

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS



УДК 693.557

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-41-53>

Контракционная усадка бетонов из высокоподвижных и самоуплотняющихся смесей

Г.В. Несветаев , Ю.И. Корянова , В.В. Шуть 

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ nesgrin@yandex.ru



EDN: TWGDIA

Аннотация

Введение. Выявлено влияние особенностей химико-минералогического состава портландцементов и химической основы суперпластификаторов на величину и кинетику аутогенной (контракционной) усадки бетонов из высокоподвижных и самоуплотняющихся бетонных смесей. Актуальность вопроса обусловлена часто игнорируемой ролью аутогенной усадки в формировании поля температурно-усадочных напряжений в ранний период твердения массивных монолитных конструкций. Для расчета собственных напряжений требуются данные о величине и кинетике аутогенной усадки, а недостаточность и некоторая противоречивость данных о влиянии суперпластифицирующих добавок на величину и кинетику аутогенной усадки в зависимости от вещественного состава цемента и химико-минералогического состава клинкера предопределяют целесообразность получения новых данных по данному вопросу. Цель работы состоит в развитии научных представлений о влиянии рецептурных факторов и свойств материалов на количественные и качественные параметры аутогенной усадки на примере широко применяемыми при производстве монолитных железобетонных конструкций в Ростовской области материалов.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования выполнены с использованием шести быстротвердеющих по классификации ГОСТ 31108-2020 портландцементов четырех производителей. Использованы суперпластифицирующие добавки на основе эфиров поликарбоксилатов и нафталинформальдегидов в дозировке 0,5 % по товарному продукту. Свойства цементов определены по ГОСТ 30744-2001 и ГОСТ 310.5-88. Деформации твердеющего цементного теста (камня) определялись по методу Ле-Шателье. Величина аутогенной усадки бетона определялась расчетным методом по величине аутогенной усадки цемента с учетом истинного значения В/Ц бетона и концентрации заполнителя в бетоне.

Результаты исследования. Соотношение «аутогенная усадка/общая контракция» исследованных цементов с добавками в возрасте 5 сут. составило 0,37–0,74, количественные значения общей контракции исследованных цементов в сочетании с добавками в возрасте 5 сут. составили от 2,93 до 3,43 мл/100 г цемента, что не противоречат известным данным. Изменение величины аутогенной усадки при наличии добавок в возрасте 5 сут. составило от 0,64 до 1,65 относительно бездобавочного эталона. Влияние добавок на кинетику аутогенной усадки проявилось как в ускорении либо замедлении, так и в отсутствии влияния. Расчетная величина аутогенной усадки бетонов классов В25–В35 из высокоподвижных и самоуплотняющихся смесей в возрасте 5 сут. составила от 0,36 до 1,18 мм/м.

Обсуждение и заключение. Развита научные представления о кинетике аутогенной усадки в зависимости от вида цементов и добавок. Для описания изменения аутогенной усадки во времени предложена формула, подобная формуле EN 1992-1-1 изменения прочности бетона во времени. Предложена классификация бетонов по кинетике аутогенной усадки. Уточнены закономерности изменения величины аутогенной усадки бетонов из высокоподвижных и самоуплотняющихся бетонных смесей с учетом влияния состава и свойств цементов в сочетании с некоторыми суперпластифицирующими добавками. Определено наиболее вероятное значение показателя показателя степени $d = 1,6 - 1,8$ в известной формуле для расчета аутогенной усадки бетона.

Ключевые слова: общая контракция, контракционная усадка, аутогенная усадка, суперпластифицирующие добавки, высокоподвижные бетонные смеси

Для цитирования. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И., Шуть В.В. Контракционная усадка бетонов из высокоподвижных и самоуплотняющихся смесей. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(1):41–53. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-41-53>

Original Empirical Research

Autogenous Shrinkage of Concretes from Highly Mobile and Self-Compacting Mixtures

Grigory V. Nesvetaev , Yulia I. Koryanova , Vladimir V. Shut 

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ nesgrin@yandex.ru

Abstract

Introduction. The influence of the chemical and mineralogical composition of Portland cements and the chemical base of superplasticizers on the magnitude and kinetics of autogenic (contractional) shrinkage of concretes from highly mobile and self-compacting concrete mixtures has been revealed. The relevance of the issue is due to the commonly overlooked role of autogenic shrinkage in the formation of the field of temperature-shrinkage stresses in the early hardening period of massive monolithic structures. In order to calculate intrinsic stresses, data on the magnitude and kinetics of autogenic shrinkage are required, and the insufficiency and some inconsistency of data on the effect of superplasticizing additives on the magnitude and kinetics of autogenic shrinkage, depending on the material composition of cement and the chemical and mineralogical composition of clinker, are critical to the expediency of obtaining new data on the issue. The objective of the work is to develop scientific ideas about the influence of prescription factors and material properties on the quantitative and qualitative parameters of autogenic shrinkage using the example of materials commonly used in the production of monolithic reinforced concrete structures in the Rostov region.

Materials and methods. Experimental studies were conducted using six Portland cements from four manufacturers that are fast-hardening according to GOST 31108-2020 classification. Superplasticizing additives based on polycarboxylate esters and naphthalene formaldehydes in a dosage of 0.5% of the commercial product were employed. The properties of cements are identified according to GOST 30744-2001 and GOST 310.5-88. Deformations of the hardening cement paste (stone) were determined by means of the Le Chatelier method. The amount of autogenic shrinkage of concrete was determined by the calculation method based on the amount of autogenic shrinkage of cement, taking into account the true value of the I/C of concrete and the concentration of aggregate in concrete.

Results. The ratio of "autogenic shrinkage/total contraction" of the investigated cements with additives at the age of 5 days was 0.37–0.74, the quantitative values of the total contraction of the studied cements in combination with additives at the age of 5 days ranged from 2.93 to 3.43 ml/100 g of cement, which does not contradict the available data. Change in the amount of autogenic shrinkage in the presence of additives at the age of 5 days was from 0.64 to 1.65 relative to the non-additive standard. The effect of additives on the kinetics of autogenic shrinkage was manifested both in acceleration or deceleration, and in the absence of any effect. The calculated value of autogenic shrinkage of concretes of classes B25–B35 from highly mobile and self-sealing mixtures at the age of 5 days ranged from 0.36 to 1.18 mm/m.

Discussion and Conclusion. Scientific ideas about the kinetics of autogenic shrinkage have been developed depending on the type of cements and additives. In order to describe the change in autogenic shrinkage over time, a formula similar to the formula EN 1992-1-1 for the change in concrete strength over time is set forth. The classification of concretes according to the kinetics of autogenic shrinkage is suggested. The patterns of changes in the amount of autogenic shrinkage of concretes from highly mobile and self-compacting concrete mixtures have been clarified considering the influence of the composition and properties of cements in combination with several superplasticizing additives. The most probable value of the indicator of the degree $d = 1.6 - 1.8$ is determined in the well-known formula for calculating the autogenic shrinkage of concrete.

