



Определение оптимального водовяжущего соотношения зольно-цементной смеси в составе бетона с применением модифицированной добавки

¹*ЛУКПАНОВ Рауан Ермагамбетович, PhD, профессор, директор, rauan_82@mail.ru,

¹ДЮСЕМБИНОВ Думан Серикович, к.т.н., доцент, dussembinov.duman@mail.ru,

¹ЕНКЕБАЕВ Серик Бейсенгалиевич, PhD, главный специалист, Yenkebayev-serik@mail.ru,

¹ЦЫГУЛЕВ Денис Владимирович, к.т.н., доцент, denis_riza_72@mail.ru,

¹НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», Казахстан, Астана, ул. Сатпаева, 2,

*автор-корреспондент.

Аннотация. В статье приведены исследования цементно-зольного вяжущего в составе бетона с применением комплексной модифицированной добавки (КМД). Исследования направлены на улучшение условий производства бетонных работ, в частности улучшение удобоукладываемости бетонной смеси на основе зольно-цементных вяжущих. Основным оценочным критерием исследования являлось изменение вязкости состава при изменении водовяжущего соотношения. Измерения выполнены в два этапа: на первом этапе дана оценка влияния зольного компонента на водовяжущее соотношение, на втором этапе рассматривался вопрос изменения вязкости по истечении времени. Лабораторные исследования выполнены адаптированными методами измерения распыла смеси и определения сроков схватывания. По результатам первого этапа получены закономерности изменения вязкости смеси по изменению содержания воды, получены оптимальные соотношения воды к вяжущему в зависимости от процентного соотношения зольного компонента. По результатам второго этапа получены закономерности изменений вязкости (от жидкого до твердого состояния) смеси по времени выдержки, в зависимости от того же процентного соотношения золы. В заключение приводятся данные по оптимальному водовяжущему соотношению из условий проявления зольно-цементной смеси тексотропных свойств, соответствующих классической цементной смеси, без включения золы.

Ключевые слова: цемент, зола, смесь, вяжущее, бетон, вязкость, водовяжущее соотношение, водоцементное соотношение, распыл смеси, сроки схватывания.

Введение

История развития бетона берет свое начало с древних времен, однако и по сей день имеет активное развитие. Современные технологии благоприятствуют будущей перспективе развития технологий использования и производства бетона в строительстве [1]. Новые виды бетона находят применение в современной практике, такие как фибробетоны, самоуплотняющиеся бетоны, углебетоны, нанобетоны и другие [2].

Все же большая часть преобразовательного процесса бетона как строительного материала приходится не на разработку новых материалов, а на применение добавок, способствующих улучшению его физико-механических свойств. Добавка может быть подобрана, например, в зависимости от технологического применения бетона или для улучшения определенных его показателей: скорости схватывания или твердения, увеличения прочности, водопоглощения, морозостойкости и пр. [3].

Также активно развивается направление по утилизации промышленных отходов. В состав бетонных смесей или вяжущих добавляют отходы или излишки промышленности, в основном с целью снижения себестоимости продукта. Наиболее распространенными добавками замещения являются: отсеб камнедробления, шлак, зола и пр. [4]. В настоящей статье, в качестве добавки замещения вяжущего используется зола. Добавление зольного компонента в состав вяжущего способствует ухудшению физико-механических свойств бетона, следовательно, использование золы в составе вяжущего для экономии цемента не должно использоваться без применения компенсирующих добавок (например, добавления пластификатора для уплотняемости смеси, в частности, пористой структуры зольного компонента). В нашем случае используется разработанная авторами статьи комплексная модифицированная добавка (КМД), благодаря которой происходит восстановление утраченных свойств бетона. В состав КМД входят отходы производства спирта (послеспиртовая барда), отходы производства масел (соапсток), а также щелочь (едкий натр, NaOH). Данная добавка может применяться не только для тяжелых бетонов, но и для легких, например – пенобетона [5].

В рамках данной статьи будет рассмотрена задача исследования по оценке оптимального водовяжущего соотношения в зависимости от концентрации золы, с точки зрения условий производства бетонных работ [6].

