

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2021, №5, Том 13 / 2021, No 5, Vol 13 <https://esj.today/issue-5-2021.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/52SAVN521.pdf>

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Ибе, Е. Е. Предпосылки использования многокомпонентных вяжущих на основе зол-унос для бетонов ультравысоких технологий / Е. Е. Ибе, Г. Н. Шibaева, С. Е. Миронов, Д. А. Литвин // Вестник евразийской науки. — 2021. — Т. 13. — № 5. — URL: <https://esj.today/PDF/52SAVN521.pdf>

**For citation:**

Ibe E.E., Shibaeva G.N., Mironov S.E., Litvin D.A. Conditions for the use of multicomponent fly ash-based binders for Ultra High Performance Concrete. *The Eurasian Scientific Journal*, 13(5): 52SAVN521. Available at: <https://esj.today/PDF/52SAVN521.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.).

**Ибе Екатерина Евгеньевна**

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Абакан, Россия  
Доцент

Кандидат технических наук

E-mail: [Katerina.ibe@mail.ru](mailto:Katerina.ibe@mail.ru)

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=649187](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=649187)

Google Scholar: <https://scholar.google.ru/citations?user=vN6KIQ4AAAJ>

**Шibaева Галина Николаевна**

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Абакан, Россия  
Доцент

Заведующая кафедрой «Строительство»

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: [shibaevagn@mail.ru](mailto:shibaevagn@mail.ru)

**Миронов Святослав Евгеньевич**

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Абакан, Россия  
Студент

E-mail: [miks0070@mail.ru](mailto:miks0070@mail.ru)

**Литвин Данил Андреевич**

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Абакан, Россия  
Студент

E-mail: [danillitvin2435@gmail.com](mailto:danillitvin2435@gmail.com)

## **Предпосылки использования многокомпонентных вяжущих на основе зол-унос для бетонов ультравысоких технологий**

**Аннотация.** В настоящее время большой интерес в мировой промышленности обращен в сторону создания высокопрочных и высокофункциональных бетонов, обладающих повышенными эксплуатационными свойствами. Создание бетонов подобного рода является задачей, требующей комплексного подхода: разработка вяжущего, разработка оптимального состава, обеспечивающего наиболее плотную упаковку, а также разработка технологических регламентов на производство работ. На каждом этапе требуется учесть ряд особенностей, возникающих при твердении и эксплуатации таких бетонов — минимальное водоцементное отношение, приводящее к значительной усадке, повышенная текучесть смеси, необходимая для литьевой технологии. Данные факторы создают необходимость в первую очередь рассмотреть вопрос создания вяжущего, обладающего наилучшими показателями.

Анализируя многочисленный научный опыт в области бетонов ультравысоких технологий, можно отметить, что основной проблемой, с которой сталкиваются авторы, являются усадочные деформации цементного камня.

В статье рассмотрена возможность создания композиционного вяжущего на основе портландцементного клинкера и активных минеральных добавок, содержащих высококальциевую золу-унос и карбонатсодержащий компонент. Показано, что золосодержащие цементы характеризуются спадом прочности, а составы с комплексными добавками незначительно расходятся с показателями контрольного состава.

В работе представлены результаты влияния золосодержащих добавок на показатели пористости и собственные деформации цементного камня. Показано, что применение золы-унос совместно с карбонатсодержащей добавкой увеличивает плотность цементного камня по отношению к контрольному составу за счет формирования определенного состава продуктов гидратации, коагулирующих поры. Влияние золы-унос также отражается в динамике развития собственных деформаций цементного камня. Отмечено, что применение комплексной минеральной добавки позволяет создать эффект расширения, компенсирующий усадку цементного камня в оптимальном диапазоне.

