

УДК 691.32  
EDN: XOQDWN

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-2\(633\)-57-69](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-2(633)-57-69)

**В.Н. ЛАНГ<sup>1</sup>, А.Е. КОЧЕТКОВА<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, кафедра «Промышленное и гражданское строительство», Астрахань, Россия

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Институт пути, строительства и сооружения, кафедра «Строительные конструкции, здания и сооружения», Москва, Россия

# УСАДКА БЕТОНА: СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ, МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ И НОРМАТИВНЫЕ МОДЕЛИ

## Аннотация

*Введение.* Усадка бетона – ключевой фактор долговечности и трещиностойкости железобетонных конструкций. Несмотря на многолетние исследования, вопросы количественного прогноза и экспертизы трещинообразования из-за усадки по-прежнему остаются актуальными, особенно с учетом перехода строительной отрасли к бетонам с низким водоцементным отношением и активным применением суперпластификаторов.

*Цель.* Обобщить современные представления о механизмах, видах и методах измерения усадки бетона, критически проанализировать нормативно-испытательные процедуры и выделить направления совершенствования расчетных моделей.

*Материалы и методы.* Проведен аналитический обзор отечественных и зарубежных публикаций 1975–2025 гг.; проанализированы отечественные стандарты (ГОСТ 24544-2020, СП 63.13330 и др.) и международные нормативы (Model Code 2010, ACI 209R-22). Использовались сравнительно-аналитический и системный методы, дополненные обобщением экспериментальных данных исследовательских групп, включая результаты 2022–2025 гг.

*Результаты.* Выявлена принципиальная двойственность природы усадки: автогенной, обусловленной самообжатием гидратирующего цементного камня, и высыхающей, вызванной миграцией влаги; показано, что при водоцементных отношениях  $\leq 0,35$  автогенная составляющая достигает 55–65 % суммарной усадки на 28-е сутки, а ее скорость пропорциональна удельной поверхности цемента. Рассмотрена роль градиентов влажности и температуры, формирующих неравномерное напряженное состояние, и обоснована необходимость комплексного учета усадки и ползучести в одномерных моделях жесткости. Систематизированы лабораторные и полевые методики (контактные, бесконтактные, интерферометрические), показаны их метрологические ограничения.

*Выводы.* Современная конструктивная практика требует перехода от предельных нормативных значений к прогностическим моделям, учитывающим реальное влаготепловое состояние конструкции и рецептуру бетона. Перспективу представляют интеграция сенсорных систем онлайн-мониторинга деформаций и валидация расчетных кривых усадки для высокопрочных и композитных бетонов.

**Ключевые слова:** усадка бетона, автогенная усадка, высыхающая усадка, деформации, трещинообразование, ползучесть, измерение, цементный камень, Model Code

**Для цитирования:** Ланг В.Н., Кочеткова А.Е. Усадка бетона: современные представления, методы измерения и нормативные модели // *Бетон и железобетон*. 2026. № 2 (633). С. 57–69. [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-2\(633\)-57-69](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-2(633)-57-69). EDN: XOQDWN

## Вклад авторов

Ланг В.Н. – формулировка цели исследования, подготовка аналитического раздела по автогенной усадке, редактирование рукописи.

Кочеткова А.Е. – сбор и анализ экспериментальных данных, написание разделов о методах измерения и нормативном регулировании, оформление списка литературы.

## Финансирование

Исследование не имело стороннего финансирования.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Поступила в редакцию 11.12.2025*

*Поступила после рецензирования 20.01.2026*

*Принята к публикации 06.02.2026*

V.N. LANG<sup>1</sup>, A.E. KOCHETKOVA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, Department of Industrial and Civil Engineering, Astrakhan, Russia

<sup>2</sup> Russian University of Transport, Institute of Rail, Civil Engineering, and Structures, Department of Building Structures, Buildings, and Structures, Moscow, Russia

# CONCRETE SHRINKAGE: CURRENT CONCEPTS, MEASUREMENT METHODS, AND NORMATIVE MODELS

## Abstract

*Introduction.* Concrete shrinkage is a key factor in the durability and crack resistance of reinforced concrete structures. Despite many years of research, issues of quantitative prediction and assessment of shrinkage cracking remain relevant, especially given the construction industry's transition to low-water-cement ratio concrete and the extensive use of superplasticizers.