Методы

Испытания выполнены методом измерений распыла смеси с разным процентным содержанием золы, таблица 1. При этом эталонной смесью (с которой будут проведены все последующие сравнения результатов) является водоцементная смесь без добавления золы. Для каждого из составов определялось оптимальное водовяжущее со-

отношение. В состав золы гидроудаления входят: диоксид кремния (SiO_2) – до 52%, оксид алюминия (Al_2O_3) – до 18%; негашеная известь (CaO) – до 13%, оксид магния (MgO) – до 2%, железная окалина (Fe_2O_3) – до 7%, серный ангидрид (SO_3) – до 3%, щелочные металлы – до 2%, зольный остаток – до 7%.

Измерения относят к оценке удобоукладываемости бетонной смеси, результаты измерений в комплексе направлены на улучшение условий технологии производства бетонных работ.

Для учета тиксотропности смеси и ее способности изменения вязкости по истечении времени было выполнено по два измерения для одного замеса. Поскольку измерения выполнялись последовательно, то сравнения диаметров расплыва смеси одного замеса показывают потенциальное влияние времени (простоя) на вязкость смеси, по абсолютной шкале времени: условие приготовления раствора до 2,5 минут, проведение первого испытания в пределах 2,5-4,0 минуты (с учетом формовки), проведение второго испытания в пределах 4,0-5,5 минут. Смесь, соответствующая эталону нижнего показателя, условно названа – замес 1, верхнего, – замес 2. Каждый из замесов состоит из двух измерений: измерение 1 и измерение 2. Для большей точности, измерение расплыва выполнено не по двум взаимно перпендикулярным направлениям [6], а по вычислению площади растекания. Расчет площади выполняется полуавтоматизированным способом в программе Autocad по очертанной проекции расплыва. Для оценки влияния зольного компонента на пористость бетона выполнен замер остатков смеси после проведения двух последовательных замеров одного замеса. Сухая концентрация всех замесов имеет постоянную величину по массе, поэтому при сравнении учитывалась корректировка по содержанию воды (разную по массе для каждого замеса).

Результаты и обсуждения

На рисунках 1-7 представлены результаты расчетов расплывов бетонных смесей (порядок измерений слева-направо, то есть с 1-го по 4-е измерение).

Изменения площадей во всех случаях имеют отрицательную корреляцию относительно пропорциональному увеличению водоцементного соотношения, что свидетельствует о неравнодольном приращении водоцементного соотношения по процентному увеличению золы: $R(S_1^1; W_L) = -0,984$; $R(S_1^2; W_L) = -0,968$; $R(S_2^1; W_T) = -0,982$; $R(S_2^2; W_T) = -0,982$ $\frac{\text{number of measuring}}{\text{number of mixing}}$ и W – массивы колонок таблицы 2. Знак минус свидетельствует об обратной пропорциональности зависимости, а высокое значение (близкое к 1) – о закономерности зависимости, то есть чем больше содержание золы, тем больше потребность в воде. Полученные данные дают нам возможность рассуждать только о имеющейся зависимости, без возможно-

сти оценить закономерность в потребности воды при увеличении процентного соотношения зольного компонента, поскольку пределы частных

значений распылов лежат в разных диапазонах.

В обоих случаях (замесах) наблюдается увеличение площади распыла второго измерения от

Таблица 1 – Исходные данные по измерениям

Увеличение зола, C_{az} , %	Содержание воды		Содержание зола, г	Содержание цемента (М400, Д0)	В/Ц отноше- ние по W_L	В/Ц отноше- ние по W_T
	Нижний пока- затель W_L , г	Верхний пока- затель W_T , г				
0	240,0	258,0	0	800	0,3000	0,3225
4	243,0	261,0	32	768	0,3038	0,3263
8	246,0	264,0	64	736	0,3075	0,3300
10	247,5	265,5	80	720	0,3094	0,3319
20	255,0	273,0	160	640	0,3188	0,3413
30	262,5	280,5	240	560	0,3282	0,3506
40	270,0	288,0	320	480	0,3375	0,3600