**Ключевые слова:** цемент; зола-унос; комплексная минеральная добавка; собственные деформации цементного камня; бетоны ультравысоких технологий; плотность; прочность

## Введение

Бетон, как основной конструкционный материал гражданского и промышленного строительства, изучается в строительном материаловедении непрерывно. В настоящее время большой интерес в мировой промышленности обращен в сторону создания высокопрочных и высокофункциональных бетонов, обладающих повышенными эксплуатационными свойствами. Такой интерес обусловлен, в первую очередь, развитием архитектуры зданий и сооружений, основанном на возведении уникальных объектов. Объекты подобного класса требуют разработки специальных материалов, в том числе бетонов ультравысоких технологий.

Анализируя многочисленный научный опыт в области бетонов ультравысоких технологий, можно отметить, что основной проблемой, с которой сталкиваются авторы, являются объемные изменения, вызванные усадкой.

Усадочные деформации бетонов традиционно классифицируют по механизмам протекания. Физическая усадка вызвана, в первую очередь, избытком воды затворения, постепенно испаряющейся из бетона и цементного камня. Данный процесс происходит медленно, на первом этапе испарение происходит из крупных полостей и пор, а затем из капилляров.

Процессы, происходящие при усадке на молекулярном уровне, называют химической усадкой. Гидраты, образующиеся при затворении портландцемента водой, занимают меньший объем, чем сумма объемов безводных соединений и воды. К химической усадке также относят явление контракции, которая отражает характер гидратации и твердения минеральных вяжущих, когда при возникновении гидратов образуется более плотное расположение атомов [1].

Термическая усадка обусловлена процессами тепловыделения при твердении бетона и в ряде случаев должна существенно контролироваться [2].

Авторам [3] приведен полный анализ причин усадочных деформаций цементного камня в бетоне. В работе показана еще одна составляющая общих усадочных деформаций бетона —

карбонизационная усадка. По мнению авторов, причиной карбонизационной усадки в процессе службы цементного камня являются химические реакции, протекающие при углекислотной коррозии и сопровождающиеся переходом части химически связанной воды в свободное состояние.

Бетоны ультравысоких технологий, в отличие от обычных тяжелых бетонов, отличаются очень низким водоцементным отношением и наличием суперпластификаторов. В таких условиях в процессе гидратации цемента возникает аутогенная усадка, протекающая в довольно быстрые сроки — от нескольких дней до нескольких недель [4].

Аутогенная усадка бетонов ультравысоких технологий имеет наибольшую составляющую от общей усадки при высыхании, причем применяемый режим твердения (ТВО или нормальное твердение) во многом обуславливают конечный результат [5].

Для снижения аутогенной усадки бетонов многими авторами в целом рекомендуется разработка оптимального соотношения цемент: заполнитель, применение пуццолановых добавок и микронаполнителей, обязательное наличие внешнего и внутреннего ухода за бетоном, применение молотого льда в качестве замены части воды затворения [6–8].

Подбор гранулометрического состава заполнителя — один из способов снижения усадочных деформаций. Влияние заполнителя на уменьшение усадки тем сильнее, чем меньше его способность к механическим деформациям, то есть чем выше модуль его упругости. При введении инертного заполнителя усадка уменьшается, но не пропорционально его количеству [9].

Совместно с вопросами об общем снижении усадки в цементных композициях рассматриваются методы компенсации усадки расширяющимися компонентами (минеральными добавками) [10].

Дисперсные минеральные наполнители, являющиеся отходами или побочными продуктами промышленности, активно используются в промышленности строительных материалов. По мнению многих авторов, подходить к вопросу выбора минеральных добавок в твердеющие цементные системы необходимо не только с позиции их непосредственного участия в процессе гидратации, но и с позиции теории создания плотной упаковки частиц в камне. Анализируя множество научных трудов относительно эффективности применения зол-унос в производстве бетонов, можно отметить её важные положительные качества — комбинация пуццоланической активности и способности работать как микронаполнитель, повышая плотность цементного камня. Оценка возможности использования зол-унос от сжигания углей КАТЭКа рассматривалась еще в 1970–1980 гг. [11; 12] Согласно современным работам [13; 14], зола-уноса может достаточно уменьшить аутогенную усадку в раннем возрасте бетона.

