

About the authors:

BELOV Nikita Alexandrovich – Student of the Department of Production of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: nikitka-belov-2001@bk.ru

KURYATNIKOV Yury Yuryevich – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Production of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: yuriy-k@yandex.ru

NOVICHENKOVA Tatiana Borisovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Products and Structures Production, Tver State Technical University, Tver. E-mail: tanovi.69@mail.ru

SMIRNOV Matvey Alexandrovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Products and Structures Production, Tver State Technical University, Tver. E-mail: matiu.sm@yandex.ru

УДК 691.587

ВЫСОКОПРОЧНЫЙ КЕРАМЗИТОБЕТОН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗОЛЫ-УНОСА

М.Д. Иванов, М.А. Смирнов, В.И. Трофимов, В.В. Белов

© Иванов М.Д., Смирнов М.А.,
Трофимов В.И., Белов В.В., 2024

***Аннотация.** В статье проанализировано влияние золы-уноса на физические, механические свойства, теплопроводность керамзитобетона. Рассмотрены методики по подбору состава для высокопрочного керамзитобетона.*

***Ключевые слова:** керамзитобетон, зола-уноса, высокопрочный керамзитобетон, состав, прочность, теплопроводность, суперплатификатор, легкий бетон, добавки.*

Введение

Один из основных методов выработки электроэнергии в России – сжигание твердого топлива (угля, сланца, торфа). Согласно данным 2020 г., на угольных ТЭС ежегодно образуется более 22 млн т золошлаковых отходов, в то время как уровень их потребления составляет менее 4 % . Это говорит о низком объеме утилизации отходов сжигания

твердого топлива, что является значимым вопросом в области экономии ресурсов. Остро стоящая на сегодняшний день проблема загрязнения окружающей среды и рационального природопользования может быть решена переработкой золошлаковых отходов.

Зола-уноса – несгораемый остаток минерального происхождения, который представляет собой мелкодисперсный порошок с размером частиц мельче 0,16 мм. Его можно задействовать во многих отраслях промышленности. В зависимости от различных факторов и присущих ей свойств, зола-уноса может использоваться в строительстве как добавка к цементу, бетону, вяжущим и теплоизоляционным материалам [1].

Керамзит – довольно прочный и легкий строительный материал, который обладает особой пористой структурой и производится способом обжига качественной легкоплавкой глины. Для изготовления изделий из такого материала применяется песок, вода и портландцемент. Изделия из керамзитобетона имеют высокие показатели прочности и низкую теплопроводность (табл. 1) [2]. При добавлении в керамзитобетон мелкодисперсной золы-уноса можно уменьшить расход цемента, а также улучшить многие механические и физические показатели бетона и бетонной смеси.

Повышение прочности керамзитобетона

Легкий бетон на пористых заполнителях представляет собой универсальный строительный материал, позволяющий при его рациональном использовании решать как актуальные задачи современного строительства, так и проблемы экологии и ресурсосбережения за счет утилизации технологических и техногенных отходов при изготовлении крупных и мелких пористых заполнителей [3].

На современном этапе основные усилия исследователей в области технологии бетонов направлены на повышение их прочности и долговечности. Однако не менее важным направлением развития является снижение материалоемкости и массы бетонных изделий и конструкций при сохранении их прочностных и эксплуатационных свойств, что в свою очередь позволяет повысить эффективность бетонов и, как следствие, строительства в целом.

Материалом, в полной мере удовлетворяющим всем вышеперечисленным требованиям, является конструкционный легкий бетон. Он обладает комплексом свойств, которые позволяют применять его в различных областях строительства – от жилищно-гражданского до дорожного, мостового и т.п. [4].

В работах [4, 5] анализируется влияние минеральных добавок на основные механические и физические свойства (табл. 1–6) легкого конструкционного бетона и повышение эксплуатационных свойств керамзитобетона класса В15.

Таблица 1

Характеристики контрольного состава керамзитобетона [4]

Показатель	Единица измерения	Величина
Расход материалов на 1 м ³ бетонной смеси		
Цемент	кг	322
Песок	кг	871
Керамзит	кг	345
Вода	л	235
Физико-механические характеристики		
Прочность при сжатии после тепловой обработки	МПа	13,8
Плотность после тепловой обработки	кг/м ³	1 693
Прочность при сжатии в возрасте 28 сут	МПа	19,5
Плотность в сухом состоянии	кг/м ³	1 590

Таблица 2

Характеристики составов керамзитобетона с микрокремнеземом [4]

Показатель	Единица измерения	Величина			
		Состав 1-1	Состав 1-2	Состав 1-3	Состав 1-4
Расход материалов на 1 м ³ бетонной смеси					
Цемент	кг	322	322	322	322
Песок	кг	882	880	884	884
Керамзит	кг	350	349	350	349
Вода	л	153	152	151	151
Дозировка микрокремнезема	%	5	10	15	20
Добавка микрокремнезема	кг	16	32	48	64
Добавка суперпластификатора	кг	17,84	18,61	19,52	20,38
Физико-механические характеристики					
Прочность при сжатии после тепловой обработки	МПа	20,2	22,5	24,9	27,1
Плотность после тепловой обработки	кг/м ³	1 702	1 714	1 725	1 739
Прочность при сжатии в возрасте 28 сут	МПа	28,9	32,2	35,6	38,7
Плотность бетона в сухом состоянии	кг/м ³	1 606	1 617	1 628	1 642

Таблица 3

Характеристики составов керамзитобетона
с высокоактивным метакаолином [4]

Показатель	Единица измерения	Величина состава			
		2-1	2-2	2-3	2-4
Расход материалов на 1 м ³ бетонной смеси					
Цемент	кг	322	321	323	322
Песок	кг	880	879	883	881
Керамзит	кг	349	348	350	349
Вода	л	186	186	187	187
Дозировка микрокремнезема	%	5	10	15	20
Добавка микрокремнезема	кг	16	32	48	64
Добавка суперпластификатора	кг	5,63	5,89	6,1	6,36
Физико-механические характеристики					
Прочность при сжатии после тепловой обработки	МПа	18,9	21,3	24,5	28,5
Плотность после тепловой обработки	кг/м ³	1 707	1 722	1 735	1 749
Прочность при сжатии в возрасте 28 сут	МПа	27,0	30,5	35,2	40,7
Плотность в сухом состоянии	кг/м ³	1 610	1 624	1 637	1 650

Таблица 4

Характеристики составов керамзитобетона
в зависимости от количества добавки “MasterPolyNeed 3040” [5]

Показатель	Номер состава						
	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7
Расход воды, л	153	149	145	142	139	135	132
Расход добавки, %	0,3	0,55	0,85	1,15	1,4	1,7	2,0
Прочность после ТВО, МПа	15,4	15,8	18,1	19,5	20,5	22,0	23,4
Прочность в возрасте 28 сут, МПа	22,0	24,0	25,8	27,9	29,3	31,4	33,5
Плотность бетонной смеси, кг/м ³	1 702	1 704	1 707	1 709	1 712	1 714	1 716
Плотность в сухом состоянии, кг/м ³	1 597	1 601	1 605	1 610	1 613	1 616	1 620

Таблица 5

Характеристики составов керамзитобетона
в зависимости от количества добавки «Полипласт СП-1» [5]

Показатель	Номер состава						
	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7
Расход воды, л	175	176	176	175	175	175	175
Расход добавки, %	0,35	0,43	0,51	0,58	0,65	0,72	0,80
Прочность после ТВО, МПа	16,1	17,8	19,4	20,9	22,6	24,2	25,6
Прочность в возрасте 28 сут, МПа	23,1	25,4	27,8	29,9	32,2	34,6	36,7
Плотность бетонной смеси, кг/м ³	1 718	1 725	1 728	1 725	1 725	1 727	1 738
Плотность бетона в сухом состоянии, кг/м ³	1 601	1 605	1 610	1 613	1 617	1 621	1 624

Таблица 6

Характеристики составов керамзитобетона
в зависимости от количества добавки «Muraplast FK 49» [5]

Показатель	Номер состава						
	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7
Расход воды, л	187	186	186	184	183	182	181
Расход добавки, %	0,2	0,5	0,8	1,1	1,4	1,7	2,0
Прочность после тепловлажностной обработки, МПа	16,0	16,9	17,7	18,2	18,7	19,1	19,4
Прочность в возрасте 28 сут, МПа	22,9	24,0	25,1	26,0	26,8	27,5	28,3
Плотность бетонной смеси, кг/м ³	1 728	1 731	1 736	1 738	1 740	1 748	1 750
Плотность в сухом состоянии, кг/м ³	1 600	1 602	1 604	1 606	1 608	1 609	1 612

Из приведенных в табл. 4–6 данных наибольший интерес представляет зависимость прочности от дозировки мелкодисперсных добавок.

