

FTAMP 67.09.33

Е.Б. Мажитов¹ – негізгі автор, ©
 Ж.С. Тулеугалиева², М.Ж. Рыскалиев³,
 С.М. Жарылғапов⁴, А.Б. Шингужиева⁵, Е.Г. Талаптанов⁶

 ^{1,3,5}PhD, ²Техн. ғылым. магистрі, ⁴PhD, қауымдас. профессор, ⁶Магистрант
 ORCID ¹<https://orcid.org/0000-0001-6155-4865> ²<https://orcid.org/0009-0008-1484-4585>
³<https://orcid.org/0000-0002-3361-2076> ⁴<https://orcid.org/0000-0002-3104-6568>
⁵<https://orcid.org/0000-0002-0097-6551> ⁶<https://orcid.org/0009-0009-4038-7020>
 ^{1,2,3,4,5,6}Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық
 университеті,
 Орал, Қазақстан
 ²zhansayatuleugaliyeva@mail.ru

<https://doi.org/10.55956/GIXK2666>

КАРБОНАТТЫ ТОЛТЫРҒЫШ НЕГІЗІНДЕГІ СУДЫ АЗ ТҰТЫНАТЫН ЦЕМЕНТ

Аңдатпа. Өнеркәсіптік цементтердегі клинкердің мөлшерін азайту қажеттілігі энергия шығындарын және көмірқышқыл газының шығарындыларын төмендетуге бағытталған. Бұл мақсатқа жету үшін құрамында алмастырушы минералды қоспалар мөлшері жоғары (30-80%) аралас байланыстырғыштарды кеңінен қолдану қажет. Оларды пайдалану тек қымбат клинкер үлесін азайтумен ғана шектелмей, бетондардың құрылыс-техникалық қасиеттерін (су өткізбейтіндігі, аязға төзімділігі, жарықшақтарға төзімділігі, коррозияға төзімділігі) жақсартуға да мүмкіндік береді. Жұмыста минералды қоспаларды тиімді пайдаланудың жолы ұсынылып, төмен су тұтынатын цементтер (ТСЦ) әзірленді. Бұл цементтерде клинкер үлесі барынша азайтылған, бірақ технологиялық, пайдалану-техникалық және экологиялық көрсеткіштері бойынша олар аралас байланыстырғыштардан ғана емес, сондай-ақ Еуропа, Азия және Америкадағы өндірушілер шығаратын барлық жалпы құрылыс портландцементтерінен де асып түседі. Жұмыста стандартты портландцемент негізінде және карбонатты толтырғышты минералдық компонент ретінде қолданған ТСЦ негізінде дайындалған цемент тасына және бетондарға жүргізілген физика-механикалық сынақтардың салыстырмалы нәтижелері келтірілген. Рентгенографиялық фазалық талдау әдісімен ЦЕМ I 42,5Н цемент тасындағы және «карбонатты» ТСЦ-50 микроструктурасындағы кристаллогидраттардың құрамына салыстырмалы баға берілді. Зерттеу нәтижесінде ТСЦ-50 құрамында ГКАК-3 және ГКАК-1 түріндегі кальций гидрокарбоалюминаттарының түзілетіні анықталды, олар ерте қарқынды қатуға және 28 тәуліктегі жоғары белсенділікке ықпал ететіндігі байқалды.

Тірек сөздер: клинкер мөлшері, көмірқышқыл газының эмиссиясы, төмен су тұтынатын цемент, аралас байланыстырғыштар, суперпластификатор.

 Мажитов, Е.Б. Карбонатты толтырғыш негізіндегі суды аз тұтынатын цемент [Мәтін] / Е.Б. Мажитов, Ж.С. Тулеугалиева, М.Ж. Рыскалиев, С.М. Жарылғапов, А.Б. Шингужиева, Е.Г. Талаптанов //Механика және технологиялар / Ғылыми журнал. – 2025. – №4(90). – Б.138-150. <https://doi.org/10.55956/GIXK2666>

Кіріспе. Көптеген дамыған елдерде ең сұранысқа ие құрылыс материалы – цементтік бетон өндірісі жыл сайын 10 млрд м³-ден астам тұтыну көлеміне жетіп, клинкер мөлшерін азайту, беріктікті және технологиялық қасиеттерді арттыру, сондай-ақ ірі тоннажды өнеркәсіптік қалдықтарды кеңінен пайдалану бағытымен дамып келеді [1-4]. Бұл үрдіс ең үздік қолжетімді технологиялар (ЕҰҚТ) мен тұрақты экологиялық даму тұжырымдамасына негізделген айналмалы экономиканың қағидаттарына сәйкес келеді [5-7].

Бетонның негізгі компоненті – портландцемент, оның өндірісі көмірқышқыл газының жоғары эмиссиясымен, жылу және электр энергиясының үлкен шығындарымен, сондай-ақ сарқылатын табиғи шикізатты (саз, әктас) көп тұтынумен сипатталады. Портландцемент өндірісінің (оның клинкерлік құрамдасының) жоғары энергия тұтынуы мен экологиялық жүктемесі цемент пен бетон үшін клинкер мөлшерін бағалау көрсеткішін енгізуге алып келді. Осыған байланысты қазіргі уақытта және болашақта әлемдік цемент өнеркәсібінің даму бағытын анықтайтын келесі факторлар ерекшеленеді:

1. СО₂ шығарындыларын азайту, оған қол жеткізіледі:

а) цементтегі клинкер үлесін (клинкер мөлшерін) азайту арқылы, оны әртүрлі әсер ететін минералды қоспалармен алмастыру кезінде ұнтақтау барысында;

б) клинкер өндіруге арналған шикізат қоспасындағы карбонаттардың үлесін төмендету арқылы.

2. Энергия шығындарын азайту келесі тәсілдер арқылы жүзеге асырылады:

а) клинкерді күйдіру кезінде пештердегі отын шығынын төмендету (жылуsыйымдылықты азайту);

б) шикізат қоспасын және, ең бастысы, цементті ұнтақтау кезінде электр энергиясын үнемдеу.