Keywords: general contraction, contractional shrinkage, autogenic shrinkage, superplasticizing additives, highly mobile concrete mixtures

For citation. Nesvetaev GV, Koryanova YuI, Shut VV. Contractional shrinkage of concretes from highly mobile and self-sealing mixtures. *Current Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(1):41–53. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-41-53>

Введение. Риск раннего трещинообразования массивных монолитных железобетонных конструкций обусловлен возникающими вследствие температурных и усадочных деформаций растягивающими напряжениями [1, 2], причем при оценке уровня растягивающих напряжений усадочные деформации достаточно часто игнорируются [3, 4]. Усадочные деформации, как правило, не являются доминирующим фактором в риске раннего трещинообразования массивных монолитных железобетонных конструкций, но их учет позволяет более достоверно оценить

уровень возникающих напряжений [5], особенно при значительном времени перекрытия слоев и в случае поставок бетонной смеси с разных бетоносмесительных заводов, поскольку при возможном использовании производителями разных цементов и добавок бетоны одного класса могут иметь значительные различия усадочных деформаций в ранний период твердения. Для достоверной оценки роли усадочных деформаций необходимо учитывать их природу, величины и закономерности развития. Как известно, гидратация и твердение портландцемента сопровождается, в том числе, собственными деформациями, обусловленными массообменными процессами с внешней средой (усадка при высыхании или «drying shrinkage», которая включает и карбонизационную усадку — далее ВУ) и изменениями объема твердеющей системы вследствие гидратации, которые происходят в результате уменьшения объема новообразований в процессе гидратации относительно суммарного объема вступающих в реакцию веществ. Это явление исторически известно как «контракция» или «общая контракция» (от лат. — la contraddizione, далее — ОК) и состоит из контракционной пористости (КП) и контракционной усадки (КУ) [6]. Среди отечественных исследователей первым обстоятельно изучал ОК Некрасов В.В. [7]. В зарубежной литературе уже более 30 лет в основном используются термины «chemical shrinkage» для обозначения ОК и «autogenous shrinkage» для обозначения КУ [5, 8–10]. Одно из ранних упоминаний термина «autogenous shrinkage» имело место в [11]. В отечественной литературе встречаются термины «общая» и «внешняя» контракция или химическая усадка для обозначения ОК и КУ соответственно [12]. В настоящей работе далее будут использоваться термины ОК (общая контракция = «chemical shrinkage») и КУ («autogenous shrinkage»).

Первые упоминания о КУ относятся к 1933 г. (Нилендер Ю.А.), а по данным [9] — к 1934 г. (Lymann), при этом в [9] отмечается, что величина КУ зависит от типа цемента и может изменяться до 3 раз. Некоторые сведения об изменении представлений о роли КУ в процессе раннего трещинообразования бетона иллюстрирует таблица 1.

Таблица 1

Некоторые представления о роли КУ в формировании структуры бетона

Данные	КУ
Нилендер Ю.А. (1933)	В 5-10 раз меньше ВУ
Шпиндель М. (1936)	Значительно превосходит ВУ
Александровский С.В. (1962)	Мала по сравнению с ВУ и не играет роли в трещинообразовании
Михайлов В.В. (1974)	Весьма значительна (1 мм/м в 1 сутки)
Баженов Ю.М. (1987)	Не столько изменяет размеры, сколько изменяет поровую структуру
Холмянский М.М. (1997)	Мала по сравнению с ВУ и не оказывает существенного влияния на трещинообразование
Larrard Roy (1993)	ВУ 0,42, КУ 0,58 от полной
Tazawa, Miyazawa (1997)	ВУ 0,17–0,5, КУ 0,83–0,5 от полной ¹
Persson (1998)	ВУ 0,49–0,54, КУ 0,32–0,38 от полной
Несветаев Г.В., Тимонов С.А. (2001)	ВУ 0,27–0,87; КУ 0,72–0,13 ^{1, 2} от полной

Примечания: 1 — в зависимости от В/Ц; 2 — 8 партий цемента 6 производителей.

Величина КУ зависит от свойств цемента, прочности бетона, наличия добавок. Согласно EN 1992-1-1 величина КУ (по EN $\varepsilon_{ca}(\infty)$) определяется по формулам в зависимости от прочности бетона f_{ck} и времени t :

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5(f_{ck} - 10)10^{-6}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty), \quad (2)$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2t^{0,5}). \quad (3)$$

Поскольку, как известно, прочность бетона зависит от величины В/Ц, закономерно КУ зависит от величины В/Ц:

$$\frac{\varepsilon_{ку, В/Ц}}{\varepsilon_{ку, В/Ц=0,27}} = k \cdot \exp(b \frac{В}{Ц}), \quad (4)$$

где $k = 3,6$ и $2,9$ соответственно по усредненным данным EN 1992-1-1 и по некоторым экспериментальным данным (Малинина Л.А., Несветаев Г.В. и Тимонов С.А., Persson В.), при этом $b = -4,7$ и $-4,0$, а показатель достоверности аппроксимации R^2 соответственно 0,99 и 0,54, что свидетельствует о сильном влиянии на зависимость (4) по экспериментальным данным, помимо величины В/Ц, других факторов — в первую очередь свойств цемента и наличия добавок.

Зола-уноса практически не влияет на величину КУ, а влияние микрокремнезема зависит от дозировки — возможно как повышение, так и понижение КУ. По данным [13] в возрасте 4 сут шлак повышает КУ до 1,5 раза. По данным [14] 10 % микрокремнезема повышает усадку до 1,33 раза, а в зависимости от дозы суперпластификатора КУ изменяется от 0,75 до 1,25. Ускоритель твердения снижает КУ примерно на 13 %, а замедлитель схватывания — повышает до 1,5 раза. Воздухововлекающая добавка сильно снижает КУ.

Наибольший разброс мнений в литературе относится к величине КУ. Некоторые данные представлены в таблице 2. Следует иметь в виду, что величины КУ, представленные в таблице 2, получены по различным методикам.

Таблица 2

Некоторые литературные данные о величине КУ

Данные	КУ, мм/м						
	цементное тесто (камень)			бетон или раствор			
	72 ч	120 ч	нет данных	24/48 ч	72 ч	120 ч	нет данных
[15]	1,2	1,47			0,12–0,24	0,147–0,295	
[16]	0,6 0,3	0,75 0,39			0,060–0,120 0,030–0,060	0,075–0,15 0,039–0,078	
[17]					0,8–1,0 0,44–0,55 0,238–0,475 0,18–0,225		
[18]	0,25	0,275			0,025–0,050	0,0275–0,055	
[19]							0,1–0,5
[13]			0,75–1,2				
[14]							0,4–1,05
[20]							0,35–1,25
[21]					0,071–0,817		
[22]						0,14–0,53	
[23]				0,203/0,235			
[24]					0,4–0,62		

По данным [13], соотношение КУ/КП в возрасте 10 ч составило 0,3. По данным [6] при исследовании 5 партий цемента 4 производителей соотношение КУ/КП составило 0,32–0,5, а при введении СП — от 0,3 до 0,8.

По нашему мнению, большой разброс значений величины КУ по некоторым литературным данным связан в первую очередь с отсутствием единой методики измерения величины КУ [19, 20, 25]. Ключевым моментом является, безусловно, время начала измерения КУ, поскольку развитие контракции происходит сразу с начала гидратации цемента, а начало измерения КУ по различным методикам существенно различается. По данным [19] со ссылкой на рекомендации RILEM и DIN 1045-1 измерение КУ начинается в возрасте 1 сут, но в исследованиях встречается и начало измерения сразу после схватывания. Кроме того, могут применяться образцы разной формы и размеров [19, 25].

На рис. 1 схематично представлено развитие ОК, КУ и КП во времени [6]. На первом этапе (1 на рис. 1) до формирования кристаллического сростка имеют место деформации цементного теста в пластической стадии, до схватывания. В некоторых зарубежных источниках [14] отмечается, что это индукционный период и период начала интенсивного процесса гидратации, при этом на первом этапе $ОК = КУ$. Далее в связи с началом формирования кристаллического сростка (каркаса) деформации неизолированной (ОК) и изолированной (КУ) смеси начинают различаться, и $ОК = КУ + КП$. Именно с этого момента следует начинать отсчет при измерении КУ, т. е. после схватывания, что отмечается, например, в [8], причем изменение сроков начала формирования кристаллического сростка влияет на соотношение КУ/ОК [6].