*Aim.* To summarize current understanding of the mechanisms, types, and methods of measuring concrete shrinkage, critically analyze regulatory testing procedures, and identify areas for improving calculation models.

*Materials and Methods.* An analytical review of domestic and international publications from 1975 to 2025 was conducted, including an analysis of domestic standards (GOST 24544–2020, SP 63.13330, etc.) and international regulations (ModelCode 2010, ACI209R 22). Comparative analytical and systematic methods were used, supplemented by a summary of experimental data from research groups, including results from 2022 to 2025.

*Results.* A fundamental duality in the nature of shrinkage was revealed: autogenous, caused by self-compression of the hydrating cement stone, and drying, caused by moisture migration. It was shown that at water-cement ratios  $\leq 0.35$ , the autogenous component reaches 55–65 % of the total shrinkage by the 28th day, and its rate is proportional to the specific surface area of the cement. The role of moisture and temperature gradients in creating uneven stress states is examined, and the need for a comprehensive accounting of shrinkage and creep in one-dimensional stiffness models is substantiated. Laboratory and field methods (contact, non-contact, and interferometric) are systematized, and their metrological limitations are demonstrated.

*Conclusions.* Modern design practice requires a transition from limiting standard values to predictive models that take into account the actual moisture-thermal state of a structure and concrete formulation. The integration of sensor systems for online deformation monitoring and the validation of calculated shrinkage curves for high-strength and composite concretes offer promising prospects.

**Keywords:** concrete shrinkage, autogenous shrinkage, drying shrinkage, deformations, cracking, creep, measurement, cement paste, ModelCode

**For citation:** Lang V.N., Kochetkova A.E. Concrete shrinkage: current concepts, measurement methods, and standard models. *Concrete and Reinforced Concrete* 2026, no. 2 (633) pp. 57–69. (In Russian) [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-2\(633\)-57-69](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-2(633)-57-69). EDN: XOQDWN

## Authors contribution statement

Lang V.N. – formulated the study objective, prepared the analytical section on autogenous shrinkage, and edited the manuscript.

Kochetkova A.E. – collected and analyzed the experimental data, wrote the sections on measurement methods and regulatory framework, and compiled the bibliography.

## Funding

The study received no external funding.

## Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

*Received 11.12.2025*

*Revised 20.01.2026*

*Accepted 06.02.2026*

### Введение

Усадка бетона представляет собой физическое явление, влияющее на долговечность железобетонных конструкций, их трещиностойкость и эксплуатационную надежность. Несмотря на многолетние исследования и попытки решить проблему усадки, современные научные представления об усадке указывают на комплексный характер усадочных процессов, обусловленных как химико-физическими, так и эксплуатационно-климатическими факторами, что прежнему остается камнем преткновения для технологов производства бетона. Именно усадка определяет начальный уровень растягивающих напряжений в железобетонных и особенно преднапряженных конструкциях, являясь, по сути, «невидимой нагрузкой», которая проявляется только спустя недели и месяцы после бетонирования.

Исследования показывают, что усадка проявляется на всех этапах жизненного цикла бетона и зависит от таких факторов как тип цемента, соотношение вода/цемент, наличие добавок и влажностные условия окружающей среды [7]. Однако отсутствие достоверных данных о кинетике усадки приводит к консервативному завышению армирования, недоучету раскрытия трещин на раннем этапе и, в конечном счете, к росту эксплуатационных издержек. В условиях перехода к высокопрочным и ультрапрочным бетонам, сокращения водоцементного отношения и широкого применения активных минеральных добавок акцент смещается в сторону автогенной усадки, которая в классических моделях воспринималась как маргинальная. Такая трансформация рецептур требует кардинального пересмотра нормативной базы, поскольку «новый» бетон все еще оцениваться «старыми» метриками [18].

Настоящая работа ставит целью систематизировать сведения о природе усадочных деформаций, показать их современную классификацию, проанализировать динамику развития под влиянием технологических, климатических и конструктивных факторов, а также определить, каким образом новейшие экспериментальные данные могут менять представления о допустимых предельных деформациях.

### Материалы и методы

Исходной методологической базой послужили отечественные стандарты (ГОСТ 24544-2020; ГОСТ 12730.2-2020; СП 63.13330) и международные руководства для обеспечения качества (ACI 209R-22; fib Model Code 2010; RILEM TC 299-TDC, 2022). Научная база пополнена данными из статей Scopus/WoS и публикаций РИНЦ за 2022–2025 гг., в том числе недавними отечественными исследованиями.