3. Клинкер өндірісінде техногендік және тұрмыстық қалдықтарды баламалы отын ретінде, ал цемент өндірісінде минералды қоспалар түрінде пайдалану.

Ең кеңінен қолданылатын, цемент зауыттарын айтарлықтай қайта жабдықтауды қажет етпейтін клинкер мөлшерін азайтудың әдісі – әртүрлі аралас цемент түрлерін алу үшін клинкерді т.н. алмастырушы қоспалармен (гидравликалық, пуццоландық, «инертті») бірге ұнтақтау болып табылады. Мұндай цементтердің қасиеттері еуропалық және ресейлік стандарттарда көрсетілген. Алайда, бұл цементтер энергия сыйымдылығы мен көміртегі ізін беріктік бірлігіне шаққанда тек аз мөлшерде төмендетеді, сонымен қатар суды көп қажет етеді және қоспасыз вяжущелермен салыстырғанда төмен белсенділікке ие.

Зерттеу деректері бойынша, өсіп келе жатқан энергия-экологиялық сын-қатерлерге жауап бере алатын жалғыз цемент түрі – төмен су тұтынатын цементтер (ТСЦ). Оларды портландцемент клинкерін минералды толтырғыштармен және суперпластификаторлармен бірге ұнтақтау арқылы алады. Бірқатар авторлардың [8-12] көпжылдық зерттеулері көрсеткендей, клинкер мөлшері 30-70% болатын ТСЦ технологиялық, пайдалану-техникалық және экологиялық көрсеткіштері бойынша әлемдік өндірушілер (Еуропа, Азия, Америка) шығаратын барлық жалпы құрылыс портландцементтерінен асып түседі.

ТСЦ артықшылықтары:

- пайдалану технологиясы бойынша портландцементке ұқсас, бетондар мен басқа материалдарда оңай қолданылады;
- арзан табиғи тау жыныстарын немесе ірі тоннажды өнеркәсіптік қалдықтарды 90%-ға дейін толтырғыш ретінде қолдануға мүмкіндік береді, бұл өндірістік цементтер деңгейінде вяжушелер маркасын алуға жағдай жасайды;
- экологиялық таза өндіріс технологиясына ие, өйткені қоршаған ортаға газ немесе шаң шығарындылары болмайды;
- карбонатты ТСЦ цемент зауыттарында аздаған технологиялық өзгерістермен өндіріле алады, егер негізгі шикізат ретінде әктас қолданылса;
- басқа ТСЦ түрлері өнеркәсіптік қалдықтардың ірі үйінділері жанындағы ұнтақтау қондырғыларында өндірілуі мүмкін;
- қолдану аясы бойынша ТСЦ жалпы құрылыс жұмыстарына арналған төмен клинкерлі вяжуше ретінде де, арнайы мақсаттар үшін де шығарылуы мүмкін.

Карбонатты толтырғыштармен (әктас, доломит, доломиттенген әктас және т.б.) дайындалған төмен су тұтынатын цементтер (ТСЦ) ерекше қызығушылық тудырады, өйткені олар Ресейде кең таралған және ең арзан шөгінді жыныстарға жатады. Сонымен қатар, олар кремнеземді толтырғыштарға қарағанда ұнтақтауға оңай, себебі беріктігі төмен және қаттылығы аз.

Карбонатты толтырғыштар цемент клинкерінің алюминатты фазасымен химиялық реакцияға түсе алады, нәтижесінде кальций гидрокарбоалюминаттары түзіледі (төмен температурада). Бұл процесс вяжуше бөлшектерінің гидратациясын жылдамдатып, цемент тасын қарқынды нығайтуға ықпал етеді.

ТСЦ технологиясына жақын жаңа тәсілдердің бірі – функционализация [13-15]. Бұл әдіс минералды компоненттерді механо- немесе механохимиялық активтендіруге, олардың тиімді араласуы мен гомогенизациясына негізделген. Функционализация негізінен ұнтақтау кезінде жүзеге асады және портландцементтің немесе толтырғыштың бетінде химиялық заттардың физикалық адсорбциясы немесе хемосорбциясы арқылы жүреді. Бұл заттар беттік керілісті төмендетіп, цемент ерітіндісін азрациялап, оның пластификациясын жақсартады [16,17].

Зерттеу мақсаты – қозғалғыш бетон қоспаларынан дайындалған ауыр бетондарда жалпы құрылыс портландцементі мен карбонатты ТСЦ-нің салыстырмалы тиімділігін бағалау, сондай-ақ рентгенографиялық фазалық талдау әдісімен осы вяжушелердің қатаюы кезінде түзілетін жаңа қосылыстар құрамын зерттеу.

Зерттеу шарттары мен әдістері. Байланыстырғыш ретінде МемСТ 31108 сәйкес «Аkkermann Цемент» ЖШҚ өндірген қоспасыз портландцемент ЦЕМ I 42,5Н пайдаланылды. Оның минералдық және химиялық құрамы 1 және 2-кестелерде көрсетілген.

Суперпластификатор ретінде модификацияланған поликарбоксилат эфирлері негізіндегі ST-1 химиялық қоспасы (ЕТС-Казань ЖШҚ) қолданылды. Бұл 94 %-дан кем емес белсенді затты қамтитын ақ ұнтақ түріндегі қоспа. Оның тығыздығы 400-580 г/л, ал су ерітіндісінің рН мәні $8 \pm 0,5$.