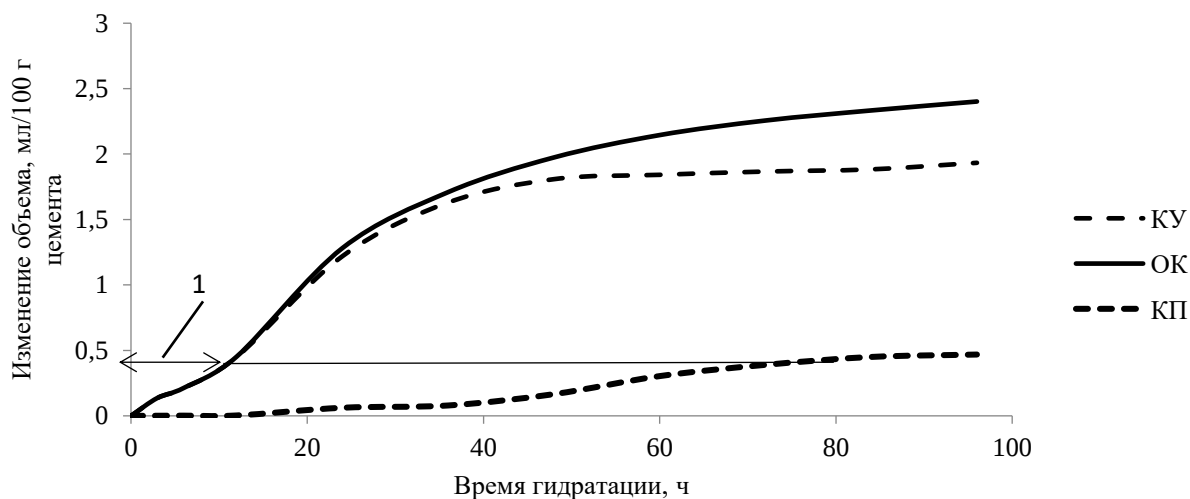


Рис. 1. Схема развития ОК, КУ и КП во времени

Широко применяемые для производства массивных монолитных железобетонных конструкций высокоподвижные и самоуплотняющиеся бетонные смеси характеризуются повышенным содержанием вяжущего теста и наличием современных эффективных добавок-разжижителей [26, 27]. Существенные различия в оценке величин КУ и недостаточность данных о влиянии суперпластифицирующих добавок (СП) на величину и кинетику КУ с учетом химико-минералогического состава клинкера и вещественного состава цемента предопределяют актуальность исследований в этой области.

В связи с вышеизложенным целью настоящего исследования является уточнение закономерностей изменения величины и кинетики КУ бетонов из высокоподвижных и самоуплотняющихся смесей с учетом влияния состава и свойств цементов в сочетании с некоторыми СП, широко применяемыми при производстве монолитных железобетонных конструкций в Ростовской области.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования выполнены с использованием шести портландцементов четырех производителей (таблица 3).

Таблица 3

Некоторые свойства исследованных цементов

№	ПЦ	Свойства цементов			
		Прочность, Мпа, в возрасте		НГ, %	НС, мин.
		2 сут	28 сут		
1	ЦЕМ I 42,5Н ^{1,5}	22,4	51,5	22,75	115
2	ЦЕМ II/A-III 42,5Н ^{1,5}	23,4	55,3	25,0	150
3	ЦЕМ I 42,5Н ^{2,5}	28,5	50,9	26,5	150
4	ЦЕМ 0 52,5Н ^{3,5}	35,9	62,9	30,0	180
5	ЦЕМ I 42,5Н ^{3,5}	30,1	55,6	26,25	170
6	ЦЕМ II/A-II 42,5Н СС ^{4,6}	23,5	54,6	27,25	150

Примечания: 1–4 — производители; 5 — ГОСТ 31108-2020; 6 — ГОСТ 22266-2013

Все исследованные цементы по классификации ГОСТ 31108-2020 относятся к быстротвердеющим. Использованы СП в дозировке 0,5 % от массы цемента по товарному продукту:

- «ПОЛИПЛАСТ СП-4» по ТУ 5745-026-58042865-2007 — смесь сополимеров на основе нафталинсульфокислоты;
- «ЛИНАМИКС ПК» тип 2 по ТУ 5745-033-58042865-2008 — на основе полиоксиэтиленовых производных поликарбоновых кислот и полиэтиленгликоля.

Определение свойств цементов произведено по ГОСТ 30744-2001 и ГОСТ 310.5-88. Деформации твердеющего цементного теста (камня) определялись по методу Ле-Шателье по неизолированной схеме при определении величины ОК и по изолированной схеме (в эластичной оболочке) при определении величины КУ [12]. Измерения КУ продолжались 120 ч (5 сут), поскольку именно этот период представляет наибольшую опасность раннего трещинообразования многих массивных монолитных конструкций. Для перехода от объемных деформаций цементного камня ΔV , %, к линейным $\varepsilon_{КУ}$, мм/м, при измерении по изолированной схеме ввиду малости величин использовалась зависимость:

$$\varepsilon_{КУ} = 3,33\Delta V. \quad (5)$$

Величина КУ бетона ε_B определялась расчетным методом по величине КУ цемента $\varepsilon_{Ц}$ с учетом истинного значения В/Ц бетона и содержания заполнителя V_a в бетоне по формуле [28]:

$$\varepsilon_B = \varepsilon_{Ц}(1 - V_a)^d, \quad (6)$$

где $d = 1,2-1,7$ — по данным Шейкина А.Е.; $d = 1,4-1,8$ — по данным Щербакова Е.Н. [29]; $d = 1,7$ — по данным [8, 10, 30]; значение V_a принято 0,7 в соответствии с рекомендациями [8, 28].

Результаты исследования. В таблице 4 представлены данные о соотношении КУ/ОК исследованных цементов с добавками.

Таблица 4

Соотношение КУ/ОК исследованных цементов с добавками

Состав	Соотношение КУ/ОК в 120 ч для ПЦ по таблице 3					
	1	2	3	4	5	6
ПЦ	0,37	0,53	0,48	0,59	0,54	0,56
ПЦ + Линамикс	0,61	0,49	0,48	0,4	0,6	0,7
ПЦ + СП-4	0,49	0,68	0,34	0,57	0,61	0,74

Практически все результаты укладываются в ранее указанный диапазон 0,3–0,8. Значения величины ОК представлены в таблице 5.

Таблица 5

Величина ОК исследованных цементов с добавками

Состав	Величина ОК, мл/100 г цемента, в 120 ч для ПЦ по таблице 3					
	1	2	3	4	5	6
ПЦ	2,93	3,43	3,0	3,24	3,32	3,42
ПЦ + Линамикс	2,98	2,3	4,3	3,5	3,35	3,06
ПЦ + СП-4	3,35	3,46	3,61	4,17	3,75	3,95

Известны формулы, позволяющие определить величину ОК по минералогическому составу клинкера и вещественному составу цемента [20, 29]:

$$OK = aC_3S + bC_2S + cC_3A + dC_4AF + eSO_3. \quad (7)$$

Для ПЦ № 1 по таблице 3, по которому были известны все необходимые данные для расчета, в таблице 6 приведены расчетные значения по различным формулам.