В работе [5] проведены исследования влияния различных добавок суперпластификаторов на изменение свойств керамзитобетонных смесей и керамзитобетонов.

Авторами [6] отмечена возможность использования керамзита в качестве звукоизолятора в строительных конструкциях. Сделан вывод о том, что кладка из керамзитобетонных блоков обеспечивает звукоизоляцию между жилыми помещениями. Кроме того, керамзитобетонные блоки класса В5 могут применяться в малоэтажном строительстве, а возведение цоколя одноэтажных домов возможно при использовании керамзитобетонных блоков марок В7,5. Для монолитного строительства расход цемента 220 кг/м^3 отвечает требованиям по средней плотности и прочности для верхних этажей зданий, расход 250 кг/м^3 – для нижних этажей, а для наружных стен цоколя рекомендованный расход цемента составляет 280 кг/м^3 [6].

В работе [7] теплопроводность жаростойкого керамзитобетона определяли по методике ВНИПИ Теплопроекта, а коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР) находили при помощи кварцевого емкостного дилатометра на базе института физики ДНЦ РАН (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид установки для определения теплопроводности бетона (слева) и установки для определения КЛТР жаростойкого керамзитобетона (справа) [8]

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента теплопроводности исследованного жаростойкого керамзитобетона от температуры нагрева (Э и Б – соответственно с предварительным форсированным электроразогревом смеси и без него; 950, 1 250, 1 350, 1 550 – температуры, °С, принимаемые по табл. 5.6 СП 27.13330.2017 [8]).

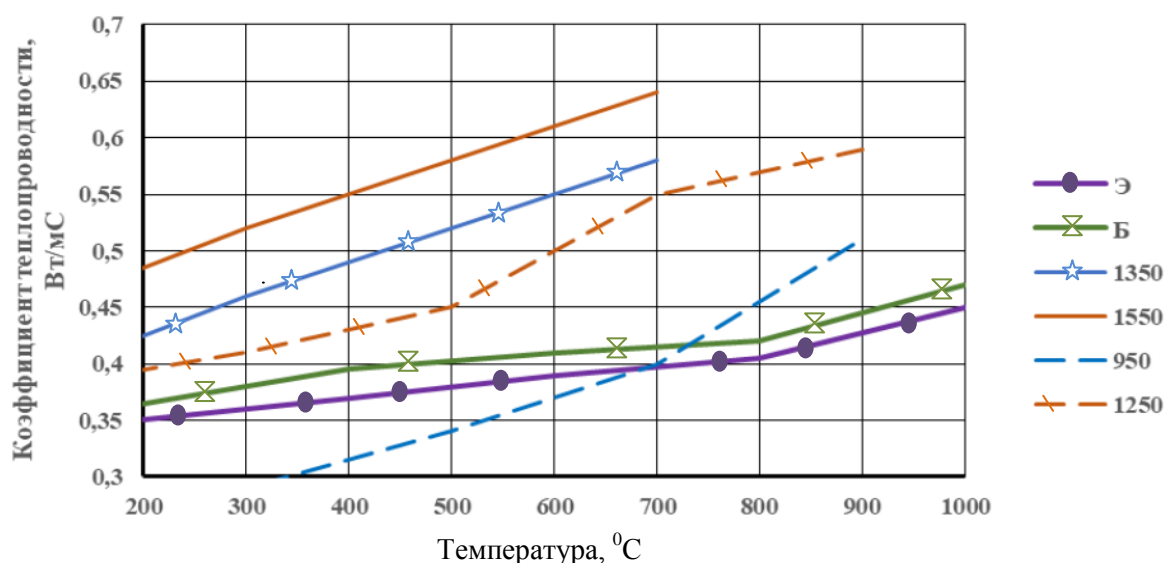


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности жаростойкого керамзитобетона от температуры нагрева

Из представленных на рис. 2 данных очевидно существенное качественное различие закономерности изменения величины коэффициента линейного термического расширения от температуры нагрева исследованного жаростойкого керамзитобетона со средней плотностью $1\,450 \dots 1\,500 \text{ кг/м}^3$ в сравнении с данными СП 27.13330.2017 для составов № 23, 24 по табл. 5.1. Увеличение теплопроводности исследованных бетонов при повышении температуры до $1\,000 \text{ }^\circ\text{C}$ составило $29 \dots 34 \%$, тогда как для состава № 24 по табл. 5.1 СП 27.13330.2017 при росте температуры до $900 \text{ }^\circ\text{C}$ повышение составляет $55 \dots 90 \%$ [7].

Для улучшения характеристик бетонной смеси используют модифицирующие добавки, которые основаны на изменении структуры бетона посредством химического, физического и физико-химического взаимодействия.

Выделяют следующие основные добавки для получения легкого бетона [8]:

поризующие – вещества, способствующие снижению средней плотности благодаря образованию в теле бетона воздушных и других газообразных пор;

воздухововлекающие – поверхностно-активные вещества, способствующие созданию в бетонной смеси микропузырьков размерами $0,015 \dots 0,030 \text{ мм}$, которые выполняют роль смазки и облегчают взаимное перемещение заполнителей. К ним относятся древесная смола, клей таловый, омыленный таловый пек, сульфонол;

пенообразующие – поверхностно-активные вещества для получения технической пены определенной консистенции, которая используется в

производстве бетонов ячеистой или поризованной структуры. К таким добавкам относятся «Морпен», «Пеностром», ТЭАС, жидкостекольный и клеенекалевый пенообразователи;

газообразующие – вещества, способствующие возникновению в бетонной смеси замкнутых пор, равномерно распределенных по всему объему раствора. В бетоне образуется до 2 % микропузырьков, чем достигается частичная гидрофобизация внутренней поверхности пор.

В качестве заполнителя в работе [8] предложено использовать керамзит. Материал имеет низкий вес и применяется в производстве крупногабаритных изделий. Керамзитобетон является единственным представителем легких бетонов, не поддающимся усадке. Пропорции сырья для керамзитобетона различной плотности приведены ниже [8]:

Плотность керамзитобетона	Цемент кг	Керамзит насыпной плотностью			Песок кг	Вода л
		кг/м ³	кг	м ³		
1 000	250	700	720	–	–	140
1 500	430	700	–	0,8	420	
1 600	430	600	–	0,68	680	
1 600	400	700	–	0,72	640	
1 700	410	600	–	0,56	880	
1 700	380	700	–	0,62	830	

Для создания высокопрочных бетонов используются модификаторы, наиболее распространенными являются армирующие (металлическая фибра, базальтовые или полимерные микроволокна) и демпфирующие (добавки на эпоксидной основе, добавки из резины и каучуков) добавки, которые за счет снижения деформаций, развивающихся при эксплуатационных нагрузках, способствуют повышению прочностных свойств бетона (табл. 7) [8].