Кесте 1

Портландцементтің минералогиялық құрамы

Атауы	Минералды құрамы, %				
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	ппп
ЦЕМ I 42,5Н («Akkermann Цемент» ЖШС)	60 ± 2	16 ± 1	6,5 ± 1	12 ± 0	5 ± 2

Кесте 2

Портландцементтің химиялық құрамы

Атауы	Минералдар құрамы, %								
	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	CaO _{св}	Al ₂ O ₃	SO ₃	R ₂ O	ппп
ЦЕМ I 42,5Н («Akkermann Цемент» ЖШС)	22,1	65,65	1,28	4,53	0,16	4,67	0,38	0,73	0,5

«Карбонатты» ТСЦ екі сатылы, дәйекті-бөлек технология бойынша алынды. Бұл технология қоспасыз портландцементті суперпластификатормен алдын ала ұнтақтауды (ТСЦ-100 алу) және кейіннен оны карбонатты толтырғышпен қосымша ұнтақтауды (ТСЦ-50 алу) қамтиды. Ұнтақтау үшін СВМ-3 вибрациялық-шарлы диірмені қолданылды, оның қозғалтқыш қуаты – 3 кВт, ұнтақтау камерасының көлемі – 10 л. Ұнтақтауға арналған жүктеме массасы 1,5-3 кг аралығында болды.

Цементтік байланыстырғыштардың қасиеттері (меншікті беті, шынайы тығыздығы, қалыпты қоюлығы, қату мерзімі, беріктікке байланысты белсенділігі) қолданыстағы стандарттарға сәйкес анықталды [18]. Байланыстырғыштардың су тұтынуын салыстырмалы бағалау қалыпты қоюлықтың өзгеруі, цементті ерітіндінің мини-конус бойынша жайылуы, сондай-ақ ерітінді қоспасының су-цементтік қатынасы негізінде жүргізілді.

Мини-конус Суттард вискозиметрінің модификацияланған түрі болып табылады, оның диаметрі D/d = 40/20 мм, биіктігі h = 60 мм. Мини-конусты жоғарғы жиегіне дейін жылжымалы ерітіндімен толтырып, оны бірқалыпты жоғары көтерді. 30-40 секунд ішінде ерітінді горизонталь бетке жайылып, шеңбер түзді. Кейін екі өзара перпендикуляр бағытта жайылу диаметрлері өлшеніп, олардың орташа мәні есептелді.

Цементті тастың қысуға беріктігін анықтау 2×2×2 см өлшемді үлгілерде, ал ерітіндінің беріктігін – 4×4×16 см өлшемді үлгілерде жүргізілді. Барлық үлгілер қалыпты жағдайда (температура 22 ± 2°С, ауа ылғалдылығы кемінде 98%) қатайған.

Карбонатты толтырғыш ретінде Чодраял кен орнының (Ресей, Марий Эл Республикасы, Волжский ауданы, Чодраял ауылы) жынысынан алынған доломиттенген әктас ұны (МП-2 минералды ұнтағы) қолданылды. Ұнның қасиеттері 3-кестеде келтірілген.

Кесте 3

Чодраял кен орнының карбонатты толтырғышының қасиеттері

№	Көрсеткіштердің атауы	Өлш. бірл.	Қажетті мәндер	Нақты мәндер
1	2	3	4	5
1	Материал түрі және белсенділік дәрежесі	-	Инертті микроұнтақ (ИМД)	Инертті микроұнтақ (ИМД)
2	Кальций карбонатының массалық үлесі	%	-	51,5

3-кестенің жалғасы

1	2	3	4	5
3	Магний карбонатының массалық үлесі	%	-	42,6
4	Кальций және магний карбонаттарының жиынтық массалық үлесі	%	80-нен кем емес	94,1
5	Дәндік құрамы (електегі жеке қалдықтар), мм: - 1,25 - 0,63 - 0,315 - 0,16 - 0,09 - 0,05 - < 0,05	%	жоқ жоқ 0,5-тен көп емес 3-тен көп емес 5-тен көп емес 15-тен көп емес 85-тен көп емес	жоқ жоқ 0,1 2 3,5 12 82,4
6	Массалық ылғалдылық	%	0,2-ден көп емес	0,1
7	Нағыз тығыздық	кг/м ³	2700 ± 100	2680
8	Көлемдік тығыздық	кг/м ³	960 ± 50	970
9	Кеуектілік	%	-	63,8
10	Меншікті беті	см ² /г	4500 ± 200	4450
11	Металл қоспаларының болуы	%	2-ден көп емес	0,1

В22,5 класты ауыр бетон қоспаларын дайындау және олардың қасиеттерін (тығыздық, қозғалымдылық, су-цементтік қатынас) анықтау МемСТ 7473-2010 талаптарына сәйкес жүргізілді. Ұсақ толтырғыш ретінде ең үлкен дән өлшемі 5 мм және ірілік модулі 2,7 болатын байытылған кварц құмы пайдаланылды. Ірі толтырғыш ретінде фракция өлшемі 5-20 мм және майдалану беріктігі маркасы 800 болатын қиыршық тас қолданылды. Ірі толтырғыш ретінде фракция өлшемі 5-20 мм және майдалану беріктігі маркасы 800 болатын қиыршық тас қолданылды. Қыры 10 см болатын бетон үлгілерін сынау МемСТ 10180-2012 стандартына сәйкес ИП-2500М гидравликалық преста жүргізілді.

Цементті тастың рентгенографиялық фазалық талдауы сәулелену қарқындылығын иондаушы әдіспен тіркеу арқылы ДРОН-7 рентгендік дифрактометрінде (ААҚ НПП «Буревестник», Санкт-Петербург қ.) 2,5 БСВ 27-Си рентгендік түтігін пайдалана отырып жүргізілді. Түсірілім дискретті сканерлеу режимінде 10.20 қадамымен орындалды.

Экспозиция уақыты – 1 секунд. Сканерлеу аралығы 7...700 2θ. Түтікшедегі кернеу 40 кВ, ток күші 20 мА. Дифракциялық максимумдардың бұрыштық орындарын өлшеудің абсолюттік қателігі ± 0,020 аспайды.