Таблица 6

Расчетные и измеренные значения величины ОК в 120 ч

Значение	Формула					
	Данюшевский В.С.	Волженский А.В.	Пауэрс Т.С.	Некрасов В.В.	Несветаев Г.В. ²	Паулини П.
Расчетное	<u>2,73</u> 0,93 ¹	<u>4,17</u> 1,42	<u>3,52</u> 1,2	<u>5,1</u> 1,74	<u>2,99</u> 1,02	<u>4,17</u> 1,42
Измеренное	2,93					

Примечания: 1 — относительно измеренного; 2 — по (8).

Лучшее соответствие расчетных и измеренных значений получено по формуле Несветаева Г.В. [29]:

$$OK = 0,0364C_3S + 0,021C_2S + 0,1474(C_3A - 2,67SO_3) + 0,1C_4AF + 0,433SO_3 \quad (8)$$

Для описания изменения КУ во времени использована зависимость, подобная формуле изменения прочности бетона во времени по EN 1992-1-1:

$$R_{\tau}(KY_{\tau}) = R_{[t]}(KY_{[t]}) \cdot \exp(k \cdot (1 - \left(\frac{[t]}{\tau}\right)^d), \quad (9)$$

где R_{τ} , KY_{τ} — соответственно предел прочности при сжатии и КУ в момент времени τ , сут; $R_{[t]}$, $KY_{[t]}$ — соответственно предел прочности при сжатии и КУ в 28 (R) и 5 (KY) сут; k , d — коэффициенты, значения которых представлены в таблице 7.

Таблица 7

Коэффициенты k и d (9)

Свойства бетона (Y)	Коэффициенты (9)	Темп твердения бетонов — критерий R_2/R_{28} по EN 206.1			
		быстрый > 0,5	нормальный 0,3–0,5	медленный 0,15–0,3	очень медленный < 0,15
Предел прочности при сжатии, R	k	< 0,25	0,25–0,43	0,43–0,7	$\geq 0,7$
	d	0,5			
	$[\tau]$	28 сут.			
Аутогенная усадка, $\epsilon_{ку}$	k	$\leq 0,33$	0,3–0,4	> 0,4	—
	d	$\leq 0,65$	0,66–0,9	> 0,9	—
	$[\tau]$	5 сут			

Поскольку и предел прочности бетона при сжатии, и КУ зависят от степени гидратации цемента, закономерно эти величины во времени изменяются по подобным законам, что позволяет предложить классификацию бетонов по кинетике КУ, представленную в таблице 7, в дополнение к известной классификации бетонов по темпу твердения по EN 206.1.

На рис. 2–7 представлены результаты измерения величины КУ цементного камня цемента по таблице 1 в течение 120 ч, в т. ч. с СП.

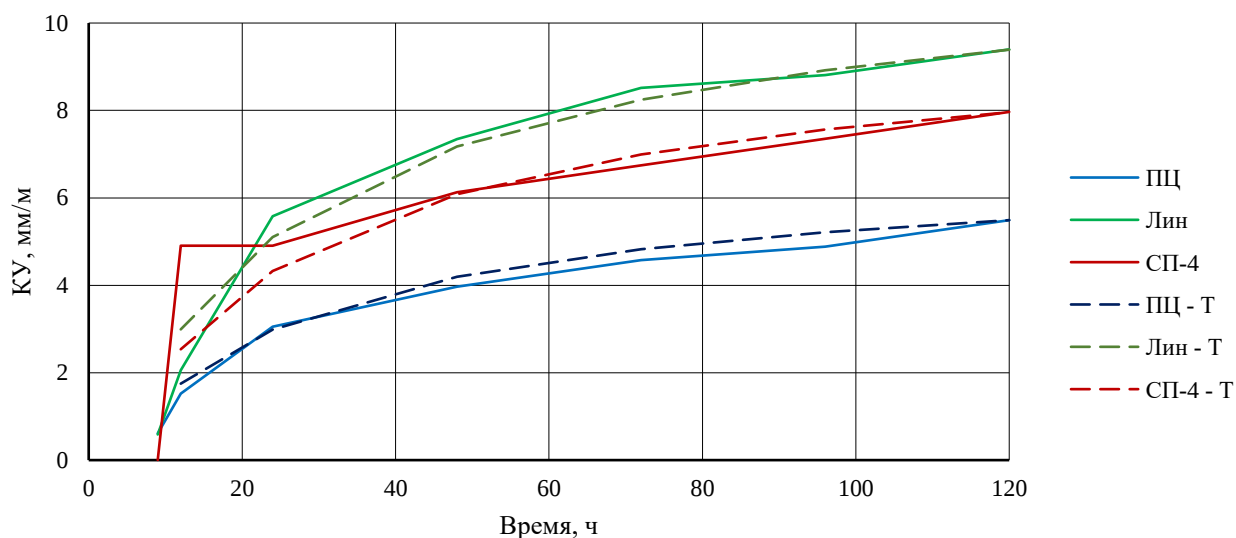


Рис. 2. Изменение во времени КУ ПЦ № 1 по таблице 3:

ПЦ, Лин, СП-4 — соответственно бездобавочный эталон, с добавками Линамикс и СП-4; с индексом Т (9) — для быстрого темпа твердения по таблице 7 ($k = 0,33$; $d = 0,65$)

Из представленных на рис. 2 результатов очевидно, что:

- кинетика КУ ПЦ № 1 практически идеально описывается ф. (9) при $k = 0,33$, $d = 0,65$ (таблица 7);
- в присутствии СП Линамикс величина КУ в возрасте 5 сут возрастает в 1,71 раза, а при СП-4 — в 1,45 раза;
- СП практически не влияют на кинетику КУ, значения $k = 0,33/0,33$, $d = 0,65/0,65$ соответственно СП Линамикс/СП-4.

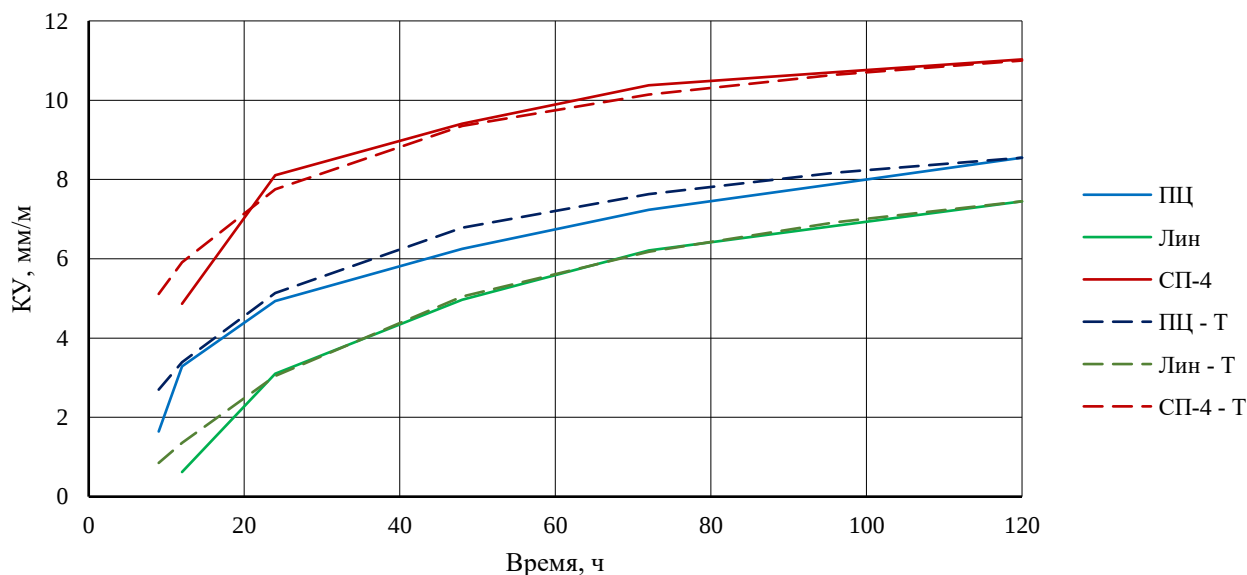


Рис. 3. Изменение во времени КУ ПЦ № 2 по таблице 3:

обозначения те же, что и на рис. 2

Из представленных на рис. 3 результатов очевидно, что:

- кинетика КУ ПЦ № 2 (содержит в качестве минеральной добавки шлак) достаточно хорошо описывается ф. (9) при $k = 0,33$, $d = 0,65$ (таблица 7);
- в присутствии СП Линамикс величина КУ в возрасте 5 сут составляет 0,87 от эталона, а при СП-4 — 1,29;
- СП-4 несколько повышает кинетику КУ значения $k = 0,26$, $d = 0,53$, СП Линамикс замедляет кинетику КУ, значения $k = 0,45$, $d = 0,68$.