Изучение возможности использования золы-уноса как компонента вяжущего для изготовления бетонов ультравысоких технологий рассматривается в научной практике ряда стран [15; 16]. При этом в большинстве исследований рассматривается именно композиционное вяжущее, имеющее многокомпонентный состав минеральных добавок. В частности указанными авторами рассмотрены композиции, состоящие из золы-уноса и микрокремнезема, а также золы-уноса и метакаолина.

Необходимо отметить, что применение зол-уноса актуально рассматривать также с позиции экономической эффективности. Стоимость цементного вяжущего в составе любого бетона занимает долю более 40–50 %. Зола-унос как отход в данном случае позволяет снизить стоимость конечного продукта, при этом повышает экологичность материалов, поскольку для вяжущего требуется меньшее количество клинкера, вредные выбросы в атмосферу при производстве которого достигают огромных значений.

Основным недостатком зол-унос, препятствующим наиболее полному применению и разработке точных стандартов, является неоднородность химического состава. По этой причине необходимо исследовать каждую партию. Данная работа является частью комплексного исследования по разработке составов бетонов ультравысоких технологий на основе многокомпонентных минеральных добавок, содержащих отходы и побочные продукты промышленности Республики Хакасия.

### Методы исследований

В работе применялись портландцемент ОАО «Искитимцемент», зола-унос Абаканской ТЭЦ, карбонатсодержащая добавка, вода, песок строительный.

Химический состав клинкера портландцемента ОАО «Искитимцемент» представлен в таблице 1.

Таблица 1

#### Химический состав портландцементного клинкера

Содержание оксидов, мас. %					
SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>
21,58	66,7	5,66	4,01	1,32	0,53

*Разработано авторами*

Строительно-технические показатели золы-унос Абаканской ТЭЦ исследованы в соответствии с ГОСТ 34-70-542-2001 «Зола-унос тепловых электростанций. Нормативные характеристики» по ГОСТ 310.2-76, ГОСТ 310.3-76. Химический состав золы представлен в таблице 2.

Таблица 2

#### Химический состав зол от сжигания бурых углей на ТЭЦ г. Абакана

Проба	Содержание оксидов, масс. %											ППП, %	
	CaO		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>		MnO
	общ.	своб.											
1	37,38	8,23	31,42	9,47	9,63	3,16	8,34	2,08	0,45	0,16	0,17	0,30	0,58
2	30,98	6,91	36,24	6,64	9,45	0,68	6,85	3,36	0,39	0,21	0,41	0,17	2,57
3	37,38	8,23	41,44	7,16	11,76	0,04	7,23	2,56	0,44	0,26	0,40	0,16	0,54
4	32,21	7,00	35,24	6,22	12,46	-	8,05	2,48	0,30	0,14	0,48	0,30	2,05

*Разработано авторами*

Минеральные добавки измельчались в лабораторной шаровой мельнице. Тонкость помола контролировалась по остатку на сите № 008 (ГОСТ 310.2-76).

Определение нормальной плотности и сроков схватывания цемента проводились по ГОСТ 310.3-76.

Определение собственных деформаций в процессе твердения портландцементов выполнялось на образцах-балочках 40×40×160 мм с установкой реперов в торцах и контролем с помощью индикатора часового типа.

Содержание свободного гидроксида кальция (в пересчете на CaO) в составе продуктов гидратации композиционного портландцемента определялось растворением навески в спиртово-сахаратном растворе (10 % раствор сахарозы в 60 % растворе этилового спирта) с последующим титрованием фильтрата 0,1N HCl.

Для определения физико-механических характеристик изготавливались балочки из равноподвижных смесей базового состава с заменой части цемента золой-уноса или

композиционной добавкой, состоящей из золы-унос и карбонатсодержащего компонента. Активность золы проверяли как при твердении в естественных условиях, так и при пропаривании.