В работе [9] результаты экспериментальной оценки механического поведения конструкционного керамзитобетона по продольным и поперечным деформациям представлены на диаграмме осевого сжатия с однократной разгрузкой опытных образцов с уровня напряжения $0,6-0,7 R_{пр}$ (расчетное сопротивление бетона осевому сжатию) с целью определения гистерезиса кривых продольной и поперечной деформаций и работы разрушения опытных образцов по пластической составляющей этих деформаций (рис. 3–5).

На рис. 6–8 приведены графические зависимости поперечных деформаций сравниваемых серий керамзитобетона также с однократной разгрузкой диаграммы сжатия и оценкой деформационных особенностей петли гистерезиса поперечной деформации.

Таблица 7

Вид и расход модифицирующих добавок для получения высокопрочного легкого бетона [8]

Модификатор	Характеристики	Распределение	Расход, % от массы цемента
Фибра полипропиленовая	$l = 12 \text{ мм}$ $d < 30 \text{ мкм}$	В объеме	0,7–1,3
Фибра базальтовая	$l = 12 \text{ мм}$ $d < 30 \text{ мкм}$	В объеме	0,7–1,3
Резиновая крошка	$r < 0,75 \text{ мм}$	В объеме	0,7–1,3
Углеродные нанотрубки	$l < 5 \text{ мкм}$ $d = 15 \text{ нм}$	По поверхности наполнителя	0,004–0,011
Комплексный наноразмерный модификатор “BisNanoActivus”	$r < 0,25 \text{ мм}$	По поверхности наполнителя	0,9–1,7

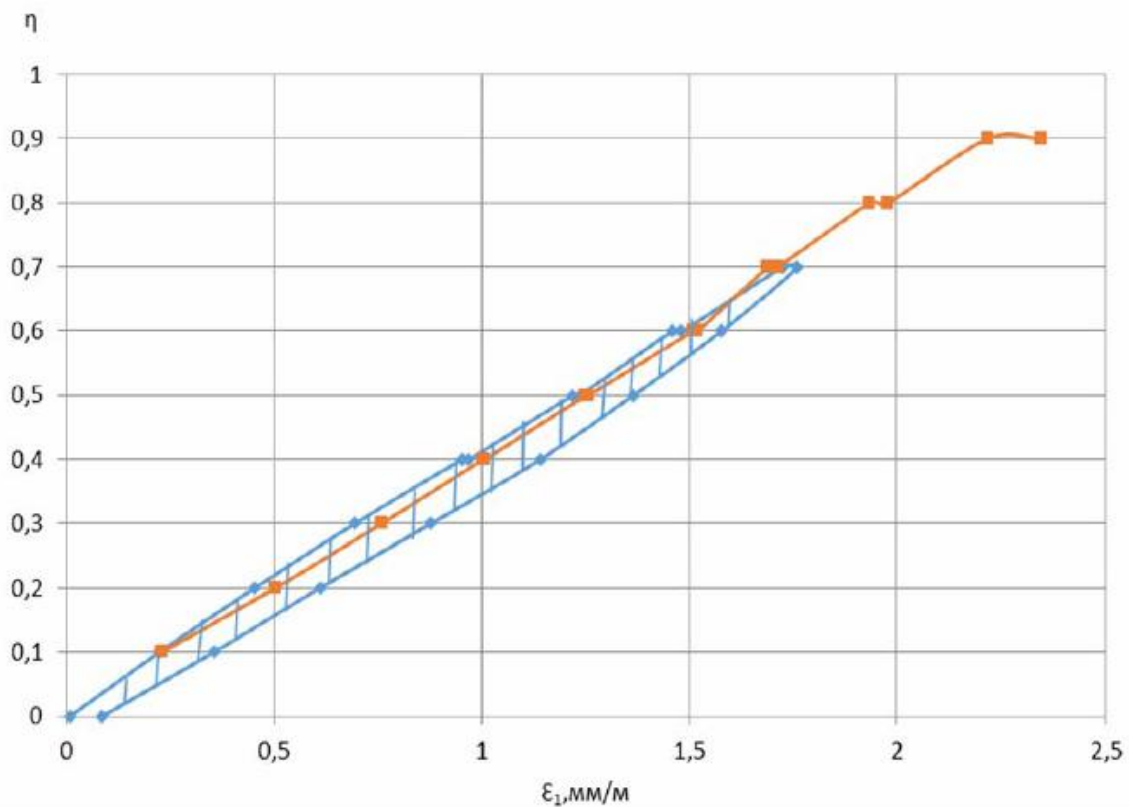


Рис. 3. Продольная деформативность керамзитобетона контрольной серии при осевом сжатии до разрушения: $R_{пр} = 25 \text{ МПа}$; $\rho = 1\,463 \text{ кг/м}^3$ [9]

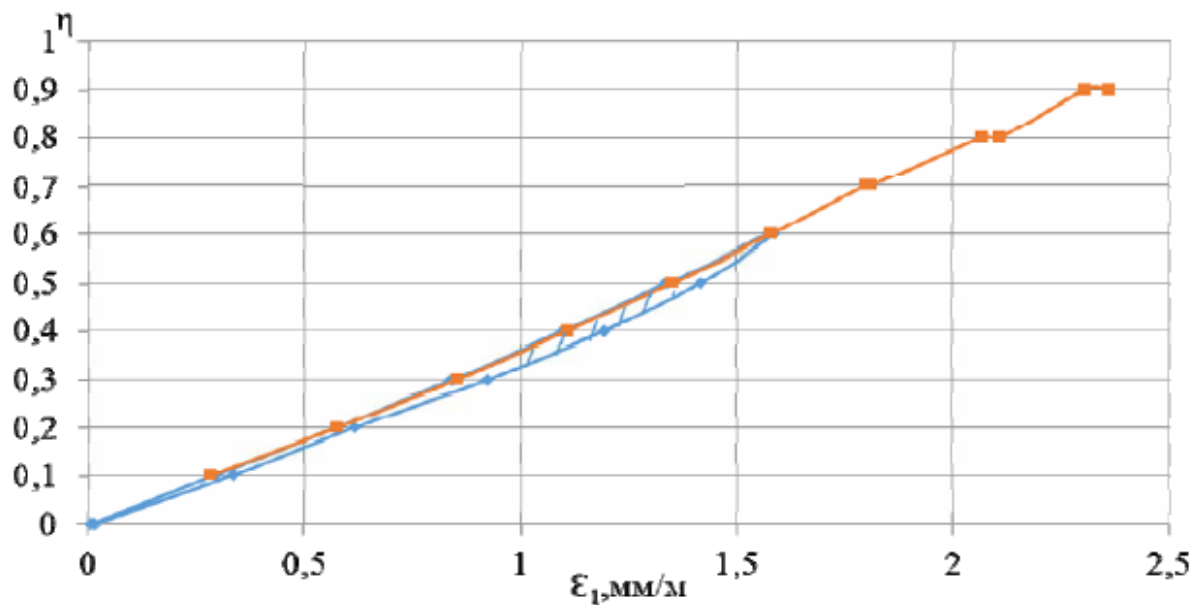


Рис. 4. Продольная деформативность керамзитобетона второй серии, испытанного сразу после разгрузки, на ползучесть:
 $R_{np} = 26,5$ МПа; $\rho = 1\,490$ кг/м³ [9]