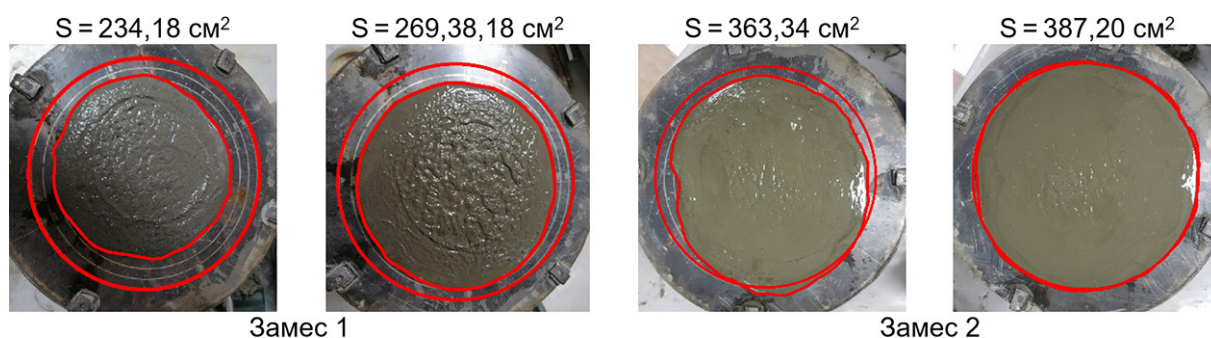


Рисунок 1 – Площадь распыла (соотношение цемента к золе 100/0)

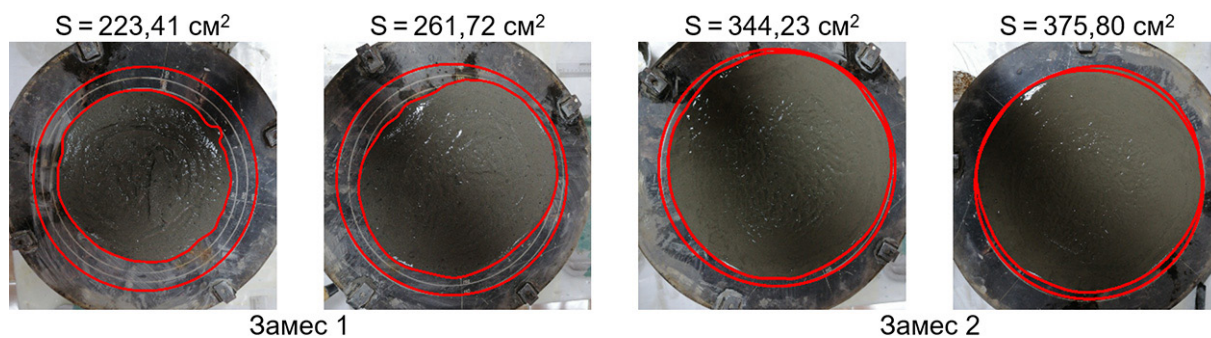


Рисунок 2 – Площадь распыла (соотношение цемента к золе 96/4)

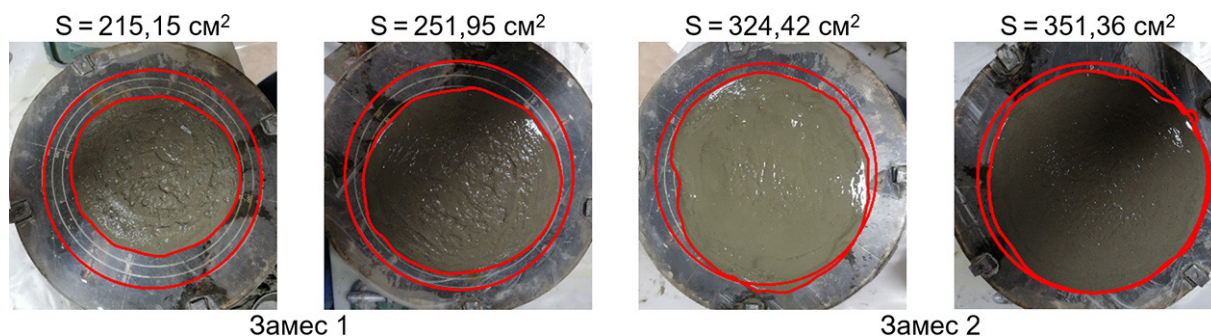


Рисунок 3 – Площадь распыла (соотношение цемента к золе 92/8)