### Результаты и обсуждение

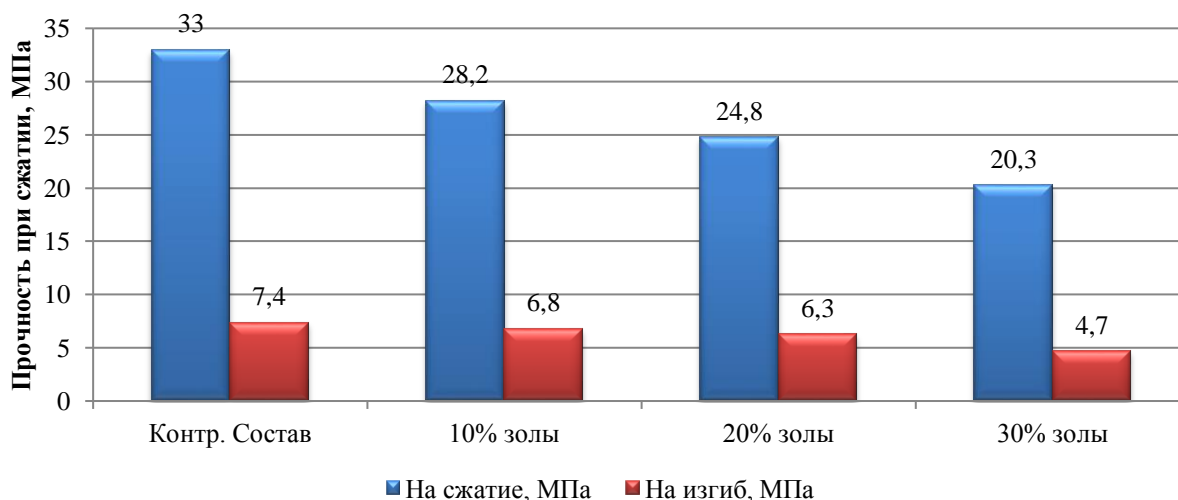
Результаты определения нормальной плотности и сроков схватывания вяжущего показывают, что введение золы-унос увеличивает НГ и снижает срок схватывания в незначительных пределах. При этом применение карбонатсодержащих добавок позволяет регулировать срок схватывания в сторону увеличения. Также отмечено, что композиционные добавки на основе золы-унос и карбонатсодержащего компонента повышают пластичность смеси в начальный период.

Испытание вяжущих на равномерность изменения объёма показали, что все составы на основе золы-унос Абаканской ТЭЦ выдерживают кипячение без деформаций (рис. 1).



**Рисунок 1.** Испытание золы на равномерность изменения объёма (разработано авторами)

Применение золы-унос в составе вяжущего приводит к снижению прочности пропорционально количеству вводимой золы в случае применения однокомпонентной добавки (рис. 2). В связи с этим для формирования необходимой прочности цементного камня требуется вводить повышенное содержание вяжущего.



**Рисунок 2.** Прочностные показатели цементно-золевых вяжущих (разработано авторами)

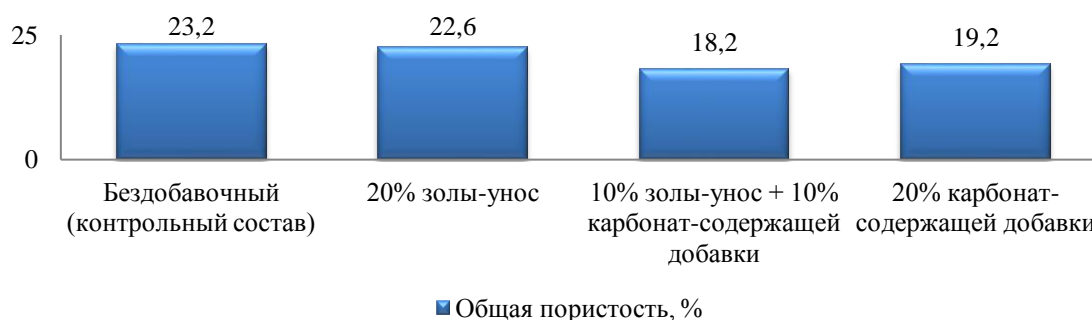
Введение карбонатсодержащей добавки в состав композиционного вяжущего приводит к изменению свойств цементного камня. Так как в золе присутствует свободный оксид кальция, то при затворении композиционного вяжущего водой в цементном тесте появляется известь, которая реагирует с основным минералом карбонатсодержащей добавки — кальцитом. Образуется основной карбонат кальция, выделяющийся в виде гелеобразных масс, обладающих адгезионными свойствами по отношению к заполнителю. Его можно представить как неоднородный раствор с неупорядоченной структурой, твердеющий при изменении соотношения компонентов.