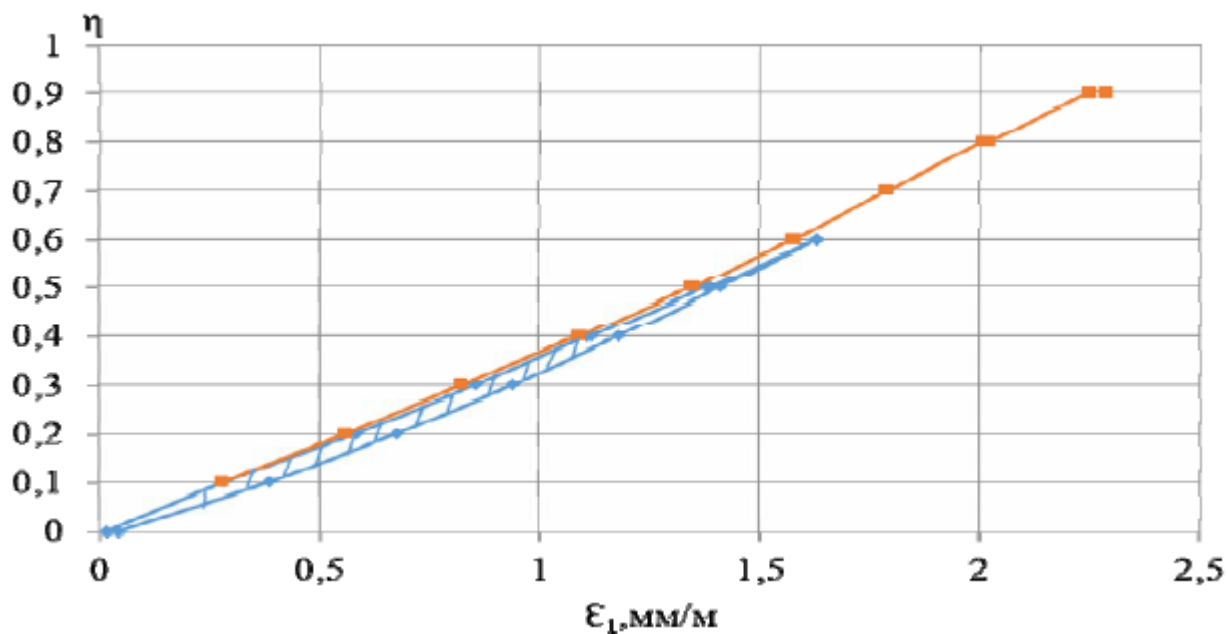


Рис. 5. Продольная деформативность керамзитобетона третьей серии, испытанного на седьмой день после разгрузки, на ползучесть:
 $R_{np} = 26$ МПа; $\rho = 1\,490$ кг/м³ [9]

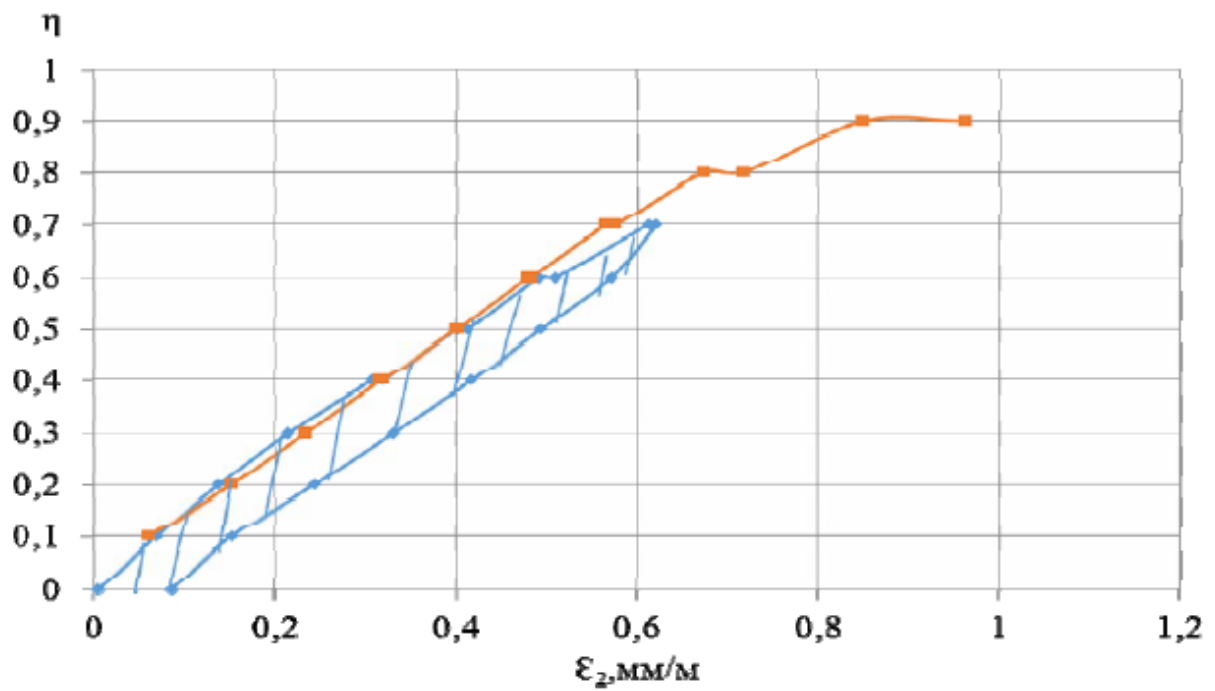


Рис. 6. Поперечная деформативность керамзитобетона контрольной серии при осевом сжатии после усадки: $R_{пр} = 25$ МПа; $\rho = 1\,463$ кг/м³ [9]

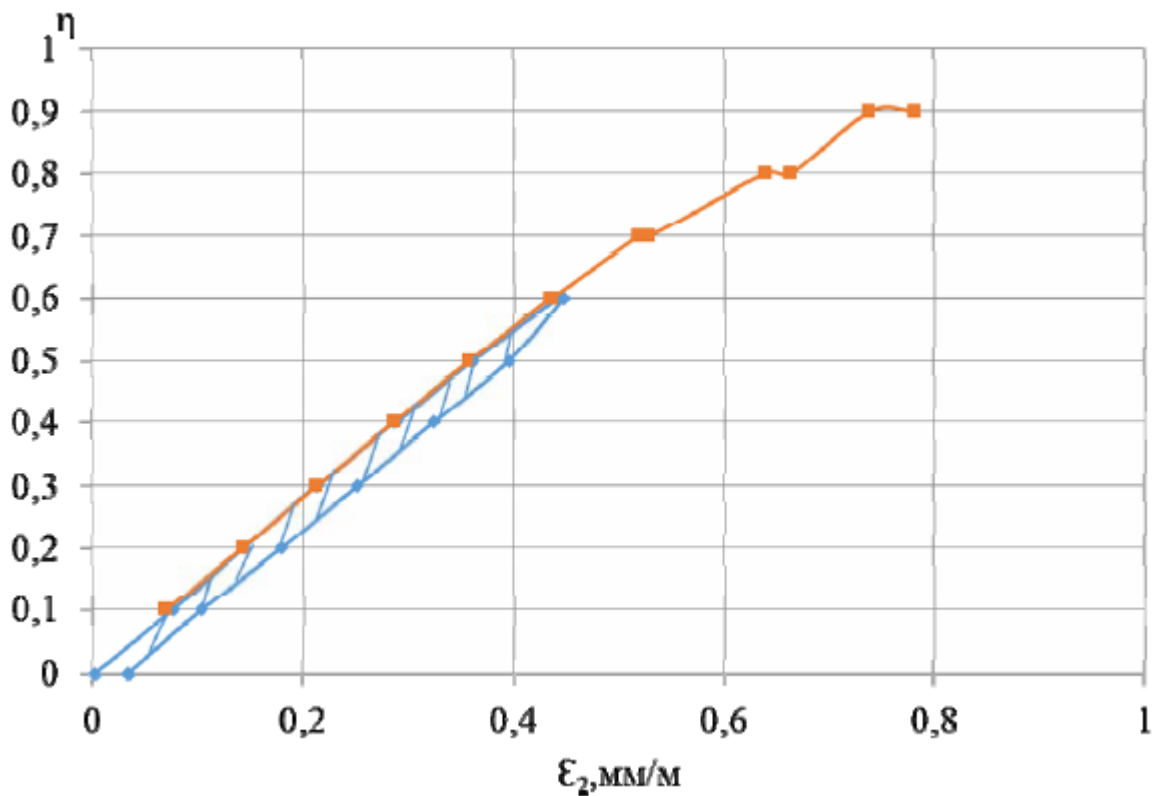


Рис. 7. Поперечная деформативность керамзитобетона второй серии, испытанного сразу после разгрузки, на ползучесть: $R_{пр} = 26,5$ МПа; $\rho = 1\,490$ кг/м³ [9]