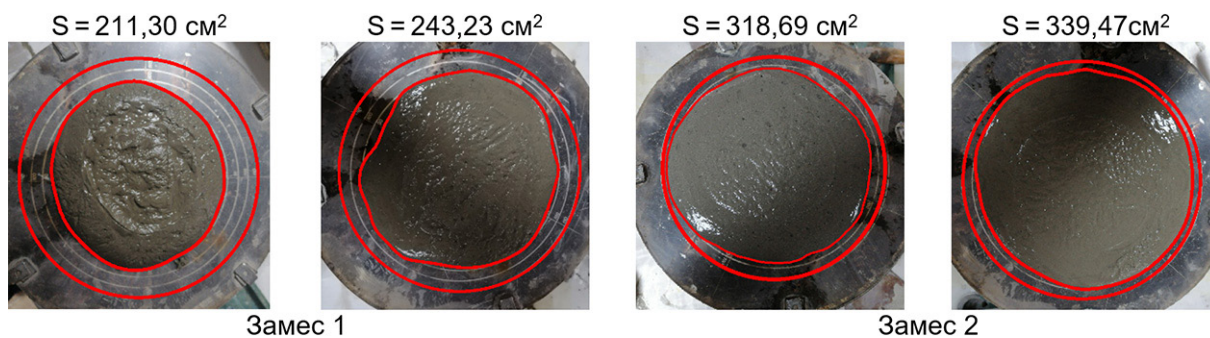


Рисунок 4 – Площадь распыла (соотношение цемента к золе 90/10)

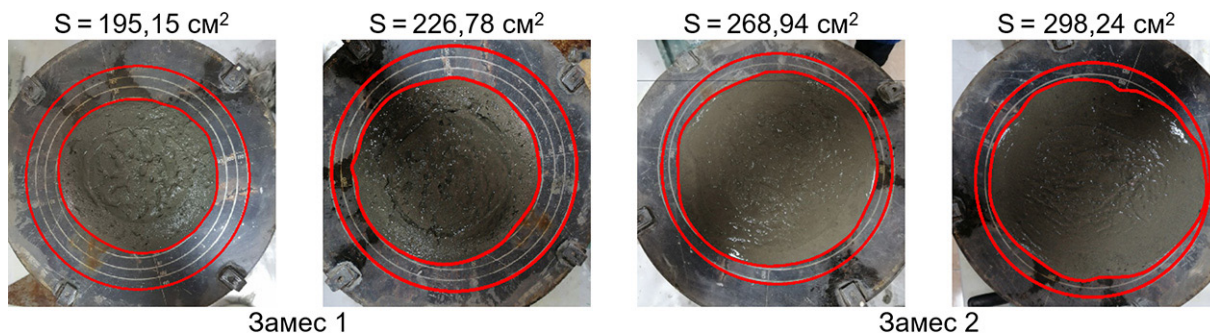


Рисунок 5 – Площадь распыла (соотношение цемента к золе 80/20)

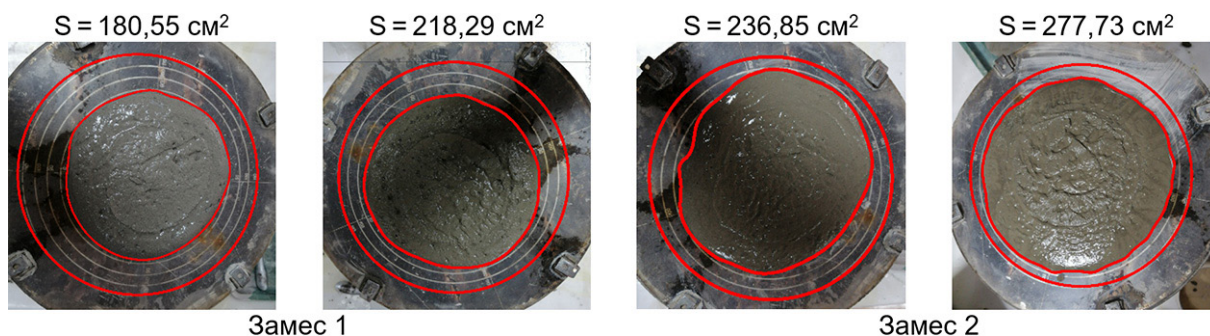


Рисунок 6 – Площадь распыла (соотношение цемента к золе 70/30)