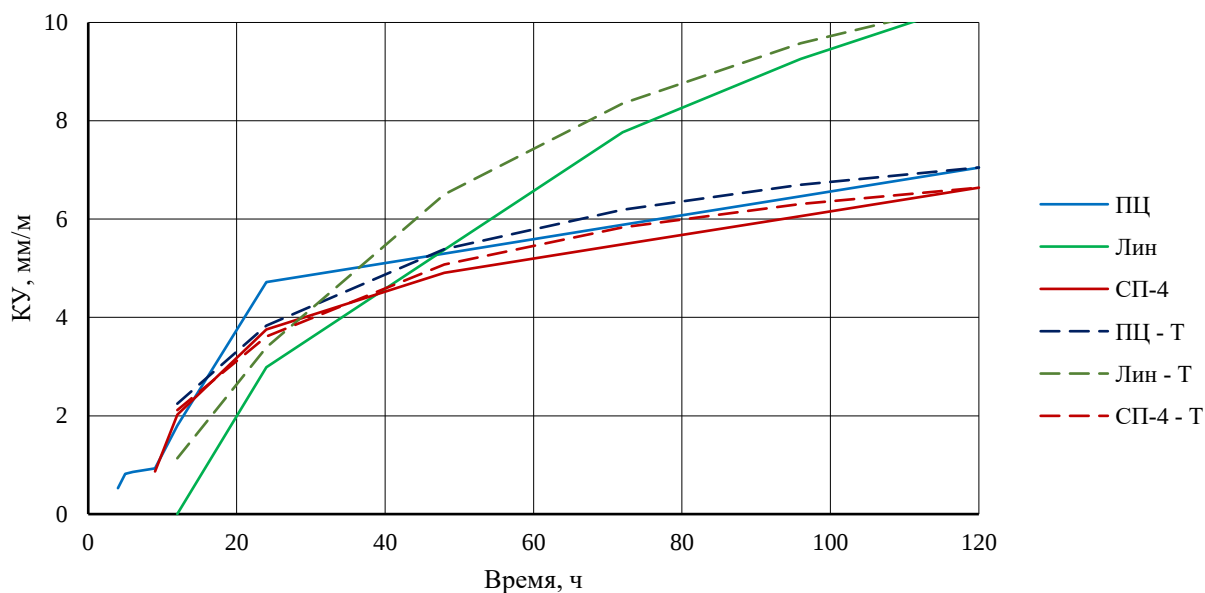


Рис. 4. Изменение во времени КУ ПЦ № 3 по таблице 3:
обозначения те же, что и на рис. 2

Из представленных на рис. 4 результатов очевидно, что:

- кинетика КУ ПЦ № 3 достаточно хорошо описывается ф. (9) при $k = 0,33$, $d = 0,65$ (таблица 7);
- в присутствии СП Линамикс величина КУ в возрасте 5 сут возрастает в 1,48 раза, а при СП-4 — снижается до значения 0,94 относительно бездобавочного эталона;
- СП Линамикс сильно замедляет кинетику КУ значения $k = 0,48$, $d = 0,75$, СП-4 практически не влияет на кинетику КУ значения $k = 0,33$, $d = 0,65$.

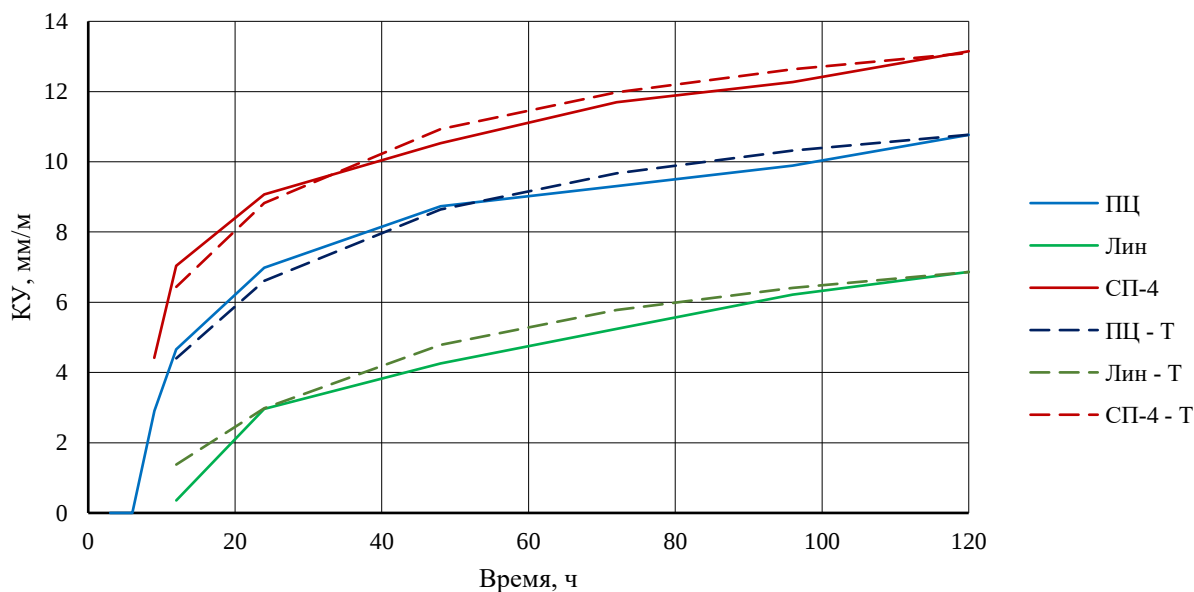


Рис. 5. Изменение во времени КУ ПЦ № 4 по таблице 3:
обозначения те же, что и на рис. 2

Из представленных на рис. 5 результатов очевидно, что:

- кинетика КУ ПЦ № 4 (класс цемента 52,5) достаточно хорошо описывается ф. (9) при $k = 0,3$, $d = 0,6$ (таблица 7);
- в присутствии СП Линамикс величина КУ в возрасте 5 сут снижается до значения 0,64 относительно бездобавочного эталона, а при СП-4 — возрастает в 1,22 раза;
- СП Линамикс замедляет кинетику КУ, значения $k = 0,4$, $d = 0,77$, СП-4 в возрасте до 48 ч резко повышает кинетику КУ значения $k = 0,27$, $d = 0,56$.