Помимо реакции кальцита с известью в составе раствора, карбонатсодержащие добавки также могут реагировать с минералами портландцементного клинкера в растворе. Так можно отметить, что реакция кальцита с трехкальциевым алюминатом может идти по уравнению:



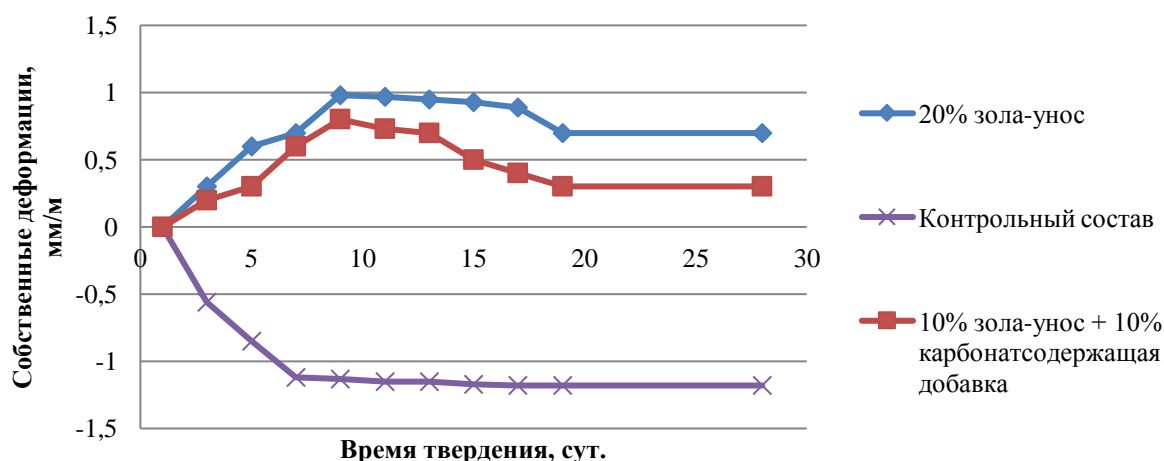
В результате реакции образуется гидрокарбоалюминат в кристаллическом виде.

В целом можно отметить, что при использовании композиционной активной минеральной добавки, состоящей из золы-уноса и карбонатсодержащего компонента, мы получили нужный эффект — увеличилась плотность цементного камня (рис. 3). Оценка плотности цементного камня изучалась по показателю пористости.



**Рисунок 3.** Зависимость пористости цементного камня в зависимости от состава вяжущего (разработано авторами)

Эффект снижения пористости обусловлен формированием дополнительных гелеобразных и кристаллических фаз, которые можно охарактеризовать как кольяматанты пор, что в итоге приведет к повышенной эксплуатационной надежности.



**Рисунок 4.** Собственные деформации цементного камня (разработано авторами)

В связи с тем, что для рассматриваемых бетонов необходимо обеспечить минимизацию усадочных деформаций, введение золы-унос может компенсировать усадку частичным расширением. При этом нельзя допустить значительного расширения, т. к. можно получить обратный эффект. Результаты определения собственных деформаций цементного камня приведены на рисунке 4.