Анализге арналған препарат цемент тасынан алынды, ол фарфор келсапта ұнтақталып, барлық өлшем үлгісі 008 електен өткенше өңделді. Карбонизация процесінің әсерін болдырмау және үлгіге қалып қабырғалары мен түбінен қоспалар түсуінің алдын алу мақсатында сынамалар үлгінің ортасынан алынды. Ұнтақ гидратация реакциясын тоқтату үшін таза медициналық спиртпен өңделіп, содан кейін бос суды кетіру үшін ацетонмен жуылды. Кептіру 30-40°C температурада 30...50 минут ішінде бөлме жағдайында жүргізілді. Кейін ұнтақ кварц шынысынан жасалған стандартты дискілі кюветаға престелді; түсіру кезінде препарат өзінің жазықтығында 60 айн/мин жылдамдықпен айналды. Рентгендік түтікшенің жұмыс режимі – 40 кВ, 30 мА.

Диффракциялық рефлекстердің арақабаттық қашықтықтарының мәндерін есептеу автоматты түрде, құрылғының математикалық қамтамасыз ету жиынтығына кіретін EVA бағдарламасы арқылы жүргізілді. Кристалдық фазаларды сәйкестендіру стандартты әдіспен – алынған эксперименттік арақабаттық қашықтықтар мен салыстырмалы қарқындылықтарды эталондық мәндермен салыстыру арқылы жүзеге асырылды. Эксперименттік түрде алынған арақабаттық қашықтықтар мен сызықтардың салыстырмалы қарқындылықтарын эталондық рентгенограммалармен салыстыра отырып, зерттелетін заттың құрамы туралы қорытынды жасалды.

Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау. Алдымен екі түрлі цементтік байланыстырғыштың (ЦЕМ I 42,5Н және ЦНВ-50) салыстырмалы сынақтары жүргізілді, олардың нәтижелері 4-кестеде келтірілген.

Кесте 4

ЦЕМ I 42,5Н және ЦНВ-50 салыстырмалы қасиеттері

№	Көрсеткіштердің атауы	Өлш. бірл.	Байланыстырғыш заттар	
			ЦЕМ І 42,5Н	ЦНВ-50
Цемент қамыры мен тасының қасиеттері				
1	Қалыпты қоюлық (ҚҚ)	%	26,0	19,8
2	Нағыз тығыздық, г/см³		3,12	2,93
3	Меншікті беті, см²/г		4120	5260
4	ҚҚ төмендеуі	%	-	23,8
5	Ұстасу уақыты: басталуы аяқталуы	сағ-мин	2-55 3-40	1-30 2-35
6	Мини-конус бойынша жайылу	мм	55	55
7	Су-цемент қатынасы (С/Ц)		0,4	0,24
8	Цемент тасының 28 тәуліктік қалыпты катаюдан кейінгі қысуға беріктігі	МПа/%	7,5/100 20,4/100 26,8/100 37,5/100 46,2/100	39,3/524 49,0/240 53,6/200 57,8/154 64,1/139
Цемент-құм ерітіндісінің қасиеттері (МемСТ 310.4)				
9	Су-цемент қатынасы (С/Ц) РК=106-115 мм кезінде	-	0,38	0,27
10	С/Ц төмендеуі	%	-	40
11	Қалыпты катаю жағдайында қысуға беріктік бойынша белсенділігі: 1 тәулік 7 тәулік 14 тәулік 28 тәулік	МПа	12,0/100 20,8/100 43,5/100 52,2/100	19,4/162 37,5/180 53,9/124 61,4/118

4-кестенің мәліметтеріне сәйкес, ЦНВ-50 салыстырмалы түрде төмен су тұтынумен ерекшеленеді. Бұл жағдайда цементтік пастаның қалыпты қоюлығы бойынша су шығыны 23,8%-ға, ал ерітінді қоспасының су-цементтік қатынасы бойынша 40%-ға дейін төмендейді.

Сонымен қатар, цементтік тас пен цемент-құмды ерітіндінің сығылу беріктігі айтарлықтай артты. Ерте беріктік 1 тәулік ішінде 62%-ға өсті, ал стандартты жетілу мерзімінде бұл өсім 18%-ды құрады. Тең қозғалысты бетон қоспаларының құрамы және осы байланыстырғыштармен дайындалған В22,5 класты ауыр бетонның қасиеттерін анықтау нәтижелері сәйкесінше 5 және 6-кестелерде көрсетілген. ЦЕМ I 42,5Н негізіндегі бақылау бетон

қоспасын дайындау үшін құрылыс нарығында кеңінен қолданылатын суперпластификатор – СП «Полипласт ПК» пайдаланылды. Оның құрғақ заттың массалық үлесі 32%, су ерітіндісінің тығыздығы 1,13 г/см³, рН мәні 6-7 аралығында. ЦЕМ I және ЦНВ-50 цементті байланыстырғыштарын клинкер сыйымдылығы бойынша салыстырмалы бағалау үшін Ск/Рсж критерийі қолданылды (Ск – 1 м³ бетонға жұмсалған байланыстырғыштағы клинкер мөлшері; Рсж – ауыр бетонның маркалық беріктігі).

Кесте 5

СЕМ I 42,5Н және ЦНВ-50 негізінде дайындалған ауыр бетондардың құрамы

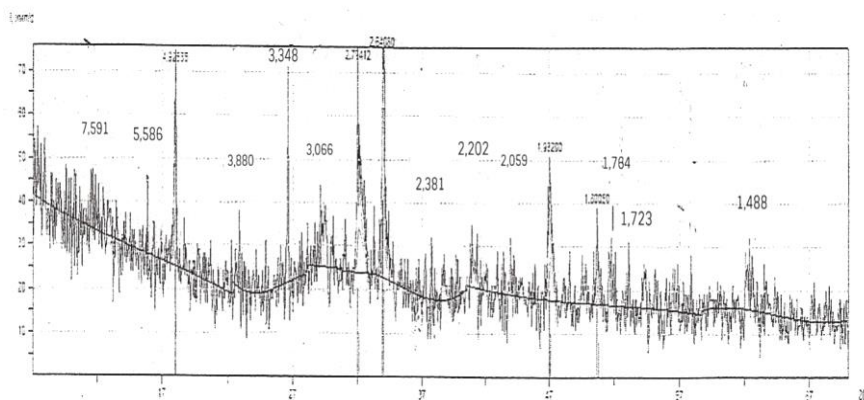
№	Байланыстырғыш түрі	Материалдар шығыны, кг/м ³				
		Байланыстырғыш (клинкер мөлшері Ск)	Құм	Ірі толтырғыш	Су	СП «Полипласт ПК»
1	ЦЕМ I 42,5Н	330 (325)	902	974	190	1,65 (ЦЕМ массасының 0,5%-ы)
2	ЦНВ-50	330 (160)		1048	120	-