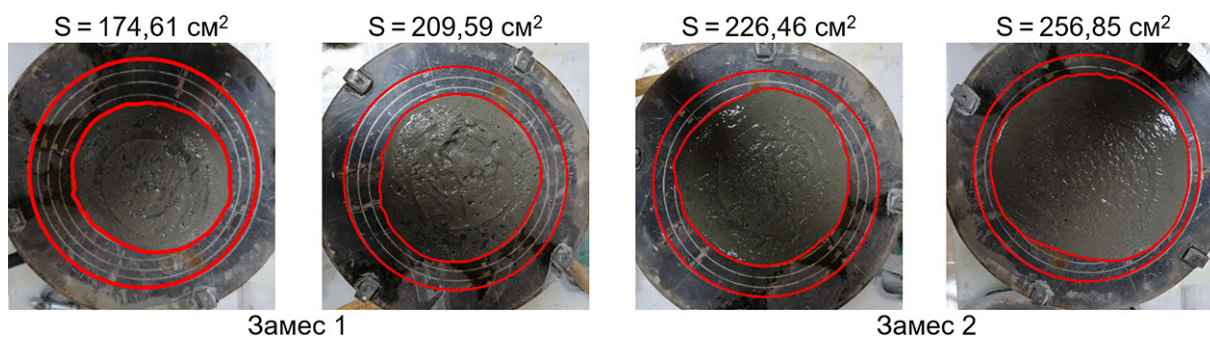


Рисунок 7 – Площадь распыла (соотношение цемента к золе 60/40)

носителю первого ($S_1^2 > S_1^1$, так же как и $S_2^2 > S_2^1$). Причиной может служить проявление цементной смеси тексотропных свойств, то есть изменение вязкости в состоянии покоя, которое имеет место быть в результате последовательного измерения.

Сравнения площадей последовательных измерений показали наличие общей зависимости, но отсутствие какого-либо закономерного изменения, о чем свидетельствуют коэффициенты корреляции: $R(S_1^2 > S_1^1; W_L) = -0,0618$; $R(S_2^2 > S_2^1; W_L) = 0,563$

Таблица 2 – Результаты измерений

Зола, Са, %	Площадь расплыва, см ² , замеса 1, при W _Л		Площадь расплыва, см ² , замеса 2, при W _Т		Абсолютный остаток вяжущего после испытаний, г		Остаток с учетом корректировки на В/Ц, г	
	Изм 1, S ₁ ¹	Изм 2, S ₁ ²	Изм 1, S ₂ ¹	Изм 2, S ₂ ²	Замес 1	Замес 2	Замес 1, R ₁	Замес 2, R ₂
0	234,18	269,38	363,34	387,20	90	120	90	102
4	223,41	261,72	344,23	375,80	123	147	123	129
8	215,15	251,95	324,42	351,36	145	175	145	157
10	211,30	243,23	318,69	339,47	155	180	155	162
20	195,15	226,78	268,94	298,24	210	225	210	207
30	180,55	218,29	236,85	277,73	250	275	250	257
40	174,61	209,59	226,46	256,85	285	300	285	282

Таблица 3 – Данные для анализа результатов

Зола, Са, %	Приращение воды по W _Л и W _Т		Показатели для оценки закономерностей между параметрами таблицы 2			
	Абсолютное, г	Относительное, %	S ₁ ² – S ₁ ¹	S ₂ ² – S ₂ ¹	S ₁ ² – S ₁ ¹	S ₂ ² – S ₂ ¹
0	0	0	35,20	23,86	129,16	117,82
4	3,0	0,75	38,31	31,57	120,82	114,08
8	3,0	0,75	36,80	26,94	109,27	99,41
10	1,5	0,75	31,93	20,77	107,40	96,24
20	7,5	0,75	31,63	29,30	73,79	71,46
30	7,5	0,75	37,74	40,88	56,30	38,56
40	7,5	0,75	34,98	30,39	51,85	68,14

(S и W – массивы колонок таблицы 2).

При сравнении площадей, соответствующих нижнему и верхнему показателям водоцементного соотношения, наблюдается обратная зависимость изменения площадей по увеличению процентного содержания золы (тенденция уменьшения разницы), о чем свидетельствуют отрицательные значения коэффициентов корреляций: $R(S_2^1 > S_1^1; W_L) = -0,977$; $R(S_2^2 > S_2^1; W_T) = 0,865$ (S и W – массивы колонок таблицы 1). При этом аналогичная тенденция сохраняется как для первых измерений, так и для вторых. Причиной уменьшения площади растекания с увеличением зольной концентрации может быть абсорбирующий эффект золы, как и в случае со сравнением изменений площадей S_i по пропорциональному увеличению водоцементного соотношения W_i (в диапазоне зольной концентрации от 0 до 40%).