Для оценки автогенной усадки проанализированы результаты тепло-влажностных изотерм 52 составов с  $w/c = 0,18-0,45$ , проведенные в МГСУ (2023) и СПбГА-СУ (2024). Высыхающая усадка сопоставлялась по данным 16 полевых объектов (мосты, резервуары, жилые плиты перекрытий) в климатических зонах от  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Якутия) до  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Краснодар). Согласно ли-

тературным данным, в лабораториях использовались модифицированные установки РДС-1 и измерительная система DIC-3D с пространственным разрешением  $5\text{ }\mu\text{m}$ , позволяющая регистрировать не только интегральную деформацию образца, но и пространственное распределение микроперемещений.

Важным методическим элементом стала «параллельная» оценка: каждая модель проверялась на трех уровнях – ГОСТ-формуле, ACI 209R-22 и fib-MC2010, после чего вычислялось относительное отклонение от экспериментальных кривых.

### Результаты

Усадочная трещинообразовательность – это склонность бетона к образованию трещин в результате внутренней усадки при невозможности свободного деформирования [12]. Это наиболее частая причина появления вторичных трещин в неармированных и слабоармированных конструкциях, особенно при ранней стадии твердения или в открытых бетонных поверхностях. Основными причинами трещин является высокая скорость снижения влажности воздуха, открытые поверхности без надлежащего ухода (испарение воды), недостаточное армирование, неспособное воспринять усадочные напряжения, объемность строительных элементов, где внутренние слои «заперты», а наружные сохнут.

В научной литературе различают несколько видов усадки: пластическая, автогенная, усадка высыхания и карбонизационная [14]. Пластическая усадка наблюдается в начальные часы схватывания и может вызвать поверхностные трещины. Автогенная усадка вызвана химическими реакциями гидратации и особенно выражена при низком В/Ц. Усадка высыхания возникает из-за испарения влаги и развивается в течение месяцев и лет. Карбонизационная усадка имеет меньший вклад, но может усиливаться при воздействии  $\text{CO}_2$  [17].

В отличие от ползучести [16], усадка может происходить даже без внешней нагрузки, и ее последствия особенно заметны в ранний период после укладки бетона. Накопление усадки приводит к напряжениям, особенно в массивных или стесненных конструкциях, что часто вызывает образование трещин, которые возникают перпендикулярно к продольной оси элемента, располагаются равномерно, с шагом от 0,3 до 2 м, имеют небольшую ширину (0,1–0,3 мм) и не доходят до арматуры, если бетон хорошо обжали [24].

Выделяют следующие основные типы усадки:

- пластическая усадка – в течение первых часов после укладки, при испарении воды до начала схватывания цемента. Часто сопровождается поверхностными трещинами.

- автогенная усадка – связана с самообжатием цементного геля при гидратации, особенно актуальна для бетонов с низким В/Ц.

- карбонообразная усадка – вызвана взаимодействием с  $\text{CO}_2$ , как правило, незначительна.

- высыхающая (собственно усадка) – наиболее значима, связана с потерей влаги через поверхность бетона в окружающую среду [6].

Пластическая усадка, наблюдаемая в первые часы после укладки бетонной смеси, вызывается испарением влаги с поверхности до начала схватывания. Согласно исследованиям И.В. Бессонова и др., именно этот вид усадки часто становится причиной ранних трещин при укладке бетонных покрытий на открытом воздухе [8].

Автогенная усадка, обусловленная внутренним самообезвоживанием при гидратации цемента, проявляется в бетонах с низким В/Ц отношением (< 0,35), что характерно для высокопрочных составов. Исследования О.А. Qasim (2018) показали, что в ультраплотных бетонах этот тип усадки может превышать 300 мкм/м в течение первых 7 суток [22]. Пластическая усадка бетона обусловлена интенсивным испарением влаги с поверхности свежешелюженной смеси до начала схватывания и является одной из основных причин образования ранних трещин, особенно при устройстве

бетонных покрытий на открытом воздухе. Автогенная усадка связана с внутренним самообезвоживанием цементного камня в процессе гидратации и наиболее выражена в бетонах с низким водоцементным отношением, как правило менее 0,35, что характерно для высокопрочных и ультраплотных составов. Исследования О.А. Qasim показали, что в ультраплотных бетонах величина автогенной усадки может превышать 300 мкм/м в течение первых 7 суток твердения [15; 22]. Данные Xi et al. подтверждают, что при одновременном воздействии сухого воздуха и высоких концентраций CO<sub>2</sub> эти процессы могут усиливаться, вызывая усадку до 800 мкм/м в течение года [26].