Анализируя характер развития собственных деформаций, можно отметить, что усадочные деформации чистого бездобавочного цементного камня начинают замедляться в возрасте 7 суток и практически стабилизируются на 30 сутках. Добавка золы-унос в объеме 20 % приводит к расширению цементного камня до 0,7 мм/м. При этом использование комплексной добавки, состоящей из золы-унос и карбонатсодержащего компонента приводит к развитию собственных деформаций по аналогичной зависимости, но с меньшими показателями, что является наиболее оптимальным.

### Выводы

1. При разработке составов бетонов ультравысоких технологий основное внимание уделяется созданию плотной упаковки и минимальной пористости, а также снижению усадочных деформаций.
2. Перспективным с точки зрения эффективности и удешевления вяжущего является применение золы-унос в сочетании карбонатсодержащей добавкой, о чем свидетельствуют показатели пористости и собственных деформаций. Композиционная добавка позволяет снизить пористость и усадку, при этом вариация состава комплексной добавки может позволить достичь максимального эффекта.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Козлова В.К. Усадочные деформации строительных материалов и пути их снижения / В.К. Козлова, Е.В. Божок, В.В. Логвиненко [и др.] — DOI 10.31675/1607-1859-2018-20-5-140-155 // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2018. — Т. 20. — № 5. — С. 140–155.
2. Себелев И.М. Композиционные портландцементы для зимнего бетонирования / И.М. Себелев, А.М. Соколов, А.М. Маноха [и др.] // Ползуновский вестник. — 2014. — № 1. — С. 172–176.
3. Саркисов Ю.С. Влияние карбонатных добавок на усадочные деформации цементного камня / Ю.С. Саркисов, В.К. Козлова, Е.В. Божок [и др.] // Техника и технология силикатов. — 2018. — Т. 25. — № 1. — С. 7–11.
4. Гувалов А.А. Снижение аутогенной усадки высокопрочных бетонов / А.А. Гувалов, Т.В. Кузнецова // Техника и технология силикатов. — 2012. — Т. 19. — № 4. — С. 12–16.
5. Gowripalan N. Autogenous Shrinkage of Concrete at Early Ages / N. Gowripalan // 25th Australasian Conference on Mechanics of Structures and Materials / Singapore: Lecture Notes in Civil Engineering, Springer, 2020. URL: <https://izd-mn.com/pravila-i-primery-oformleniya-istochnikov.html> (дата обращения: 07.11.2021).

6. Xie T. Characterizations of autogenous and drying shrinkage of ultra-high performance concrete (UHPC): An experimental study / T. Xie, C. Fang, M.S. Mohamad Ali, P. Visintin // *Cement and Concrete Composites*. — 2018. — No 91. — pp. 156–173. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946518301495> (дата обращения: 02.11.2021).
7. М.А. Мосаберапанah Relationship between 28-days compressive strength and compression toughness factor of ultra high performance concrete using design of experiments / Mosaberpanah M.A., Eren O. // *Procedia Engineering*. — 2016. — No. 145. — pp. 1565–1571.
8. Варнаков М.Е. Вяжущие для высококачественных бетонов (UltraHigh-PerfomanceConcrette) в современном строительстве с добавлением молотого известняка и гиперпластификатора / М.Е. Варнаков // *Наука и молодежь*. — 2020. — С. 127–128.
9. Овчаренко Г.И. Безусадочные цементно-зольные композиции / Г.И. Овчаренко, Е.Ю. Хижинкова, Н.В. Музалевская, Т.С. Балабаева // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. — 2010. — № 9(621). — С. 20–25.
10. С.М. Corcella. Parameters influencing the performance of shrinkage-compensating concrete / Corcella C.M., Cereda C., Tavano S., Canonico F., Gastaldi D. // *American Concrete Institute, ACI Special Publication. Is. 289 SP, 2012. Pp. 43–57*. URL: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/51684253> (дата обращения: 02.11.2021).
11. Козлова В.К. Особенности производства клинкера при использовании золы ТЭЦ / В.К. Козлова // *Цемент*. — 1975. — № 11. — С. 20.
12. Овчаренко Г.И. Золой углей КАТЭКа в строительных материалах. Красноярск.: Изд-во Краснояр. Ун-та. — 1992.
13. Xie L. Influence of mineral admixtures on early-age autogenous shrinkage of high-performance concrete / L. Xie // *Applied Mechanics and Materials*. — 2014 / Vol. 457–458. 2014. Pp. 318–322. URL: <https://www.scientific.net/AMM.457-458.318> (дата обращения: 07.11.2021).
14. Pei-Wei G. Effects of fly ash on the properties of environmentally friendly dam concrete / Gao Pei-wei, Lu Xiao-lin, Lin Hui, Li Xiaoyan, Hou Jie // *Fuel*. — 2007. — No. 86. — Vol. 7–8. — pp. 1208–1211. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236106003929> (дата обращения: 07.11.2021).
15. Ferdosian I. High-volume fly ash paste for developing ultra-high performance concrete (UHPC) / I. Ferdosian, A. Camões, M. Ribeiro // *Ciência & Tecnologia dos Materiais*. — 2017. — Vol. 29. — No. 1. — pp. 157–161. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0870831217300423> (дата обращения: 07.11.2021).
16. Ahmed T. ECO-UHPC with High-Volume Class-F Fly Ash: New Insight into Mechanical and Durability Properties // *Journal of Materials in Civil Engineering*. — 2021. — No. 33. — Vol. 7. URL: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0003726> (дата обращения: 07.11.2021).