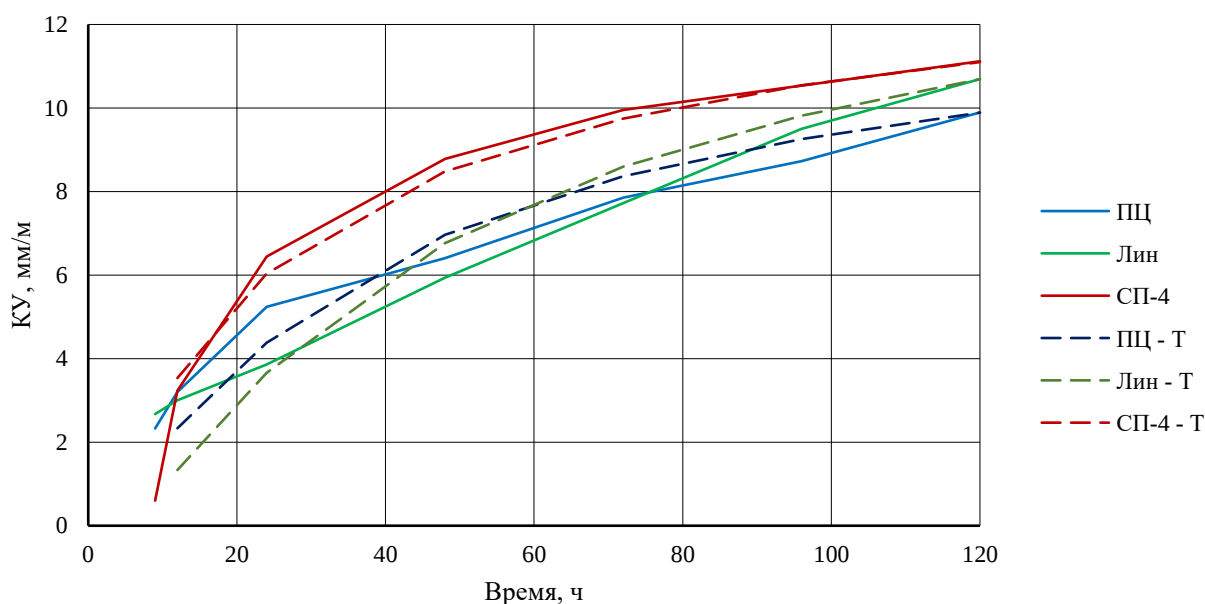


Рис. 6. Изменение во времени КУ ПЦ № 5 по таблице 3:
обозначения те же, что и на рис. 2

Из представленных на рис. 6 результатов очевидно, что:

- кинетика КУ ПЦ № 5 удовлетворительно описывается ф. (9) при $k = 0,36$; $d = 0,70$ (табл. 7);
- в присутствии СП Линамикс величина КУ в возрасте 5 сут возрастает в 1,08 раза, а при СП-4 — в 1,12 раза относительно бездобавочного эталона;
- СП Линамикс замедляет кинетику КУ, значения $k = 0,49$, $d = 0,72$, СП-4 несколько повышает кинетику КУ значения $k = 0,33$, $d = 0,65$.

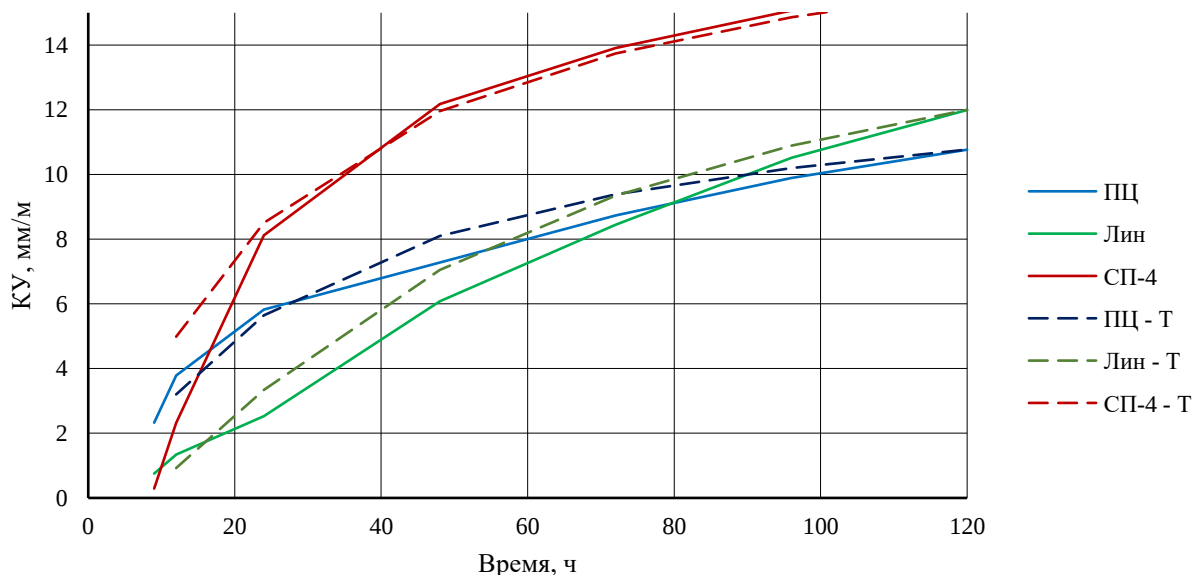


Рис. 7. Изменение во времени КУ ПЦ № 6 по таблице 3:
обозначения те же, что и на рис. 2

Из представленных на рис. 7 результатов очевидно, что:

- кинетика КУ ПЦ № 6 (содержит в качестве минеральной добавки опоку) достаточно хорошо описывается ф. (9) при $k = 0,35$; $d = 0,65$ (таблица 7);
- в присутствии СП Линамикс величина КУ в возрасте 5 сут возрастает в 1,11 раза, а при СП-4 — в 1,45 раза относительно бездобавочного эталона;
- СП Линамикс сильно замедляет кинетику КУ, значения $k = 0,51$, $d = 0,78$, СП-4 практически не влияет на кинетику КУ, значения $k = 0,33$, $d = 0,65$.

Итоговый анализ влияния СП на кинетику КУ представлен в таблице 8.

Таблица 8

Влияние СП на КУ исследованных цементов

Цементы по таблице 3	Показатель цементного камня с добавками	
	КУ _{СП} /КУ _Э в 120 ч	Кинетика КУ
1	1,71/1,45 ¹	не влияет/не влияет
2	0,87/1,29	замедляет/несколько повышает
3	1,48/0,94	сильно замедляет/не влияет
4	0,64/1,12	замедляет/повышает
5	1,08/1,12	замедляет/несколько повышает
6	1,11/1,45	сильно замедляет/практически не влияет

Примечание: 1 — в числителе с Линамикс, в знаменателе с СП-4.

На рис. 8 представлены рассчитанные по (5) значения КУ широко применяемых при возведении монолитных железобетонных конструкций бетонов классов В25–В35 в соответствии с полученными результатами измерения КУ исследованных цементов, в т. ч. с добавками, при различных значениях величины d в (5).