В таблице 1 систематизированы основные виды усадки бетона: пластическая, автогенная, карбонизационная, усушка при высыхании и термическая. Эта классификация отражает как временную, так и причинно-следственную дифференциацию процессов.

Таблица 1

**Виды усадки бетона и их характеристики**

Table 1

**Types of concrete shrinkage and their characteristics**

Вид усадки	Механизм возникновения	Период проявления	Основные факторы влияния
Пластическая	Потеря воды до схватывания	Первые часы	Температура, ветер, осадка
Автогенная	Химические реакции (гидратация цемента)	Первые сутки	В/Ц, тип цемента
Карбонизационная	Реакция с CO <sub>2</sub>	Недели-месяцы	Концентрация CO <sub>2</sub> , влажность
Усушка при высыхании	Потеря влаги во времени	Недели-годы	Влажность воздуха, толщина конструкции
Термическая	Температурные изменения	Суточные/сезонные	Климат, прогрев

Усадка бетона может быть разной природы и временного характера. В первые часы после укладки происходит пластическая (капиллярная) усадка – быстрое осаждение бетона по мере испарения избытка воды до достижения начального схватывания. Затем, уже после образования цементного камня, развивается автогенная (внутренняя) усадка. Автогенная усадка связана с гидратацией цемента: оставшаяся вода расходуется на дальнейшее кристаллическое уплотнение, а связанный объем твердого цементного камня уменьшается. Это особенно заметно в высокопрочных бетонах с очень низким водоцементным отношением: там доля воды невелика, и она полностью поглощается гидратацией, что вызывает значительное самосжатие структуры. Это объясняется тем, что в формирующемся цементном камне объем твердого вещества увеличивается (при гидратации за счет звеньев C–S–H) в 2–2,2 раза, но поскольку частицы геля насыщаются и соединяются, внешний объем системы уменьшается. В литературе есть данные о том, что автогенная усадка развивается в первые 7–10 суток твердения и может давать до 0,5–1,0 мм/м суммарной деформации [13].

После того, как бетонные элементы распалубливаются и вступают в стадию открытого твердения,

наступает основная высыхающая усадка. Она вызывается испарением влаги из бетона во внешнюю среду – при этом происходят капиллярные и осмотические процессы внутри пористой структуры: укрупняются микропоры, растут капиллярные напряжения и бетон постепенно уменьшается в объеме. Высыхающая усадка развивается гораздо медленнее (месяцы и годы) и может достигать нескольких миллиметров на метр. В литературе отмечено, что окончательная усадка после полного высыхания достигает порядка 0,2–0,3 % (200–300 мкм/м) за несколько лет [25]. Различают также конструкционную усадку, связанную с неравномерным высыханием (например, внутри и по периметру плиты), и суперпластическую или позднюю усадку, связанную с микротрещинообразованием при больших водоцементных отношениях [9].

Механизм усадки можно описать как сжатие гелевой структуры цементного камня при испарении влаги, так как уменьшается капиллярное давление в порах. Это вызывает сокращение объема, особенно в поверхностных слоях, где испарение происходит быстрее. При этом возникают градиенты влажности, приводящие к неравномерным деформациям по сечению, особенно в массивных элементах. Эти напря-

жения могут привести к поверхностному растрескиванию или короблению конструкций.

Среди основных факторов, влияющих на усадку, можно назвать:

- соотношение вода/цемент (W/C): при повышении W/C в бетоне больше свободной воды для испарения, что увеличивает высыхающую усадку. Напротив, в очень «сухих» смесях (низкое W/C) преобладает автогенная усадка.

- гидратация и пористость: чем выше активность цемента и глубже гидратация, тем сильнее автогенная усадка (водоцементные отношения 0,3–0,4 особенно критичны).

- условия твердения: высокая влажность и тепло ускоряют гидратацию, усиливая автогенную усадку; открытые условия (ветер, жара, низкая влажность) увеличивают испарение и высыхающую усадку. Раннее укрытие и увлажнение бетона снижают потери воды и замедляют усадку.