По сравнению остатков вяжущего после проведения испытаний, в пределах каждого из замесов можно сделать косвенные предположения об изменении плотности материала от увеличения процентного содержания зольного компонента. Если сравнивать все частные значения изменений остатков вне зависимости от замеса, то необходимо учесть корректировку (таблица 2) массы остатка на увеличение В/Ц соотношения. Представленные в таблице 2 результаты частных зна-

чений остатков свидетельствуют об увеличении пористости смеси с увеличением золы, при этом наблюдается тесная пропорциональная закономерность, о чем свидетельствуют максимально приближенные к 1,0 значения коэффициентов вариаций: $R(C_a; R_1) = -0,993$; $R(C_a; R_2) = 0,992$ (C_a и R – массивы колонок таблицы 2). Погрешность (разница остатков), которая наблюдается между частными значениями R₁ и R₂ можно объяснить высокой степенью вязкости и клейкости смесей замесов 1 относительно замесов 2, из-за чего возможны потери по массе в процессе штыкования и формовки образцов.

На рисунке 8а представлены результаты полученных водовяжущих соотношений по изменению процентного содержания зольного компонента, на рисунке 8б – зависимость абсолютных значений приращения зольного компонента (по массе) по абсолютным значениям приращений воды (по массе). По анализу распространения кривой зависимости рисунка 8а и 8б можно сделать вывод об относительно линейной закономерности между приращением зольной концентрации и потребностью воды (о чем свидетельствует высокий показатель коэффициент детерминации $R^2 = 998$ – в пределах анализа первых замесов и $R^2 = 9932$ – в пределах анализа вторых замесов). Пропорциональность зависимости водовяжущей

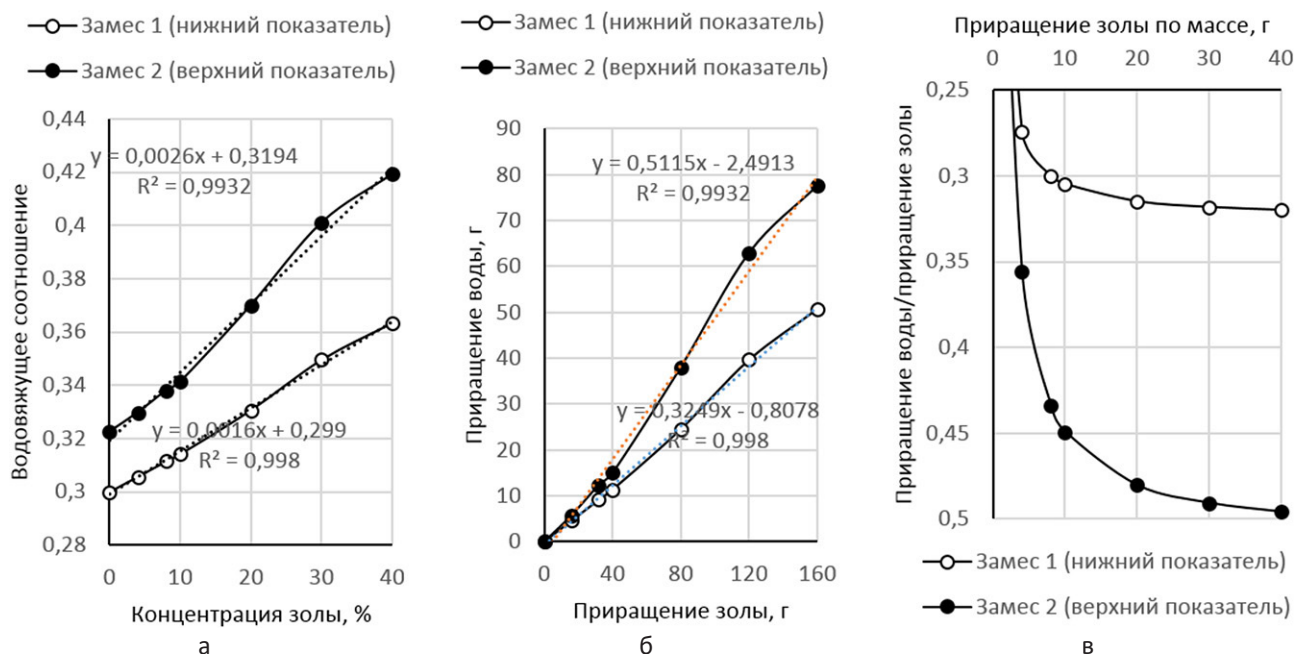


Рисунок 8 – Зависимости приращения воды по приращению золы

го соотношения по золной концентрации представлено зависимостью на рисунке 8в, где по оси ординат отображено приращение золы по отношению к цементу, по оси абсцисс – отношение приращения воды по приращению золы по массе. Полученные кривые свидетельствуют о неравномерном приращении воды по приращению золного компонента, при этом потребность воды с каждым разом увеличивается при увеличении золного компонента.