Кесте 6

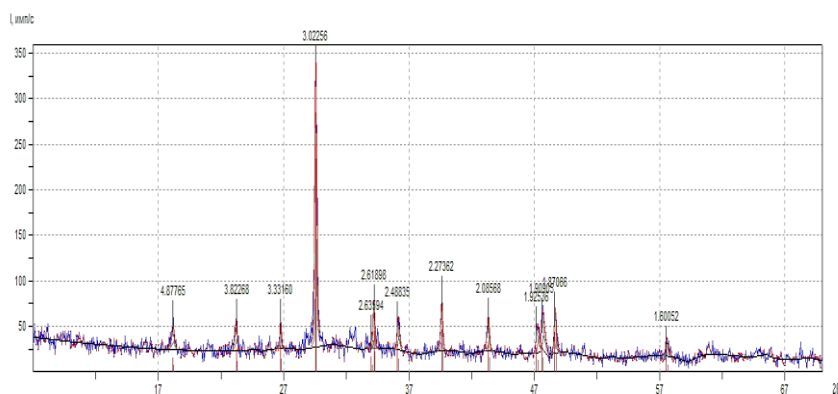
СЕМ I 42,5Н және ЦНВ-50 негізінде дайындалған ауыр бетондардың қасиеттері

Құрамы №	ОК, см	С/Ц	ΔВ, %	Бетон қоспа-ң тығыз-ы, кг/м ³	Бетонның қысуға беріктігі Рсж, МПа, тәулік бойынша					Ск/Рсж, кг/МПа
					1	3	7	14	28	
1	18	0,57	-	2400	6,9	9,6	13,6	21,4	28,8	11,3
2	18,5	0,36	36,8	2400	8,5	15,2	20,8	27,6	32,4	4,9

6-кестеден көрініп тұрғандай, ЦНВ-50 негізіндегі бетон қоспасының су қажеттілігі 70 литрге (36,8%) төмендеген, бұл оның құрамын түзету қажеттігін көрсетеді. Бұл ретте, МемСТ 27006 стандартына сәйкес, бетон қоспасының көлемін сақтау үшін толтырғыштардың шығынын арттыру қажет. Судың шығынын төмендету бетонның қысу беріктігінің артуына тікелей әсер етеді, әсіресе ерте кезеңде (1 тәулікте – 23,2%). 28 тәулікте беріктіктің артуы салыстырмалы түрде төмен (12,5%), бірақ бұл да қоспаның тиімділігін көрсетеді. Есептік критерийлерді (Ск/Рсж = 11,3 және 4,9 кг/МПа) салыстыру нәтижесінде ЦНВ-50 клинкер тиімділігі бойынша 2,3 есе жоғары екені анықталды. Бұл оның шикізат шығынын азайтып, беріктігін сақтауға мүмкіндік беретінін көрсетеді. «Карбонатты» ЦНВ ерте және маркалық жасында әлдеқайда қарқынды қататындықтан, гидратация өнімдерінің құрамын анықтап, жаңа қосылыстардың түзілу мүмкіндігін зерттеу орынды. 1 және 2-суреттерде, тиісінше, ЦЕМ I 42,5Н және «карбонатты» ЦНВ-50 цементтік тастарының рентгенограммалары көрсетілген. Бұл үлгілер 28 тәулік бойы қалыпты жағдайда гидратацияланған. Х осінде – сканерлеу бұрышы (7...700), Y осінде – рентген сәулеленуінің импульсі (имп/с). Шың үстіндегі сандар – сәйкес минералдың кристалдық торының арақашықтық мәндері.



Сурет 1. СЕМ I 42,5Н цемент тасының рентгенограммасы



Сурет 2. «Карбонатты» ЦНВ-50 цемент тасының рентгенограммасы

ЦЕМ I 42,5Н цементтік тасы үшін ең тән шағылу мәндері 4,29; 2,64; 1,93; 1,764; 1,488 Å екендігі анықталды. 2,79 Å шағылуы гидратталмаған алит фазасына C_3S (2,776 Å) немесе $\beta-C_2S$ (2,794; 2,785 Å) жатқызылуы мүмкін. Үлкен бұрыштар аймағында (55-60°) C-S-H фазасына тән 1,800 Å шағылуы байқалды. Сондай-ақ, 50-55° аймағында құрылымы C_3AH_6 фазасына жақын C_3FH_6 (1,723 Å) фазасының шағылуы тіркелді.

ЦНВ-50 үшін кальций гидрокарбоалюминаты $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaCO_3 \cdot 32H_2O$ (ГКАК-3) фазасына тән 3,82 және 2,488 Å шағылуларының болуы сипатталады. Мүмкін, ГКАК-3 фазасының жартылай ыдырауы нәтижесінде жүйеде $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCO_3 \cdot 12H_2O$ (ГКАК-1) фазасы (7,59; 1,60 Å) болуы мүмкін. Алайда, $d = 1,60$ Å мәніндегі шағылу гидросульфалюминат кальцийдің моносұльфатты формасына (ГСАК-1) немесе кальций гидроалюминатының ең тұрақты кубтық құрылымы C_3AH_6 -ға да жатқызылуы мүмкін. ЦЕМ I 42,5Н рентгенограммасында эттрингиттің (3,880; 2,202 Å) және ЦНВ-50-мен салыстырғанда аз мөлшерде гидросульфалюминат кальцийдің моносұльфатты формасының (ГСАК-1) (2,059 Å) шағылулары анықталды. Ал ЦНВ-50 рентгенограммасында эттрингитке тән шағылулар жоқ, бұл алюминатты фазалардың гидратация процесінде $CaCO_3$ -пен әрекеттесіп, негізінен ГКАК-3 және ГКАК-1 түзуімен байланысты екенін көрсетеді. ЦНВ-50 рентгенограммасында $Ca(OH)_2$ -ге (4,877; 2,635; 1,925 Å) тән шағылулар анықталды, олардың қарқындылығы ЦЕМ I 42,5Н-дегі ұқсас шағылуларға жақын. Алайда бұл шағылулар (шын) көпсатылы пішінге ие және жақын мәндегі аралық жазықтықтық қашықтық