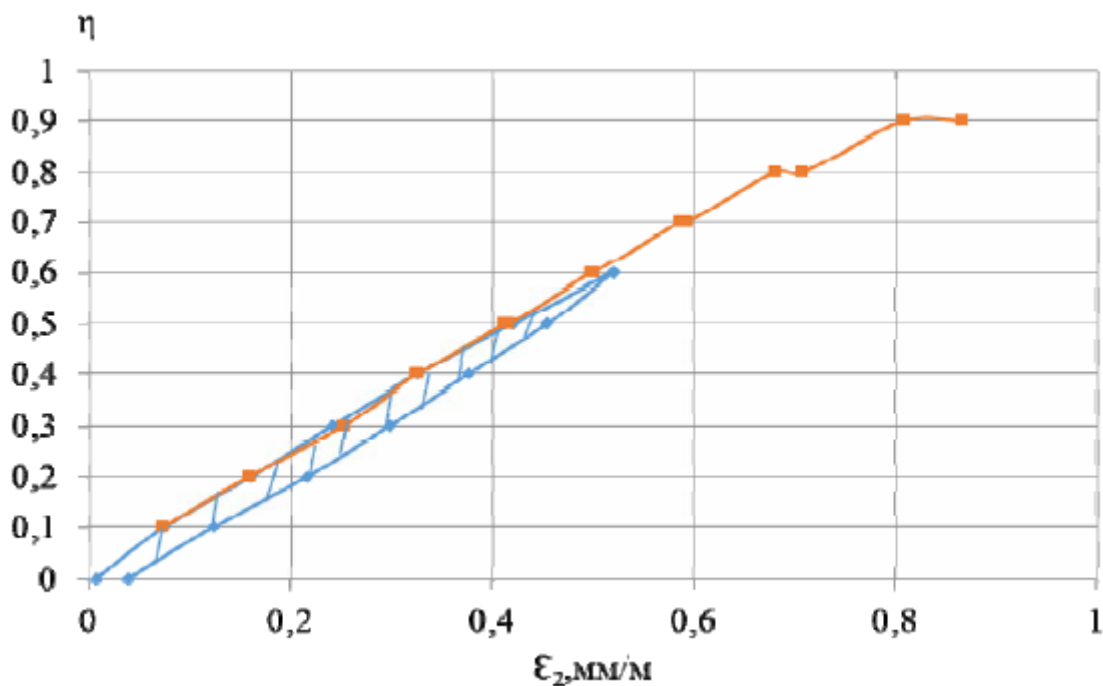


Рис. 8. Поперечная деформативность керамзитобетона третьей серии, испытанного на ползучесть на седьмой день после разгрузки:
 $R_{np} = 26$ МПа; $\rho = 1\,490$ кг/м³ [9]

Таким образом, проведенные исследования показали специфические деформационные особенности конструкционного керамзитобетона, обусловленные прежде всего наличием двух пористых структур (матричной фазы и пористого заполнителя), взаимодействие и взаимовлияние которых в процессе структурообразования способствует накоплению упругой деформации пористого заполнителя, что приводит к повышению его предельной растяжимости. Задачей технологии является создание оптимального сочетания деформаций компонентов бетона при формировании его структуры. При этом комплексная оценка параметров конструкционной прочности и структурно-системный подход к анализу механического поведения керамзитобетона как композиционного материала позволяет более надежно выявлять синергетические эффекты взаимодействия или взаимовлияния структурных элементов композита и на этой основе устанавливать критерии предельного состояния, обладающие достаточной общностью для применения в современной практике проектирования [9].

Использование золы-уноса в легких бетонах

На сегодняшний день технологии изготовления современных и высококачественных строительных материалов могут базироваться на использовании многотонных отходов промышленного производства, например металлургических шлаков и золы-уноса ТЭС.

Не стоит забывать и о качестве самой золы, для улучшения которого существует несколько способов и технологий [10]:

- ситовая классификация;
- механический способ (тонкий помол, размер частиц менее 10 мкм);
- флотация (отделение микросфер с поверхности золоотстойников);
- электромагнитная сепарация (удаление ферромагнитных частиц);
- пневматическая сепарация в циклонах;
- электрическая сепарация.

В работе [10] рассмотрена эффективность способа сепарации в высоковольтном электростатическом поле. Исходную навеску золы массой 100 г, предварительно высушенную до постоянной массы, через дозатор по наклонному медному лотку пропустили сквозь электродное пространство электрического сепаратора. Свойства электросепарированной золы-уноса ТЭС [10] представлены ниже:

Показатель	Значение					
	К	І	ІІ	ІІІ	ІV	А
Количество, г / процент от общей навески	23/2,3	22/2,2	103/10,1	397/38,9	374/36,7	123/12,1
Потери при прокаливании, %	0,89	0,87	0,86	0,73	0,54	0,46
Насыпная плотность, кг/м ³	1 086	988	1 114	1 142	1 137	1 129
Остаток на сите № 008, %	0,00	1,46	4,62	3,88	1,24	0,00

В работе [11] рассмотрена возможность использования низкокальциевой золы-уноса ТЭС для повышения эксплуатационных характеристик мелкозернистого бетона (табл. 8, 9). Традиционно зола-уноса вводится в бетон в качестве активной мелкодисперсной добавки взамен части цемента. Это обеспечивает повышение прочности, плотности, в некоторых случаях коррозионной стойкости, снижение водонепроницаемости и теплопроводности. Положительное влияние на свойства бетона обусловлено тонкой дисперсностью и гидравлической активностью, присущими золе-уноса. Низкокальциевая зола-уноса, в отличие от высококальциевой, по своим характеристикам, обусловленным минералогическим составом, не удовлетворяет условиям достижения высоких эксплуатационных свойств бетонов, в связи с чем используется в меньшей степени.

Таблица 8

Подбор дозировки гидрофобизатора и количества гранулированного гидрофобизирующего заполнителя (ГГЗ) [11]

Количество, %		Подвижность смеси, см	Прочность на сжатие, МПа	Водопоглощение, %
ГГЗ	Добавка			
10	0,1	7	31,89	4,25
	0,15	7	20,67	3,01
	0,2	8	29,71	2,59
30	0,1	6	18,54	3,85
	0,15	6	32,39	2,81
	0,2	7	35,04	2,4
50	0,1	5	16,82	5,96
	0,15	6	19,78	5,87
	0,2	6	23,47	5,58

Таблица 9

Влияние состава мелкозернистого бетона с ГГЗ на его пористость [11]

Соотношение цемента и песка	Водоцементное соотношение	Средняя плотность, кг/м ³	Пористость, %		
			Общая	Открытая	Закрытая
1/2	0,4	1 844	23,9	7,1	16,8
1/3		1 648	26,2	8,7	17,5
1/4		1 594	31,4	12,3	16,1
1/3	0,3	1 647	27,5	9,0	18,5
	0,4	1 648	26,2	8,7	17,5
	0,5	1 721	19,1	3,7	15,4

Коррозионная стойкость бетона определяется такими факторами, как проницаемость и химическая стойкость компонентов цементного камня к действию агрессивных сред. Активные минеральные добавки (микрокремнезем, зола-уноса) повышают коррозионную стойкость бетона, так как снижают его проницаемость (физический фактор) и превращают значительную часть растворимого гидроксида кальция в гидросиликаты кальция (химический фактор) [12].