Выводы

- Результаты исследования подвижности смеси методом измерений расплыва подтвердили зависимость водяжающего соотношения от процентного содержания золного компонента. Зависимость имеет строгую закономерность, носит обратно пропорциональный линейный характер. Причиной зависимости (уменьшения площади расплыва по увеличению золной концентрации) могут быть абсорбирующие свойства золы. При этом абсорбция носит продолжительный характер и проявляется на протяжении всего периода твердения, о чем свидетельствуют результаты сравнений последовательных измерений 1 и 2.

- Сравнения же измерений между собой (из-

мерений 1 относительно измерений 2) в обоих замесах (соответствующих верхнему и нижнему показателю водяжающего соотношения) показали проявление реологических и тексотропных свойств затворенного водой вяжущего, поскольку результаты вторых измерений (во всех случаях) показали большие площади расплывов относительно первых. Однако сравнивая данные соотношения (расплывов измерений относительно друг друга) по изменению содержания золы, можно сделать вывод о влиянии золного компонента на реологические и тексотропные свойства вяжущего, а следовательно, изменения вязкости по истечению времени. Последнее становится актуальным при повышенном требовании к удобоукладываемости бетонной смеси в процессе производства бетонных работ.

- В процессе исследования была выявлена множественная зависимость: изменение вязкости смеси по содержанию золного компонента и по истечению времени. Для решения поставленной задачи необходимы дополнительные исследования оценки изменения вязкости по времени. Наиболее подходящим лабораторным методом представляется адаптация испытания по определению сроков схватывания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Arowojolu, O., Ibrahim, A., Almakrab, A., Saras, N., & Nielsen, R. (2021). Influence of shear span-to-effective depth ratio on behavior of high-strength reinforced concrete beams. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 15(1) doi:10.1186/s40069-020-00444-7
- Sosa, I., Tamayo, P., Sainz-Aja, J.A., Thomas, C., Setién, J., & Polanco, J.A. (2021). Durability aspects in self-compacting siderurgical aggregate concrete. *Journal of Building Engineering*, 39 doi:10.1016/j.jobbe.2021.102268
- Dolniak, J., Lištjak, M., Slaninka, A., & Nečas, V. (2019). DETERMINATION OF ACTIVITY PROFILE OF 137CS IN CONCRETE CORE

- SAMPLES. Radiation Protection Dosimetry, 186(2-3), 306-309. doi:10.1093/rpd/ncz223
4. Lotfi-Omran, O., Sadrmomtazi, A., & Nikbin, I.M. (2019). A comprehensive study on the effect of water to cement ratio on the mechanical and radiation shielding properties of heavyweight concrete. Construction and Building Materials, 229 doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.116905
 5. Комплексная модифицированная добавка для тяжелого бетона. Патент № 33533. Лукпанов Р.Е., Дюсембинов Д.С., Сабитов Е.Е.
 6. ГОСТ 310.4-81 Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии.

Модификацияланған қоспаны қолдана отырып, бетон құрамындағы күл-цемент қоспасының оңтайлы су байланыстырғышын анықтау