көрсеткіштерімен сипатталады ($2,635 \div 2,619$; $1,925 \div 1,909$ Å). Бұл $\text{Ca}(\text{OH})_2$ кристалдық құрылымының айтарлықтай бұзылғанын көрсетеді, бұл, мүмкін, жүйеде органикалық қоспаның (суперпластификатордың) болуымен байланысты.

Қорытынды. Жалпы құрылысқа арналған портландцемент өндірісінің қазіргі әлемдік үрдістері талданып, олардың басты мақсаты – энергия шығындарын және парниктік газдардың, әсіресе CO_2 шығарындыларын азайту екені көрсетілді. Бұл мақсатқа жету үшін дамыған елдер құрамында клинкер мөлшері салыстырмалы түрде төмен аралас тұтқыр заттарды қолдану жолын таңдайды, өйткені клинкер – әктас декарбонизациясы нәтижесінде және жанармайдың үлкен көлемін жағу кезінде бөлінетін көмірқышқыл газының негізгі көзі болып табылады. Клинкер шығынының тиімділігі тұрғысынан алғанда, ең перспективалы тұтқыр зат – төмен су қажет ететін цемент. Ол минералды қоспалардың айтарлықтай жоғары мөлшеріне (70%-ға дейін) қарамастан, технологиялық, физика-механикалық және пайдалану көрсеткіштері бойынша кәдімгі портландцементтерден кем түспейді.

Салыстырмалы сынақтар «карбонатты» ЦНВ-50 портландцементке қарағанда айтарлықтай төмен су қажеттілігімен ерекшеленетінін көрсетті. Цемент қамырының қалыпты қоюлығы бойынша судың азаюы 23,8%-ға, ал ерітінді мен бетон қоспасының су-цементтік қатынасы сәйкесінше 40% және 36,8%-ға жетеді. Бұл судың төмен мөлшері материалдың қысу беріктігінің айтарлықтай артуына әкеледі, әсіресе ерте кезеңдерде: цемент тасының беріктігі 25%-ға, цемент-құм ерітіндісінің беріктігі 62%-ға, ал ауыр бетонның беріктігі 23,5%-ға жоғарылайды. Клинкер тиімділігінің өлшемі ретінде алынған 1 м³ бетонға шаққандағы тұтқыр құрамындағы клинкер мөлшерінің қатынасы бойынша, ЦНВ-50 портландцемент ЦЕМ I-ге қарағанда 2,3 есе тиімді. «Карбонатты» ЦНВ-50 рентгенограммаларының талдауы кальций гидрокарбораллюминаттарының ГКАК-3 және ГКАК-1 түрлерінің пайда болуын көрсетеді. Бұл фазалар материалдың ерте қарқынды қатаюын және 28 тәулікте қалыпты жағдайда жоғары белсенділігін қамтамасыз етеді.

Әдебиеттер тізімі

1. Коновалова, Н.А. Утилизация крупнотоннажных отходов производства с целью получения экономически эффективных дорожно-строительных материалов [Текст] / Н.А. Коновалова, О.Н. Дабижа, Е.В. Ярилов [и др.] // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2017. – Т. 23. – № 10. – С. 14-21.
2. Клайн Д. Глобальные изменения в производстве цемента в мировом масштабе [Текст] / Д. Клайн // ALITinform. Международное аналитическое обозрение. – 2017. – № 1. – С. 12-20.
3. Гальцева, Н.А. Вторичное использование отходов промышленности [Текст] / Н.А. Гальцева [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2022. – Т. 89, № 5. – С. 572–581.
4. Мухаметрахимов Р.Х. Фиброцементные плиты на основе модифицированного смешанного вяжущего [Текст] / Р.Х. Мухаметрахимов, В.С. Изотов, В.А. Гревцев // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2010. – № 2(14). – С. 250-254.
5. Gureva A.M. The theoretical basis of the concept of circular economy // Journal of International Economic Affairs. – 2019. – No. 3. – P. 2311-2336.
6. Чаттерджи, А.К. Переход к строительству на основе цемента с низким «углеродным следом»: требования и препятствия [Текст] / А.К. Чаттерджи // Цемент и его применение. – 2018. – № 2. – С. 54-59.