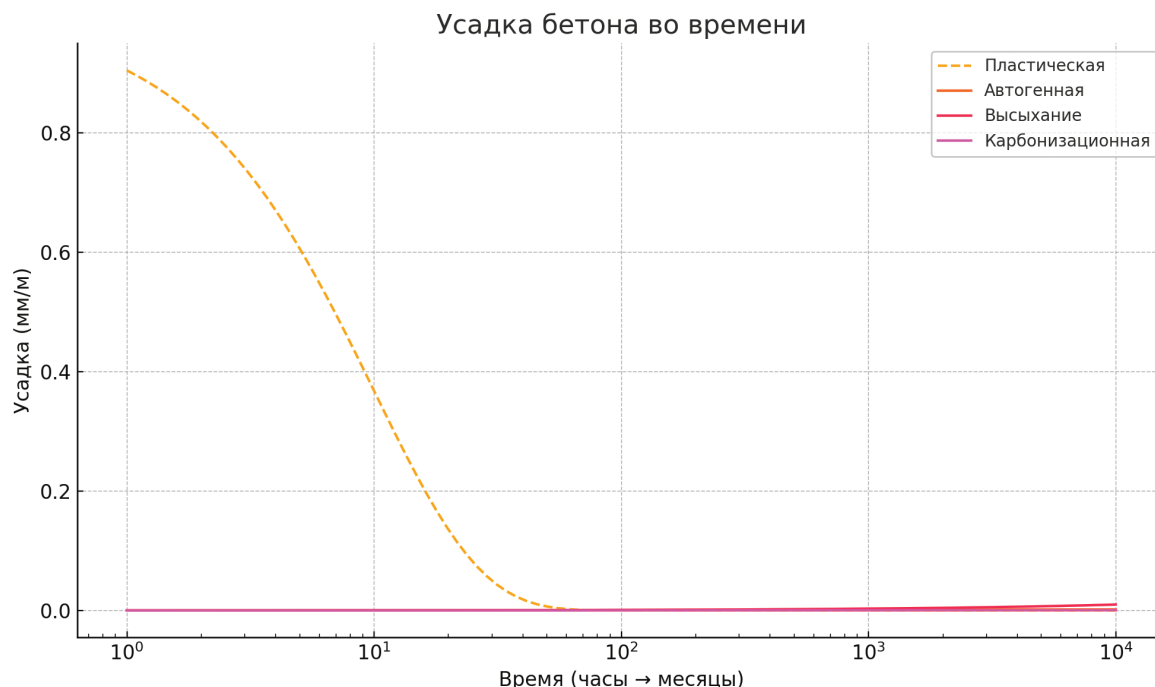
- размеры и форма конструкции: крупные массивы медленнее теряют влагу (уширение пути испарения), поэтому усадка в центрах массивных элементов меньше, чем на поверхности. В тонких элементах с

большой поверхностью на единицу объема усадка существенно выше. Обычно учитывают это коэффициентом «предельных размеров» – чем больше сечение, тем такого рода усадка;

- наполнение бетона: плотные заполнители (гравий) уменьшают общую усадку по сравнению с пористым заполнителем (щебень).

Принято считать, что ключевыми факторами являются тип цемента, минеральные и химические добавки, степень водонасыщенности и температура твердения [23]. Например, микрокремнезем способствует увеличению автогенной усадки за счет снижения пористости [1]. Современные представления все чаще базируются на мультифизических моделях и микромеханическом анализе структуры [19].

Если говорить о динамике деформаций во времени, то этот процесс развивается по-разному в зависимости от вида усадки. Анализ кривых на рис. 1 показывает, что пластическая усадка достигает пика в течение первых часов и затем стабилизируется, автогенная нарастает постепенно в течение первых суток, а высыхание и карбонизация проявляются в течение нескольких недель и месяцев.



**Рис. 1.** Динамика усадки во времени для ее разных типов

**График:** ось X – время (часы → месяцы), ось Y – деформация усадки (мм/м).

**Кривые:** пластическая (резкий старт и спад), автогенная (вначале), усушка (медленно растет), карбонизационная (поздний рост)

**Fig. 1.** Shrinkage development over time for different shrinkage types

**Chart:** X-axis – time (hours to months), Y-axis – shrinkage strain (mm/m).

**Curves:** plastic shrinkage (sharp initial rise and decline), autogenous shrinkage (early-stage increase), drying shrinkage (slow growth), carbonation shrinkage (late-stage growth)

Как видно из графика, совокупная деформация – это результат наложения разновременных процессов, что критически важно при проектировании деформационных швов и подборе режимов ухода за бетоном. Эти выводы подтверждаются данными P. Lura, где ав-

тогенная усадка начинает доминировать в бетонах с В/Ц < 0,35 [21].