¹*ЛУКПАНОВ Рауан Ермагамбетович, PhD, профессор, директор, rauan_82@mail.ru,

¹ДЮСЕМБИНОВ Думан Серикович, т.ғ.к., доцент, dussembinov.duman@mail.ru,

¹ЕНКЕБАЕВ Серик Бейсенғалиевич, PhD, бас маман, Yenkebayev-serik@mail.ru,

¹ЦЫГУЛЕВ Денис Владимирович, т.ғ.к., доцент, denis_riza_72@mail.ru,

¹«Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Астана, Сәтпаев көшесі, 2,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Мақалада бетон құрамындағы цемент-күл байланыстырғышын кешенді модификацияланған қоспаны (KMD) қолдана отырып зерттеулер келтірілген. Зерттеулер бетон жұмыстарын өндіру жағдайларын жақсартуға, атап айтқанда күл-цемент байланыстырғыштары негізінде бетон қоспасының ыңғайлылығын жақсартуға бағытталған. Зерттеудің негізгі бағалау критерийі су тұтқырлығы өзгерген кезде композицияның тұтқырлығының өзгеруі болды. Өлшеулер екі кезеңде жүргізілді: бірінші кезеңде күл компонентінің су байланыстырғышқа әсері бағаланды, екінші кезеңде уақыт өткеннен кейін тұтқырлықтың өзгеруі қарастырылды. Зертханалық зерттеулер қоспаның бұлыңғырлығын өлшеу және орнату уақытын анықтаудың бейімделген әдістерімен жүргізілді. Бірінші кезеңнің нәтижелері бойынша су құрамының өзгеруіне байланысты қоспаның тұтқырлығының өзгеру заңдылықтары алынды, күл компонентінің пайызына байланысты судың тұтқырға оңтайлы қатынасы алынды.

Кілт сөздер: цемент, күл, қоспа, байланыстырғыш, бетон, тұтқырлық, су байланыстырғыш, су цементтік қатынасы, қоспаның бұлыңғырлануы, орнату мерзімі.

Determination of the Optimum Water-binder Ratio of Ash-cement Mixture in the Composition of Concrete with the Use of a Modified Additive

¹*LUKPANOV Rauan, PhD, Professor, Director, rauan_82@mail.ru,

¹DYUSSEMBINOV Duman, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, dussembinov.duman@mail.ru,

¹YENKEBAYEV Serik, PhD, Chief Specialist, Yenkebayev-serik@mail.ru,

¹TSYGULYEV Denis, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, denis_riza_72@mail.ru,

¹NPJSC «L.N. Gumilyov Eurasian National University», Kazakhstan, Astana, Satpayev Street, 2,

*corresponding author.

Abstract. The article presents studies of cement-ash binder in the composition of concrete with the use of complex modified additive (CMD). The research aims to improve the conditions of concrete works production, in particular, to improve the workability of concrete mixture based on ash-cement binders. The main evaluation criterion of the research was the change in the viscosity of the composition when changing the water-binder ratio. The measurements were made in two phases: the first one evaluated the effect of the ash component on the water-binder ratio and the second one dealt with the viscosity change over time. Laboratory tests were carried out with the adapted methods for measuring the flow of the mixture and the determination of the setting time. According to the results of the first stage, patterns of changes in the viscosity of the mixture by changing the water content were obtained, the optimum ratio of water to binder depending on the percentage of the ash component was obtained. According to the results of the second stage, patterns of viscosity changes (from liquid to solid state) of the mixture according to curing time, depending on the same percentage ratio of ash are obtained. In conclusion, data on the optimum water-binder ratio are given from the conditions of ash-cement mixture displaying textotropic properties corresponding to the classical cement mixture without ash inclusion.

Keywords: cement, ash, mixture, binder, concrete, viscosity, water-cement ratio, water-cement ratio, mixture flow, setting time.

REFERENCES

1. Arowojolu, O., Ibrahim, A., Almakrab, A., Saras, N., & Nielsen, R. (2021). Influence of shear span-to-effective depth ratio on behavior of high-strength reinforced concrete beams. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 15(1) doi:10.1186/s40069-020-00444-7
2. Sosa, I., Tamayo, P., Sainz-Aja, J.A., Thomas, C., Setién, J., & Polanco, J.A. (2021). Durability aspects in self-compacting siderurgical aggregate concrete. *Journal of Building Engineering*, 39 doi:10.1016/j.job.2021.102268
3. Dolniak, J., Lištjak, M., Slaninka, A., & Nečas, V. (2019). DETERMINATION OF ACTIVITY PROFILE OF 137CS IN CONCRETE CORE SAMPLES. *Radiation Protection Dosimetry*, 186(2-3), 306-309. doi:10.1093/rpd/ncz223
4. Lotfi-Omran, O., Sadrmomtazi, A., & Nikbin, I. M. (2019). A comprehensive study on the effect of water to cement ratio on the mechanical and radiation shielding properties of heavyweight concrete. *Construction and Building Materials*, 229 doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.116905
5. [Kompleksnaya modifitsirovannaya dobavka dlya tyazhologo betona] Complex modified additive for heavy concrete. Patent no. 33533. Lukpanov R.E., Dyusembinov D.S., Sabitov E.E.
6. GOST 310.4-81 [Tsement. Metody opedeleniya predela prochnosti pri izgibe i szhatii]. Cements. Methods for determination of flexural and compressive strength.