7. Хозин, В.Г. Карбонатные цементы низкой водопотребности – зеленая альтернатива цементной индустрии России [Текст] / В.Г. Хозин [и др.] // Строительные материалы. – 2014. – № 5. – С. 76-82.
8. Макаренко, С.В. Цементы низкой водопотребности – эффективные строительные материалы для утилизации золошлаковых смесей ТЭЦ [Текст] / С.В. Макаренко [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 10(106). – С. 524-532.
9. Гуляков, Е.Г. Влияние суперпластификаторов на размолоспособность портландцемента при получении цементов низкой водопотребности [Текст] / Е.Г. Гуляков [и др.] // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2024. – № 2(68). – С. 77-91.
10. Макаренко, С.В. Цементы низкой водопотребности как альтернативный вид применяемой в товарном бетоне вяжущей смеси [Текст] / С.В. Макаренко // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2023. – Т. 13. – № 1(44). – С. 58-63.
11. Гаркави, М.С. Цементы низкой водопотребности центробежно-ударного помола [Текст] / М.С. Гаркави, А.В. Артамонов, Е.В. Колодежная [и др.] // Строительные материалы. – 2019. – № 1-2. – С. 23-27.
12. Шакирова, У.Б. Вяжущие (цементы) низкой водопотребности на основе органоминеральных добавок [Текст] / У.Б. Шакирова, Н.Х. Бабаев // Современные проблемы науки и производства. – 2014. – № 1(4). – С. 1-9.
13. Гиззатуллин, А.Р. Функционализированные наполнители для применения в цементных бетонах [Текст] / А.Р. Гиззатуллин, Н.Н. Морозова, К.О. Нестерова // Полимеры в строительстве. – 2023. – № 1(11). – С. 47-57.
14. Калашников, В.И. Суспензионно-наполненные бетонные смеси для порошково-активированных бетонов нового поколения [Текст] / В.И. Калашников, В.Т. Ерофеев, О.В. Тараканов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2016. – № 4. – С. 30-36.
15. Калашников В.И. Роль дисперсных и тонкозернистых наполнителей в бетонах нового поколения [Текст] / В.И. Калашников [и др.] // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2014. – № 7(667). – С. 11-21.
16. Ватин, Н.И. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве [Текст] / Н.И. Ватин, Д.В. Петросов, А.И. Калачев, П. Лахтинен // Magazine of Civil Engineering. – 2011. – № 4. – С. 16-21.
17. Калашников В.И. Новые представления о механизме действия суперпластификаторов, совместно размолотых с цементом или минеральными породами [Текст] / В.И. Калашников [и др.] // Строительные материалы. – 2014. – № 9. – С. 70-75.
18. ГОСТ 310.1-76. Цементы. Методы испытаний. Общие положения [Текст]. – Введ. 01-01-78. – Москва:ИПК Издательство стандартов, 1976. – 2 с.

Материал редакцияга 18.03.25 түсті, 22.10.25 қабылданды.

**Е.Б. Мажитов¹, Ж.С. Түлеугалиева¹, М.Ж. Рыскалиев¹,
С.М. Жарылгапов¹, А.Б. Шингужиева¹, Е.Г. Талаптанов¹**

¹*Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир хана,
Уральск, Казахстан*

ЦЕМЕНТ С ПОНИЖЕННЫМ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЕМ НА ОСНОВЕ КАРБОНАТНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ

Аннотация. Необходимость снижения содержания клинкера в промышленных цементах для уменьшения энергозатрат и выбросов углекислого газа побуждает шире использовать смешанные вяжущие с высоким содержанием замещающих

минеральных добавок (от 30 до 80%). При этом их применение связано не только с уменьшением доли дорогостоящего клинкера, но и с необходимостью придания бетонам улучшенных строительно-технических свойств (водонепроницаемости, морозостойкости, трещиностойкости, стойкости к коррозии). Авторами предлагается путь наиболее эффективного использования минеральных добавок путём производства цементов низкой водопотребности (ЦНВ), в которых минимизируется доля клинкера, а по технологическим, эксплуатационно-техническим и экологическим показателям они превосходят не только смешанные вяжущие, но и все общестроительные портландцементы, выпускаемые мировыми производителями в Европе, Азии и Америке. В работе представлены сравнительные результаты физико-механических испытаний цементного камня и бетонов, приготовленных как на основе стандартного портландцемента, так и на основе ЦНВ, для которого в качестве минерального компонента использовали карбонатный наполнитель. Методом рентгенографического фазового анализа выполнена сравнительная оценка состава кристаллогидратов в микроструктуре цементного камня ЦЕМ I 42,5Н и «карбонатного» ЦНВ-50. Показано, что в ЦНВ-50 образуются гидрокарбоалюминаты кальция вида ГКАК-3 и ГКАК-1, которые, очевидно, способствуют его раннему интенсивному твердению и повышенной активности в 28-суточном возрасте.

Ключевые слова: клинкероёмкость, эмиссия углекислого газа, цемент низкой водопотребности, смешанные вяжущие, суперпластификатор.

Е.Б. Mazhitov¹, Zh.S. Tuleugaliyeva¹, M.Zh. Ryskaliev¹,
S.M. Zharylgapov¹, A.B. Shinguzhieva¹, E.G. Talaptanov¹

¹West Kazakhstan agrarian and technical university named after Zhangir khan,
Uralsk, Kazakhstan

LOW-WATER-DEMAND CEMENT BASED ON A CARBONATE FILLER

Abstract. The necessity of reducing clinker content in industrial cements to decrease energy consumption and carbon dioxide emissions encourages the wider use of blended binders with a high proportion of supplementary mineral additives (from 30% to 80%). Their application not only reduces the share of expensive clinker but also enhances the construction and technical properties of concrete, such as water resistance, frost resistance, crack resistance, and corrosion resistance. The authors propose an approach for the most efficient utilization of mineral additives by producing low-water-demand cements (LWDCs), in which the clinker content is minimized while surpassing not only blended binders but also all general-purpose Portland cements produced by leading manufacturers in Europe, Asia, and America in terms of technological, operational, and environmental performance. The study presents comparative results of physical and mechanical tests of cement stone and concretes prepared based on both standard Portland cement and LWDC, in which a carbonate filler was used as the mineral component. A comparative assessment of the composition of crystalline hydrates in the microstructure of CEM I 42.5N cement stone and «carbonate» LWDC-50 was conducted using X-ray phase analysis. It was shown that LWDC-50 forms calcium hydrocarboaluminates of the GKAC-3 and GKAC-1 types, which apparently contribute to its early intensive hardening and increased activity at 28 days.

Keywords: clinker consumption, carbon dioxide emissions, low-water-demand cement, blended binders, superplasticizer.