При исследовании коррозионной стойкости бетона с высоким содержанием золы-уноса ТЭС в работе [12] установлено, что коэффициент коррозионной стойкости образцов бетона, в составах которых содержится зола-уноса ТЭС взамен части портландцемента, выше по сравнению с контрольным составом. Электрическая сепарация повышает качество золы-уноса и снижает количество органических остатков (ППП = 4,1 %). При содержании в составе бетона золы, отобранной с анода электрического сепаратора, коррозионная стойкость образцов на 35 % выше по сравнению образцами, в составе которых присутствует зола-

уноса, отобранная с катода или не обработанная в электрическом поле (рис. 9, 10).

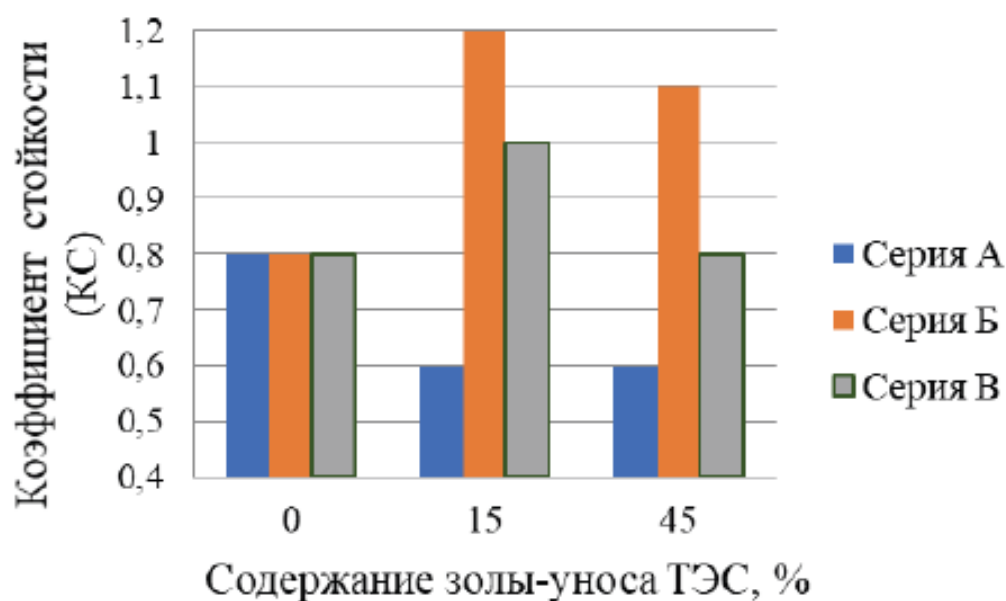


Рис. 9. Зависимость коэффициента коррозионной стойкости бетона от содержания золы-уноса ТЭС в образцах, выдержанных в 0,1N растворе HCl [12]

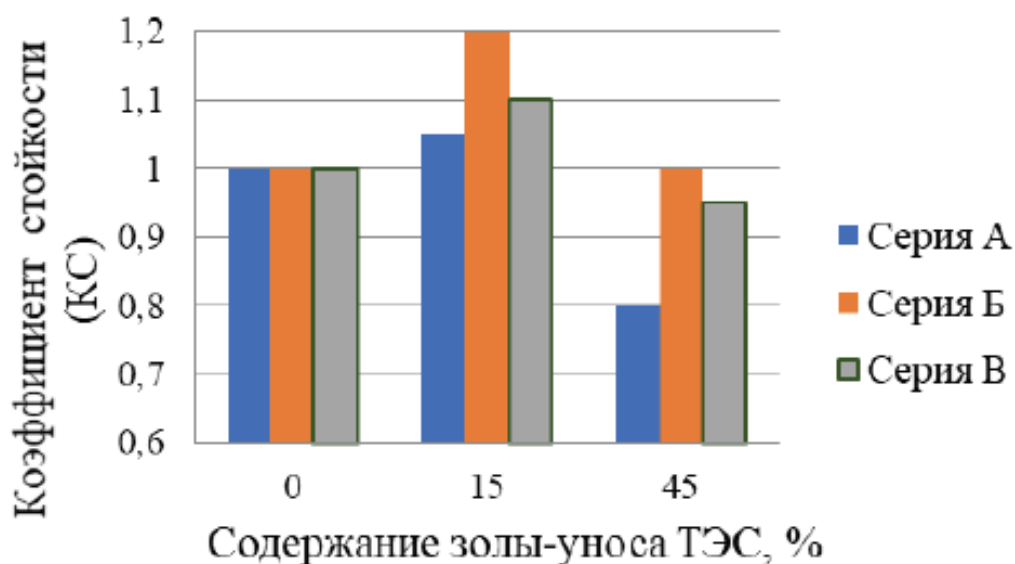


Рис. 10. Зависимость коэффициента коррозионной стойкости бетона от содержания золы-уноса ТЭС в образцах, выдержанных в 5%-м растворе MgCl₂ [12]

Актуальной проблемой является также введение в бетонную смесь суперпластификаторов. С позиции обеспечения эффективности встает проблема совместимости цемента и комплексной добавки. Данная проблема систематически изучается и обсуждается в связи с необходимостью длительного сохранения удобоукладываемости бетонной смеси. Понятие «совместимость» означает взаимное соответствие, способность добавки при взаимодействии с цементом и другими компонентами обеспечивать требуемые свойства бетонной смеси и твердеющего бетона на должном уровне. Совместимость – это основное свойство добавки при изготовлении бетона, количественно оценивать которую еще предстоит научиться [13].

Исследователи в работе [13] рассмотрели самоуплотняющиеся бетоны с применением золы-уноса и комплексных добавок Stachement 2481, Stachement 2280 и «Полипласт СП-4» (рис. 11, 12).

Благодаря введению в бетонную смесь золы, количество новообразований в цементном камне увеличивается, что способствует уплотнению и уменьшению пор в затвердевшем бетоне, а в сочетании с новейшими химическими добавками (суперпластификаторами, воздухововлекающими добавками) зола обеспечивает высокую прочность и долговечность бетона [13].

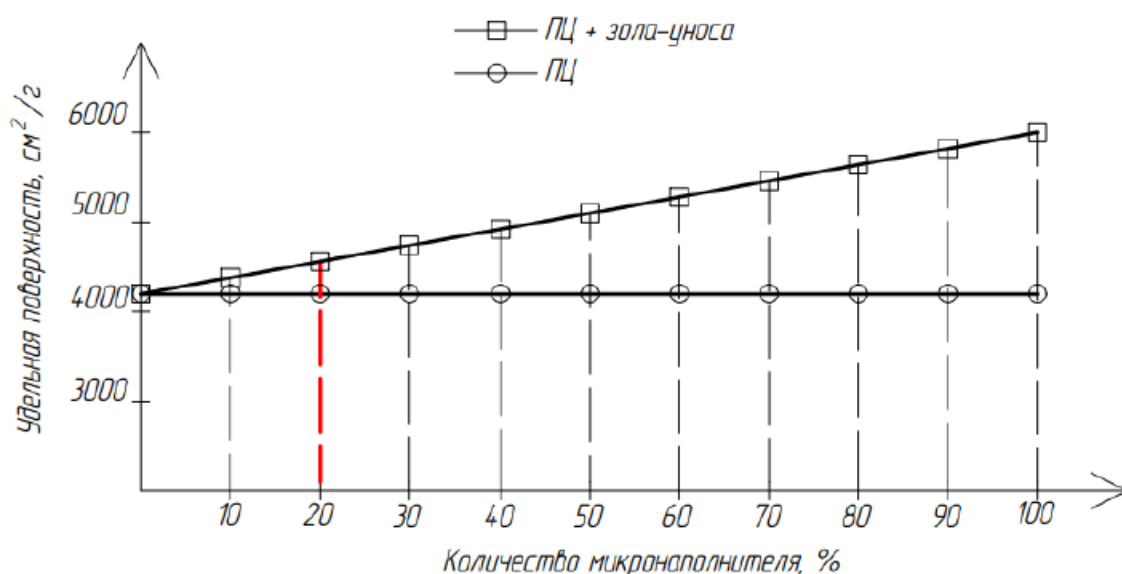


Рис. 11. Изменение расчетной удельной поверхности композиционного вяжущего при введении в портландцемент в качестве микронаполнителя золы-уноса [13]