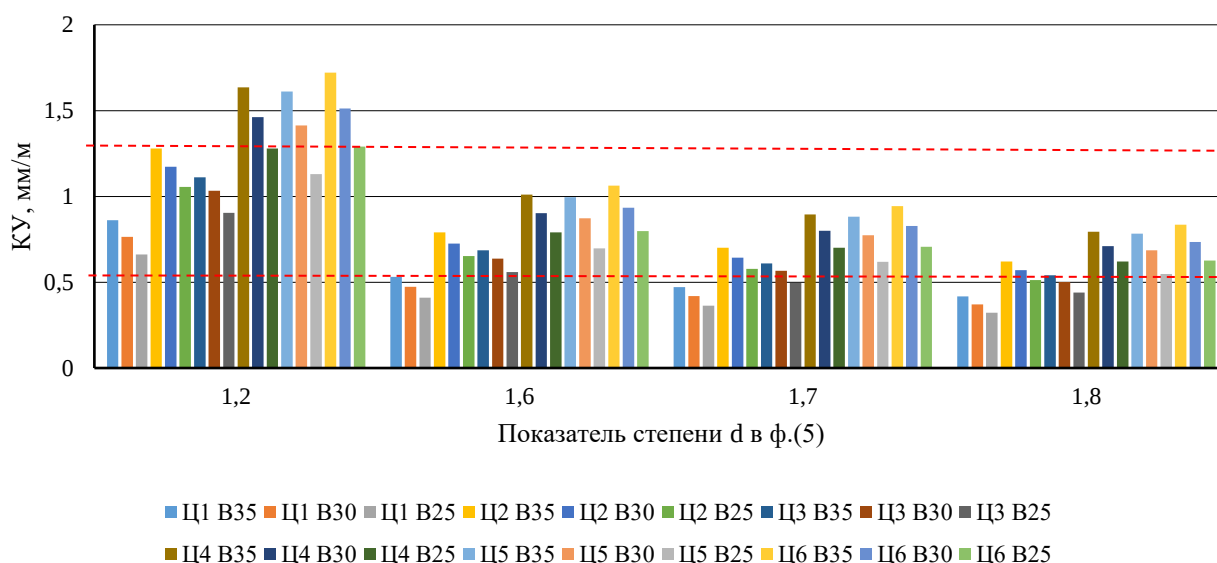


Рис. 8. Расчетные значения КУ бетонов классов В25–В35 на исследованных цементах при различных значениях величины d в (5)

На рис. 8 красным пунктиром обозначены максимальные (1,25 мм/м) и минимальные (0,4 мм/м) значения КУ бетонов по некоторым литературным данным (таблица 2). Очевидно, что наиболее вероятное значение величины d в (6) составляет 1,6–1,8. Исследования в области экспериментального определения КУ бетонов требуют продолжения.

Обсуждение и заключение. Уточнены закономерности изменения величины и кинетики КУ бетонов из высокоподвижных и самоуплотняющихся смесей с учетом влияния состава и свойств цементов в сочетании с некоторыми СП, широко применяемыми при производстве монолитных железобетонных конструкций в Ростовской области. Исследования, выполненные на шести различных портландцементе четырех производителей в сочетании с широко применяемым СП различного химического состава «ПОЛИПЛАСТ СП-4» и «ЛИНАМИКС ПК» тип 2, подтвердили гипотезу о существенном влиянии химико-минералогического состава цементов и химической основы суперпластификаторов на кинетику и количественные значения характеризующих контракцию величин, в частности, аутогенной усадки, что важно для оценки напряженно-деформированного состояния в ранний период твердения массивных монолитных конструкций.

Получены значения ОК исследованных цементов в 120 ч в диапазоне от 2,93 до 3,43 мл/100 г цемента, что хорошо согласуется с известными литературными данными. Полученные значения соотношений КУ/ОК в диапазоне 0,37–0,74 в 120 ч не противоречат известным данным. При введении СП в состав бетона величина КУ в возрасте 120 ч составила от 0,64 до 1,71 относительно бездобавочного эталона. Влияние СП на кинетику КУ зависит как вида цемента и состава СП.

Расчетные значения КУ бетонов классов В25–В35 из высокоподвижных и самоуплотняющихся бетонных смесей в 120 ч в зависимости от вида цемента и СП составили 0,32–1,06 мм/м, что хорошо согласуется с некоторыми литературными данными.

Список литературы/ References

1. Bjøntegaard Ø. *Basis for and practical approaches to stress calculations and crack risk estimation in hardening concrete structures — State of the art*. Blindern: Sintef; 2011. 142 p. URL: <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmliui/bitstream/handle/11250/2411102/coin31.pdf?sequence=1> (accessed: 07.02.2025).
2. Semenov K, Kukolev M, Zaichenko N, Popkov S, Makeeva A, Amelina A. et al. Unsteady temperature fields in the calculation of crack resistance of massive foundation slab during the building period. In: *International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering*. Cham: Springer; 2019. Pp. 455–467.
3. Несветаев Г.В., Чепурненко А.С., Корянова Ю.И., Сухин Д.П. Оценка некоторых методик для расчета температурных напряжений при бетонировании массивных железобетонных фундаментных плит. *Инженерный вестник Дона*. 2022;7(91). URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_20_7_Nesvetaev_Chepurnenko.pdf_8331ae3d10.pdf (дата обращения 07.02.2025).
4. Nesvetaev GV, Chepurnenko AS, Koryanova YuI, Sukhin DP. Evaluation of some Techniques for Calculating Temperature Stresses during Concreting of Massive Reinforced Concrete Foundation Slabs. *Don Engineering Bulletin*. 2022;7(91). (In Russ.) URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_20_7_Nesvetaev_Chepurnenko.pdf_8331ae3d10.pdf (accessed: 07.02.2025).
5. Sellevold E, Bjøntegaard Ø, Justnes H, Dahl PA. High performance concrete: early volume change and cracking tendency. In: *RILEM International Symposium on Thermal Cracking in Concrete at Early Ages*. Munich; 1994. Pp. 229–236. URL: https://www.researchgate.net/publication/283349354_High_Performance_Concrete_Early_Volume_Change_and_Cracking_Tendency (accessed: 07.01.2025).
6. Несветаев Г.В., Корчагин И.В., Корянова Ю.И. О контракции портландцемента в присутствии суперпластификатора. *Научное обозрение*. 2014;7(3):842–846. URL: https://www.researchgate.net/publication/366120707_O_KONTRAKCII_PORTLANDCEMENTA_V_PRISUTSTVII_SUPERPLASTIFIKATORA (дата обращения 07.02.2025).
7. Nesvetaev GV, Korchagin IV, Koryanova YuI. On the Contraction of Portland Cement in the Presence of a Superplasticizer. *Scientific Review*. 2014;7(3):842–846. (In Russ.) URL: https://www.researchgate.net/publication/366120707_O_KONTRAKCII_PORTLANDCEMENTA_V_PRISUTSTVII_SUPERPLASTIFIKATORA (accessed: 07.01.2025).
8. Некрасов В.В. Изменение объема системы при твердении гидравлических вяжущих. *Известия Академии наук СССР*. 1945;6:592–610.
9. Nekrasov VV. Changing the Volume of the System during Hardening of Hydraulic Binders. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences*. 1945;6:592–610. (In Russ.)
10. Rasoolinejad M, Rahimi-Aghdam S, Bazant ZP. Prediction of autogenous shrinkage in concrete from material composition or strength calibrated by a large database, as update to model B4. *Materials and Structures*. 2019;52(2):33. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1331-3>
11. Miyazawa S, Tazawa E. Prediction model for autogenous shrinkage of concrete with different type of cement. In: *Proceedings of the 4th international seminar on self-desiccation and its importance in concrete technology*. Gaithersburg: NIST; 2005.
12. Grasley Z, Lange D, Brinks A, D'Ambrosia M. Modeling autogenous shrinkage of concrete accounting for creep caused by aggregate restraint. In: *Proceedings of the 4th international seminar on self-desiccation and its importance in concrete technology*. Gaithersburg: NIST; 2005. Pp. 78–94. URL: https://www.researchgate.net/publication/269575700_Modeling_Autogenous_Shrinkage_of_Concrete_Accounting_for_Creep_Caused_by_Aggregate_Restraint (accessed: 07.01.2025).
13. Powers TC, Brownyard TL. *Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste*. Chicago: Portland Cement Association; 1948. 992 p.
14. Panchenko AI, Kharchenko IYa, Vasiliev SV. Durability of concrete with compensated chemical shrinkage. *Construction materials*. 2019;8:48–53. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-773-8-48-53>
15. Khairallah RS. *Analysis of Autogenous and Drying Shrinkage of Concrete*. Hamilton: McMaster University; 2009. 154 p. URL: <https://macsphere.mcmaster.ca/bitstream/11375/9421/1/fulltext.pdf> (accessed: 08.02.2025).
16. Esping O, Löfgren I. *Cracking due to plastic and autogenous shrinkage-investigation of early age deformation of self-compacting concrete-experimental study*. Technical report. Sweden: Chalmers University of Technology; 2005. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27325.36323>