References

1. Konovalova N.A., Dabiszha O.N., Yarilov E.V. et al. Utilizatsiya krupnotonnazhnykh otkhodov proizvodstva s tsel'yu polucheniya ekonomicheskii effektivnykh dorozhno-stroitel'nykh materialov [Utilization of Large-Scale Industrial Waste for Obtaining Economically Efficient Road Construction Materials] // Bulletin of the Zabaykalsky State University. – 2017. – Vol. 23. – No. 10. – P. 14-21. [in Russian].
2. Klein D. Global'nye izmeneniya v proizvodstve tsementa v mirovom masshtabe [Global Changes in Cement Production on a Worldwide Scale] // ALITinform. International Analytical Review. – 2017. – No. 1. – P. 12-20. [in Russian].
3. Galtseva N.A. et al. Vtorichnoe ispol'zovanie otkhodov promyshlennosti [Secondary Use of Industrial Waste] // Engineering Bulletin of the Don. – 2022. – Vol. 89. – No. 5. – P. 572-581. [in Russian].
4. Mukhametrakhimov R.Kh., Izotov V.S., Grevtsev V.A. Fibrotsementnye plity na osnove modifitsirovannogo smeshannogo vyazhushchego [Fiber-Cement Boards Based on Modified Blended Binders] // Proceedings of Kazan State University of Architecture and Engineering. – 2010. – No. 2(14). – P. 250-254. [in Russian].
5. Gureva A.M. The theoretical basis of the concept of circular economy // Journal of International Economic Affairs. – 2019. – No. 3. – P. 2311-2336.
6. Chatterjee A.K. Perekhod k stroitel'stvu na osnove tsementa s nizkim «uglerodnym sledom»: trebovaniya i prepyatstviya [Transition to Low Carbon Footprint Cement-Based Construction: Requirements and Obstacles] // Cement and Its Application. – 2018. – No. 2. – P. 54-59. [in Russian].
7. Khozin V.G. et al. Karbonatnye tsementy nizkoi vodopotrebleniya – zelenaya alternativa tsementnoi industriya Rossii [Low-Water-Consumption Carbonate Cements – A Green Alternative to the Russian Cement Industry] // Construction Materials. – 2014. – No. 5. – P. 76-82. [in Russian].
8. Makarenko S.V. et al. Tsementy nizkoi vodopotrebleniya – effektivnye stroitel'nye materialy dlya utilizatsii zoloshlakovykh smesei TEC [Low-Water-Consumption Cements – Efficient Building Materials for the Utilization of Ash-Slag Mixtures from Thermal Power Plants] // Engineering Bulletin of the Don. – 2023. – No. 10(106). – P. 524-532. [in Russian].
9. Gulyakov E.G. et al. Vliyanie superplastifikatorov na razmolosposobnost' portlandtsementa pri poluchenii tsementov nizkoi vodopotrebleniya [Influence of Superplasticizers on the Grindability of Portland Cement in Producing Low-Water-Consumption Cements] // Proceedings of Kazan State University of Architecture and Engineering. – 2024. – No. 2(68). – P. 77-91. [in Russian].
10. Makarenko S.V. Tsementy nizkoi vodopotrebleniya kak alternativnyi vid primenyaemoi v tovarnom betone vyazhushchei smesi [Low-Water-Consumption Cements as an Alternative Binder in Ready-Mix Concrete] // Proceedings of Universities. Investments. Construction. Real Estate. – 2023. – Vol. 13. – No. 1(44). – P. 58-63. [in Russian].
11. Garkavi M.S., Artamonov A.V., Kolodezhnaya E.V. et al. Tsementy nizkoi vodopotrebleniya tsentrobezhno-udarnogo pomola [Low-Water-Consumption Cements of Centrifugal-Impact Grinding] // Construction Materials. – 2019. – No. 1-2. – P. 23-27. [in Russian].
12. Shakirova U.B., Babaev N.Kh. Vyazhushchie (tsementy) nizkoi vodopotrebleniya na osnove organomineral'nykh dobavok [Low-Water-Consumption Binders (Cements) Based on Organomineral Additives] // Modern Problems of Science and Production. – 2014. – No. 1(4). – P. 1-9. [in Russian].
13. Gizzatullin A.R., Morozova N.N., Nesterova K.O. Funktsionalizirovannye napolniteli dlya primeneniya v tsementnykh betonakh [Functionalized Fillers for Application in Cement Concretes] // Polymers in Construction. – 2023. – No. 1(11). – P. 47-57. [in Russian].

14. Kalashnikov V.I., Yerofeev V.T., Tarakanov O.V. Suspenszionno-napolnennyye betonnyye smesi dlya poroshkovo-aktivirovannykh betonov novogo pokoleniya [Suspension-Filled Concrete Mixtures for Powder-Activated Concretes of the New Generation] // Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction. – 2016. – No. 4. – P. 30-36. [in Russian].
15. Kalashnikov V.I. et al. Rol' dispersnykh i tonkozer-nistyykh napolnitelei v betonakh novogo pokoleniya [The Role of Dispersed and Fine-Grained Fillers in Concretes of the New Generation] // Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction. – 2014. – No. 7(667). – P. 11-21. [in Russian].
16. Vatin N.I., Petrosov D.V., Kalachev A.I., Lahtinen P. Primenenie zol i zoloshlakovykh otkhodov v stroitel'stve [Use of Ash and Slag Waste in Construction] // Magazine of Civil Engineering. – 2011. – No. 4. – P. 16-21. [in Russian].
17. Kalashnikov V.I. et al. Novye predstavleniya o mekhanizme deistviya superplastifikatorov, sovmestno razmolotykh s tsementom ili mineral'nymi porodami [New Insights into the Mechanism of Action of Superplasticizers Co-Ground with Cement or Mineral Aggregates] // Construction Materials. – 2014. – No. 9. – P. 70-75. [in Russian].
18. GOST 310.1-76. Tsementy. Metody ispytaniy. Obshchie polozheniya [Cements. Test Methods. General Provisions]. – Introduced 01-01-78. – Moscow: IPK Standards Publishing, 1976. – 2 p. [in Russian].