**Ibe Ekaterina Evgen'evna**

Siberian Federal University, Abakan, Russia

E-mail: [Katerina.ibe@mail.ru](mailto:Katerina.ibe@mail.ru)

RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=649187](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=649187)

Google Scholar: <https://scholar.google.ru/citations?user=vN6K1Q4AAAAJ>

**Shibaeva Galina Nikolaevna**

Siberian Federal University, Abakan, Russia

E-mail: [shibaevagn@mail.ru](mailto:shibaevagn@mail.ru)

**Mironov Svyatoslav Evgen'evich**

Siberian Federal University, Abakan, Russia

E-mail: [miks0070@mail.ru](mailto:miks0070@mail.ru)

**Litvin Danil Andreevich**

Siberian Federal University, Abakan, Russia

E-mail: [danilitvin2435@gmail.com](mailto:danilitvin2435@gmail.com)

## Conditions for the use of multicomponent fly ash-based binders for Ultra High Performance Concrete

**Abstract.** At present, the interest in the world industry is directed towards the creation of high-strength and highly functional concretes. The creation of such concretes is a task that requires an integrated approach: the development of a binder, the development of an optimal composition that provides the most dense structure, as well as the development of technological regulations. It is required to take into account a number of features that arise during the hardening and operation of such concretes — the minimum water-cement ratio, leading to significant shrinkage, the increased fluidity of the mixture, which is necessary for the technology. These factors create the need to first consider the creation of a binder with the best performance.

Analyzing the numerous scientific experience in the field of Ultra High Performance Concretes, it can be noted that the main problem faced by the authors is the shrinkage deformations of cement stone.

The article discusses the possibility of creating a composite binder based on Portland cement clinker and active mineral additives containing high-calcium fly ash and a carbonate component. It is shown that ash-containing cements are characterized by a decrease in strength, and compositions with complex additives slightly differ from the indicators of the control composition.

The paper presents the results of the influence of ash-containing additives on the porosity parameters and the intrinsic deformations of the cement stone. It is shown that the use of fly ash together with a carbonate additive increases the density of the cement stone in relation to the control composition due to the formation of a certain composition of hydration products that clog the pores. The influence of fly ash is also reflected in the dynamics of the development of deformations of the cement stone. It is noted that the use of a complex mineral additive makes it possible to create an expansion effect that compensates for the shrinkage of the cement stone in the optimal range.

**Keywords:** cement; fly ash; complex mineral additive; deformations of cement stone; Ultra High Performance Concrete; density; strength