15. Bentz DP, Jensen OM, Hansen KK, Oleson JF, Stang H, Haecker CJ. Influence of cement particle size distribution on early age autogenous strains and stresses in cement-based materials. *Journal of the American Ceramic Society*. 2004;84(1):129–135. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2001.tb00619.x>
16. Koenders EAB, Van Breugel K. Numerical modelling of autogenous shrinkage of hardening cement paste. *Cement and Concrete Research*. 1997;27(10):1489–1499. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00170-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00170-1)
17. Kumarappa DB, Peethamparan S, Ngami M. Autogenous shrinkage of alkali activated slag mortars: Basic mechanisms and mitigation methods. *Cement and Concrete Research*. 2018;109:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.004>
18. Abate SY, Park S, Kim H-K. Parametric modeling of autogenous shrinkage of sodium silicate activated slag. *Construction and Building Materials*. 2020;262:120747. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120747>
19. Gowripalan N. Autogenous Shrinkage of Concrete at Early Ages. In: *ACMSM25. Lecture Notes in Civil Engineering*. Singapore: Springer; 2020. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7603-0_27
20. Holt E. *Early age autogenous shrinkage of concrete*. Espoo: VTT Publications; 2001. 184 p. URL: <https://publications.vtt.fi/pdf/publications/2001/P446.pdf> (accessed: 16.01.2025).
21. Nassif H, Suksawang N, Mohammed M. Effect of curing methods on early-age and drying shrinkage of high-performance concrete. *Transportation research record*. 2003;1834:4858. <https://doi.org/10.3141/1834-07>
22. Soliman AM, Nehdi ML. Effect of drying conditions on autogenous shrinkage in ultra-high-performance concrete at early-age. *Materials and Structures*. 2011;44:879–899. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9670-0>
23. Saje D. Reduction of the Early Autogenous Shrinkage of High Strength Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2015;4:310641. <https://doi.org/10.1155/2015/310641>
24. Soliman AM. *Early-Age Shrinkage of Ultra High-Performance Concrete: Mitigation and Compensating Mechanisms*. Electronic Thesis and Dissertation Repository; 2011. 145 p. URL: <https://ir.lib.uwo.ca/etd/145/> (accessed: 17.01.2025).
25. Qin Y, Yi Z, Wang W, Wang D. Time-Dependent Behavior of Shrinkage Strain for Early Age Concrete Affected by Temperature Variation. *Materials Science and Engineering*. 2017;3627251. <https://doi.org/10.1155/2017/3627251>
26. Калиновская Н.Н., Осос Р.Ф., Кучук Е.В. Бетонирование фундаментной плиты турбоагрегата Белорусской АЭС с применением самоуплотняющегося бетона. *Технологии бетонов*. 2017;3–4(128–129):15–19. URL: <http://tehnobeton.ru/pdf/2017-3-4/15-19.pdf> (accessed: 17.01.2025).
- Kalinovskaya NN, Osos RF, Kuchuk EV. Concreting the Foundation Plate of the Turbine Unit of the Belarusian NPP Using Self-sealing Concrete. *Concrete Technologies*. 2017;3–4(128–129):15–19. (In Russ.) URL: <http://tehnobeton.ru/pdf/2017-3-4/15-19.pdf> (accessed: 17.01.2025).
27. Муртазаев С.А.Ю., Сайдумов М.С., Аласханов А.Х., Муртазаева Т.С.А. Высокопрочные бетоны повышенной жизнеспособности для конструкций фундаментов МФК «Ахмат-Тауэр». В: *Сборник докладов международного онлайн-конгресса «Фундаментальные основы строительного материаловедения»*. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова; 2017. С. 875–883. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36305899> (дата обращения 18.01.2025).
- Murtazaev SAYu, Saidumov MS, Alaskhanov AKh, Murtazaeva TSA. High-strength Concretes of Increased Viability for the Structures of the Foundations of the IFC Akhmat Tower. In: *Collection of Reports of the International Online Congress "Fundamentals of Building Materials Science"*. Belgorod: BSTU named after V.G. Shukhov; 2017. Pp. 875–883, (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36305899> (accessed 18.01.2025).
28. Pickett G. Effect of aggregate on shrinkage of concrete and a hypothesis concerning shrinkage. *ACI Journal*. 1956;52:581–590.
29. Бабков В.В., Баженов Ю.М., Быкова А.А., Галдина В.Д., Гридчин А.М., Иванцов В.А. и др. *Цементы, бетоны, строительные растворы и сухие смеси. Часть I*. Комохов П.Г. (ред.). СПб.: Проффессионал; 2007. 804 с.
- Babkov VV, Bazhenov YuM, Bykova AA, Galdina VD, Gridchin AM, Ivantsov VA. and others. *Cements, Concretes, Mortars, and Dry Mixes. Part I*. Komokhov P.G. (ed.). St. Petersburg: Professional; 2007. 804 p. (In Russ.).
30. Lura P, Jensen OM, Van Breugel K. Autogenous shrinkage in high-performance cement paste: an evaluation of basic mechanisms. *Cement and Concrete Research*. 2003;33(2):223–232. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00890-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00890-6)

Об авторах:

Несветаев Григорий Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологии строительного производства Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ScopusID](#), [ORCID](#), nesgrin@yandex.ru

Корянова Юлия Игоревна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии строительного производства Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ScopusID](#), [ORCID](#), koryanova.yi@mail.ru

Шуть Владимир Валерьевич, магистрант Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), don-com-ru@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Г.В. Несветаев: формирование основной концепции, цели и задач исследования, обоснование критериев, общее планирование эксперимента, анализ результатов исследований, редактирование текста, корректировка выводов.

Ю.И. Корянова: детальное планирование, организация и реализация исследований, анализ результатов исследований, подготовка текста, формулировка выводов.

В.В. Шуть: рабочее планирование и реализация исследований, обработка результатов исследований, анализ результатов исследований.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

About the Authors:

Grigory V. Nesvetaev, Dr.Sci. (Eng.) Professor of the Department of Construction Production Technology at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), nesgrin@yandex.ru

Yulia I. Koryanova, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Construction Production Technology at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), koryanova.yi@mail.ru

Vladimir V. Shut, Master's student at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](#), don-com-ru@mail.ru

Claimed Contributorship:

GV Nesvetaev: formation of the basic concept, goals and objectives of the study, justification of criteria, general planning of the experiment, analysis of the research results, editing the manuscript, correction of the conclusions.

YuI Koryanova: detailed planning, organization and implementation of the research, analysis of the research results, preparing the manuscript, formulation of the conclusions.

VV Shut: operational planning and implementation of the research, processing the research results, analysis of the research results.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 19.02.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 07.03.2025

Принята к публикации / Accepted 12.03.2025