doi.org/10.54355/tbus/5.1.2025.0076>

6. Saha, A. K., Sarker, P. K. Sustainable use of mine tailings and fly ash in geopolymers // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 226. – P. 579–590.

7. Mukhametkaliyev, T., Ali, M. H., Kutugin, V., Savinova, O., Vereschagin, V. Influence of mixing order on the synthesis of geopolymer concrete // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14, Issue 21. – P. 4501.

8. Palacios, M., Puertas, F. Reaction kinetics, gel character and strength of ambient temperature cured alkali activated slag–fly ash blends // *Construction and Building Materials*. – 2015. – Vol. 80. – P. 225–232. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.065>

9. Zhumadilov, O. Sh., Abdurahmanova, G. K., Zhakypbekova, A. A. Ushpa kul negizinde geopolimerli qubylys materialdaryn alu // *Qazaq ulattyq tehnika universiteti habarshysy*. [Obtaining geopolymer building materials on the basis of fly ash // Bulletin of Kazakh National Technical University.]. – 2021. – № 3. – Б. 45–52. – (In Kaz)

10. Kuldeev, E., Zhumadilova, Z. Geopolimerli materialdardagy mineraldyq qospalardyn aseri // *Technobius*. [Effect of mineral admixtures in geopolymer materials.]. – 2025. – № 1. – Б. 15–22. – (In Kaz)

11. Abdurahmanova, G. K., Zhakypbekova, A. A. Geopolimerli bailanystyrushy zattar tehnologiyasynyn damu erekshelikteri // Qazaq ulttyq tehnika universiteti habarshysy. [Features of the development of geopolymer binders technology // Bulletin of Kazakh National Technical University.]. – 2021. – № 3. – B. 53–59. – (In Kaz)
12. Ahmaruzzaman, M. A review on the utilization of fly ash // Progress in Energy and Combustion Science. – 2010. – Vol. 36. – P. 327–363.
13. Khan, M. A., et al. Geopolymer concrete using supplementary cementitious materials // Advances in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 2021. – P. 1–14.
14. Bernal, S. A., Provis, J. L., Rose, V., Mejía de Gutierrez, R. Evolution of binder structure in sodium silicate-activated slag–metakaolin blends // Cement and Concrete Composites. – 2011. – Vol. 33, Issue 1. – P. 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.09.004>
15. Kuldeyev, E., Zhumadilova, Z., Zhagifarov, A., et al. Mineral admixtures effect in geopolymer systems // Technobius. – 2025. – № 1. – P. 23–31.
16. Alikhan, A., Tolegenova, A. Geopolimer betondagy qospalardyn aseri // Technobius. [The effect of concrete admixtures in geopolymer concrete.]. – 2025. – № 2. – B. 41–49. – (In Kaz)
17. Zhang, Z., Provis, J. L., Reid, A., Wang, H. Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction // Construction and Building Materials. – 2014. – Vol. 56. – P. 113–127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.081>
18. Provis, J. L., Palomo, A., Shi, C. Advances in alkali-activated materials // Cement and Concrete Research. – 2015. – Vol. 78. – P. 110–125.
19. Kong, D. L. Y., Sanjayan, J. G. Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures // Cement and Concrete Composites. – 2008. – Vol. 30, Issue 10. – P. 986–991.
20. Artyk, Z., Kuan, Y., Zhang, D., Shon, C. S., Kim, J. Compressive strength and durability of BOFS-based geopolymer mortar // Construction and Building Materials. – 2024. – Vol. 412. – P. 134129.