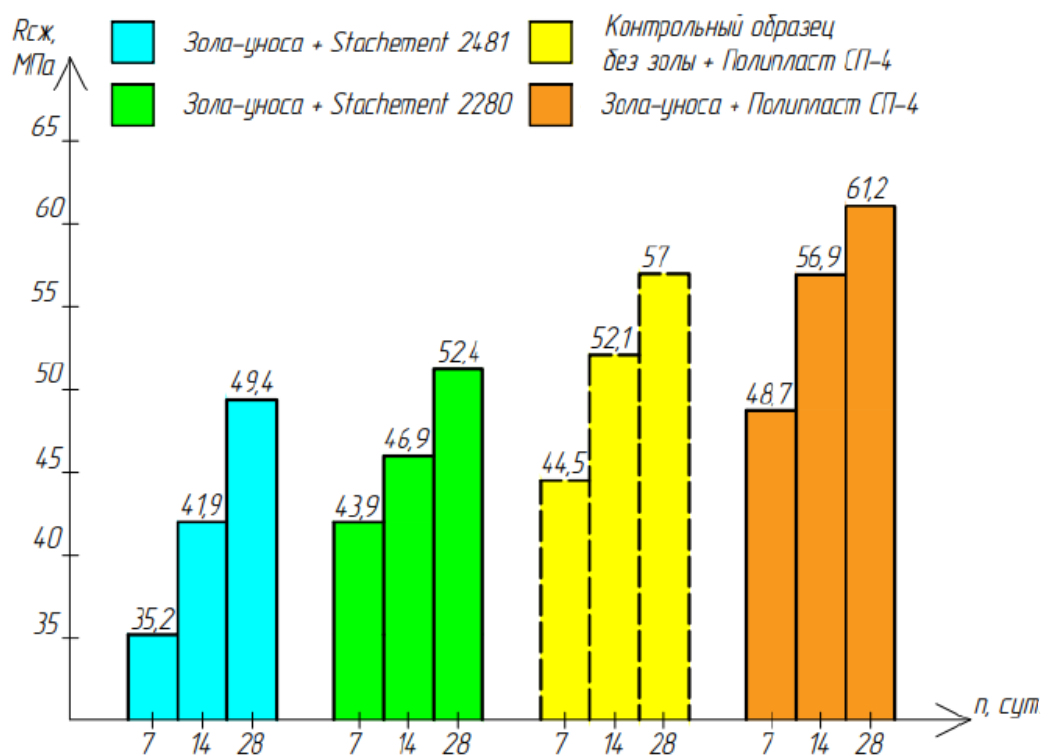


Рис. 12. Прочность образцов бетона на сжатие в возрасте 7, 14 и 28 сут твердения в нормальных условия [13]

В работе [14] исследовалось действие добавки золы-уноса на предел прочности бетона при сжатии. Для работы использовался состав бетона класса В30. Делались замесы контрольного образца и образцов с содержанием золы Костромской ТЭС и Рязанской ГРЭС (табл. 10, 11). В экспериментах 15 % цемента замещалось золой-уноса. Предел прочности бетона при сжатии определялся через 3, 7, 28 сут. Испытания проводились на гидравлическом прессе на образцах 70 x 70 x 70 мм по ГОСТ 25818-2017. Результаты представлены в табл. 12.

Таблица 10

Состав золы-уноса Костромской ТЭС [14]

Компонент	Содержание, % масс.	Компонент	Содержание, % масс.
SiO ₂	52,2–64,3	MgO	1,0–2,0
Al ₂ O ₃	23,5–29,0	K ₂ O	1,0–2,3
Fe ₂ O ₃ (3+)	6,0–10,0	SO ₂	0,2–0,8
FeO (2+)	0,8–1,5	P ₂ O ₅	0,2–1,0
CaO	2,2–5,8	C (углерод)	12,0–16,0

Таблица 11

Состав золы-уноса Рязанской ГРЭС [14]

Компонент	Содержание, % масс.	Компонент	Содержание, % масс.
SiO ₂	34,3	TiO ₂	2,18
Al ₂ O ₃	6,15	K ₂ O	1,5–2,0
Fe ₂ O ₃ (3+)	9,93	SO ₂	0,2–0,6
MgO (2+)	7,63	P ₂ O ₅	0,2–0,8
CaO	35,93	C (углерод)	1,5–2,0

Таблица 12

Изменения предела прочности при сжатии бетона В 30
в зависимости от времени его твердения
и добавки золошлаковых отходов (ЗШО) [14]

Состав	Предел прочности при сжатии, МПа, в возрасте, сут		
	3	7	28
Контрольный	21,10	28,40	35,30
С ЗШО Костромской ТЭС	16,25 (потеря 23 %)	21,65 (потеря 24 %)	27,35 (потеря 22 %)
С ЗШО Рязанской ГРЭС	18,70 (потеря 15 %)	25,60 (потеря 10 %)	35,30 (потеря 0 %)

В работе [16] исследована зависимость между перемешиванием смеси и набором прочности. Установлено, что при интенсивном перемешивании ингредиентов в дезинтеграторе прочность бетона увеличивается в 1,5–2 раза (табл. 13, рис. 13).

Таблица 13

Прочность твердеющей смеси
с перемешиванием вручную и механически [15]

Линейная встречная скорость, м/с	Предельное напряжение сдвига, Па	Коэффициент отстоя воды, %	Прочность смеси, МПа, в возрасте, сут		
			7	14	28
30	123	90,3	0,50	1,8	3,4
40	117	91,2	0,52	1,9	2,7
50	110	90,3	0,56	1,4	2,5
60	107	88,7	0,53	1,1	2,4
80	105	89,3	0,48	1,1	2,7
100	108	90,6	0,50	1,5	3,9

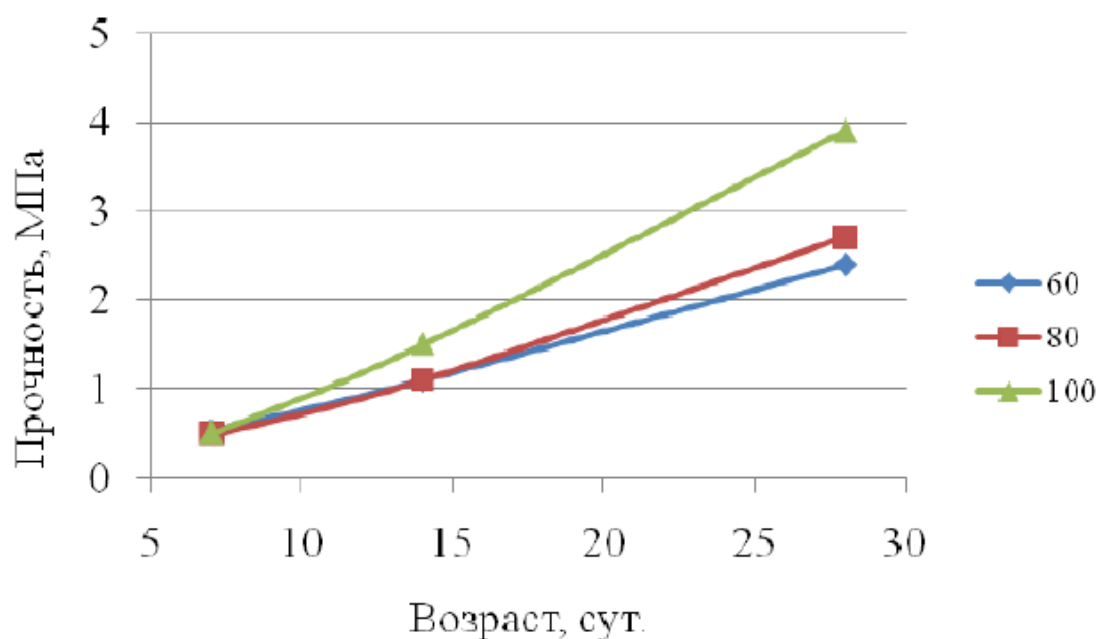


Рис. 13. Прочность бетона при различных режимах перемешивания компонентов смеси [15]

Заключение

В данном литературном обзоре подробно рассмотрено влияние золы-уноса на физические, механические свойства керамзитобетона, а также на его теплопроводность. Отражена зависимость набора прочности от режима перемешивания смеси. Легкий бетон хорошо зарекомендовал себя как строительный материал с небольшим весом, высокой прочностью и низкой теплопроводностью.

Стоит подчеркнуть, что зола-уноса ТЭС является не просто отходом промышленности, а ценным сырьевым материалом, который при требуемом качестве оказывает положительное воздействие на бетон.

Электрическая сепарация повышает качество золы-уноса и снижает количество органических остатков. При содержании в составе бетона золы, отобранной с анода электрического сепаратора, коррозионная стойкость образцов на 35 % выше по сравнению образцами, в составе которых присутствует зола-уноса, отобранная с катода или не обработанная в электрическом поле.

Благодаря введению в бетонную смесь золы увеличивается количество новообразований в цементном камне, что способствует уплотнению структуры и уменьшению пор в затвердевшем бетоне, а в сочетании с новейшими химическими добавками (воздухововлекающими, суперпластификаторами) зола способствует получению бетона с высокой прочностью и долговечностью.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о перспективности разработки составов высокопрочных легких бетонов, в

частности керамзитобетона с добавлением золы-уноса. Снижение веса конструкции элементов здания позволит решать сложные архитектурные задачи и расширять область применения легких бетонов при строительстве многоэтажных и высотных зданий, устройстве сложных строительных объектов, где применение высокоплотных материалов невозможно. Данный бетон зарекомендовал себя как материал с высокими физико-механическими и теплофизическими свойствами, а при грамотном подборе состава и добавлении отхода золы-уноса эти показатели можно улучшить. Стоит также отметить, что на данный момент стоимость керамзитобетона ниже, чем у других представителей его класса.

Библиографический список

1. Истомина К.Р., Бургунутдинов А.М., Хусаинова К.А. Возможные технологии использования золы уноса // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2022. № 1. С. 36–44.

2. Клименко Н.Е., Пергун И.С., Коломиец В.И. Достоинства и недостатки керамзитобетонных блоков в современном строительстве // Современные условия взаимодействия науки и техники: сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции: в 3 ч. (Омск, 13 декабря 2017 года) / отв. ред. А.А. Сукиасян. Омск: ООО «ОМЕГА САЙНС», 2017. Ч. 2. С. 75–77.

3. Основны оптимизации подбора состава керамзитобетона для монолитного строительства / В.Н. Петкогло, И.Я. Пунцель, С.А. Кравченко, А.А. Постернак // Актуальные научные исследования в современном мире. 2020. № 4-1 (60). С. 171–179.

4. Повышение эффективности керамзитобетона при помощи мелкодисперсных добавок / П.Э. Соколов [и др.] // МНИЖ. 2021. № 3-1 (105). С. 75–83.

5. Оценка эффективности применения суперпластификаторов для повышения эксплуатационных свойств керамзитобетонов / П.Э. Соколов [и др.] // МНИЖ. 2020. № 8-1 (98). С. 132–143.

6. Ржевуцкая В.А. Влияние состава керамзитобетонной смеси на среднюю кубиковую прочность на сжатие // Безопасный и комфортный город: сборник научных трудов по материалам V Международной научно-практической конференции (Орел, 6–8 июня 2022 года). Орел: Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, 2022. С. 319–322.

7. Гаджиев А.М., Хаджишалапов Г.Н., Хежев Т.А. Жаростойкий керамзитобетон на основе портландцемента с обожженным аржиллитом из смесей с предварительным форсированным электроразогревом // ИВД. 2023. № 6 (102). С. 526–540.

8. Рахимова О.Н., Шарипова И.А., Козюкова К.А. Пути улучшения физико-механических показателей легкого бетона // Синтез науки и общества в решении глобальных проблем современности: сборник статей

Всероссийской научно-практической конференции (Екатеринбург, 13 мая 2022 года) / отв. ред. А.А. Сукиасян. Уфа: ООО «Аэтерна», 2022. С. 97–100.

9. Макридин Н.И., Максимова И.Н., Полубарова Ю.В. Особенности механического поведения и структурных изменений конструкционного керамзитобетона // Региональная архитектура и строительство. 2019. № 3 (40). С. 50–57.

10. Губарь В.Н., Петрик И.Ю., Жибоедов А.В. Способы повышения качества золы-уноса ТЭС, применяемой в высококачественных бетонах // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2016. № 3 (119). С. 63–70.

11. Лабузова М.В. Использование низкокальциевой золы-уноса ТЭС // Молодежь и научно-технический прогресс: сборник докладов X Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 4 т. (Губкин, 20 апреля 2017 года). Губкин: ООО «Ассистент плюс», 2017. Т. 3. С. 140–142.

12. Петрик И.Ю., Губарь В.Н., Корниенко С.В. Коррозионная стойкость бетона с высоким содержанием золы-уноса ТЭС // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2017. № 4 (126). С. 103–107.

13. Шишканова В.Н., Сяйлев Д.А. Зола-уноса как минеральная добавка при изготовлении самоуплотняющегося бетона // Новые научные исследования: сборник статей VII Международной научно-практической конференции, Пенза, 30 апреля 2021 года / отв. ред Г.Ю. Гуляев. Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2022. С. 48–51.

14. Кансеитов А.Ю., Начинкин С.А., Акулова М.В. Влияние добавки золы-уноса на физико-химические свойства тяжелого бетона // Экологические аспекты современных городов: сборник материалов IX межрегионального семинара (Иваново, 23 декабря 2022 года). Иваново: Ивановский государственный политехнический университет, 2023. С. 25–27.

15. Режим перемешивания компонентов при изготовлении бетона с добавкой золы уноса / В.И. Голик [и др.] // Известия ТулГУ. Серия «Науки о Земле». 2019. № 1. С. 201–210.

HIGH-STRENGTH EXPANDED CLAY CONCRETE USING FLY ASHES

M.D. Ivanov, M.A. Smirnov, V.I. Trofimov, V.V. Belov

***Abstract.** The article analyzes the effect of fly ash on the physical, mechanical properties, thermal conductivity of expanded clay concrete. The methods of composition selection for high-strength expanded clay concrete are considered.*

Keywords: *expanded clay concrete, fly ash, high-strength expanded clay concrete, composition, strength, thermal conductivity, superplattifier, lightweight concrete, additives.*

Об авторах:

ИВАНОВ Максим Дмитриевич – студент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: max.iva901@yandex.ru

СМИРНОВ Матвей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: matiu.sm@yandex.ru

ТРОФИМОВ Валерий Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: vitrofa@mail.ru

БЕЛОВ Владимир Владимирович – советник РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

About the authors:

IVANOV Maxim Dmitrievich – Student of the Department of Production of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: max.iva901@yandex.ru

SMIRNOV Matvey Alexandrovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Products and Structures Production, Tver State Technical University, Tver. E-mail: matiu.sm@yandex.ru

TROFIMOV Valery Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: vitrofa@mail.ru

BELOV Vladimir Vladimirovich – Advisor to RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: vladim-bel@yandex.ru