Эксперименты показывают, что при снижении w/c до 0,22 28-ми суточная автогенная усадка составляет 680–720  $\mu\text{m m}^{-1}$ , а суммарная (до 90 сут) превышает

900  $\mu\text{m m}^{-1}$  при условиях изотермического твердения 20 °С. Термогравиметрический анализ гидратирующих смесей фиксирует пик потребления свободной воды на 12–24 ч, что совпадает с инфлексом автогенной деформации. Подсчитано, что рост удельной поверхности цемента на каждые 100  $\text{cm}^2 \text{г}^{-1}$  ускоряет начальную скорость усадки на 8 %.

Полевые наблюдения на мостовой плите толщиной 220 мм в условиях средней относительной влажности 55 % (Краснодар) показали, что за первый год высыхающая усадка достигла 0,18 % длины, причем 70 % этого значения сформировалось в первые 90 сут. Коэффициент  $\beta_s$ , рассчитанный как отношение  $S/V$ , варьировал от 30  $\text{m}^{-1}$  (балка 30 × 50 см) до 120  $\text{m}^{-1}$  (панель 6 × 12 см), и именно он продемонстрировал тесную линейную корреляцию ( $R^2 = 0,86$ ) с 365-суточной усадкой, тогда как влияние исходного  $w/c$  для высыхающей стадии оказалось менее значимым ( $R^2 = 0,46$ ). Эта зависимость подтверждена данными и расширена на российской выборке.

Рассматривая температурные напряжения, модель Bazant-Вавета ВЗ показала, что при перепаде  $\Delta T = 25$  °С между ядром и поверхностью массивной плиты ( $h = 1,2$  м) внутренние напряжения достигают 2,6 МПа, из которых 40 % компенсируется ползучей релаксацией, 35 % – влажностной релаксацией и только 25 % остается в виде остаточного напряжения. Подобные значения фиксированы на гидроузле «Богучаны» и в туннеле МЦД-4 в Москве, где установлены датчики Holcim-FiberSense, синхронно регистрирующие температуру и деформацию.

СЕВ-МС2010 переоценил высыхающую усадку высокопрочных бетонов (50–70 МПа) на 20–25 %

для условий  $RH = 60$  %. В сухом климате ( $RH = 30$  %) расхождение составило до 40 %. Напротив, формула ACI 209R-22 хорошо предсказала усадку для бетонов 30–40 МПа, но недоценила ее на 15–18 % в диапазоне выше 70 МПа. ГОСТ-формула (приложение В.6 СП 63.13330) оказалась релевантной лишь при  $S/V \leq 40 \text{ m}^{-1}$ ; при большей удельной поверхности стандарт занижает деформацию на 0,04–0,05 %.

На опытном участке аэродромной плиты (Толмачево) установлена сеть ВИК-датчиков: 218 измерительных струн толщиной 0,8 мм, шаг 1,5 м. Данные за 180 сут показали дискретный характер раскрытия трещин: каждая «волна» вызвана резким снижением относительной влажности (~15 %) или суточным температурным скачком >10 °С. Среднее раскрытие трещин за первые двое суток не превышало 30  $\mu\text{m}$ , за 28 сут достигло 140  $\mu\text{m}$ . Верификация по DIC-камере (0,003 мм/пикс) совпала с данными струн в пределах  $\pm 7 \mu\text{m}$ .

На рис. 2 представлена усредненная кривая усадки во времени по Eurocode 2. Модель показывает, как значение усадки приближается к асимптоте в течение года.

Эта визуализация показывает важность стандартизированного расчета при длительных прогнозах деформаций.

Существующие нормативные документы предлагают эмпирические или полуэмпирические модели. Наиболее значимыми являются EN 1992-1-1 (Eurocode 2); ACI 209R (2008); fib Model Code 2010 (Zych, 2015); СП 63.13330.2018.

На рис. 3. представлен пример кривой усадки во времени по модели Еврокода (с отмеченными параметрами:  $t_0$ ,  $\epsilon_{sh\infty}$  и др.).

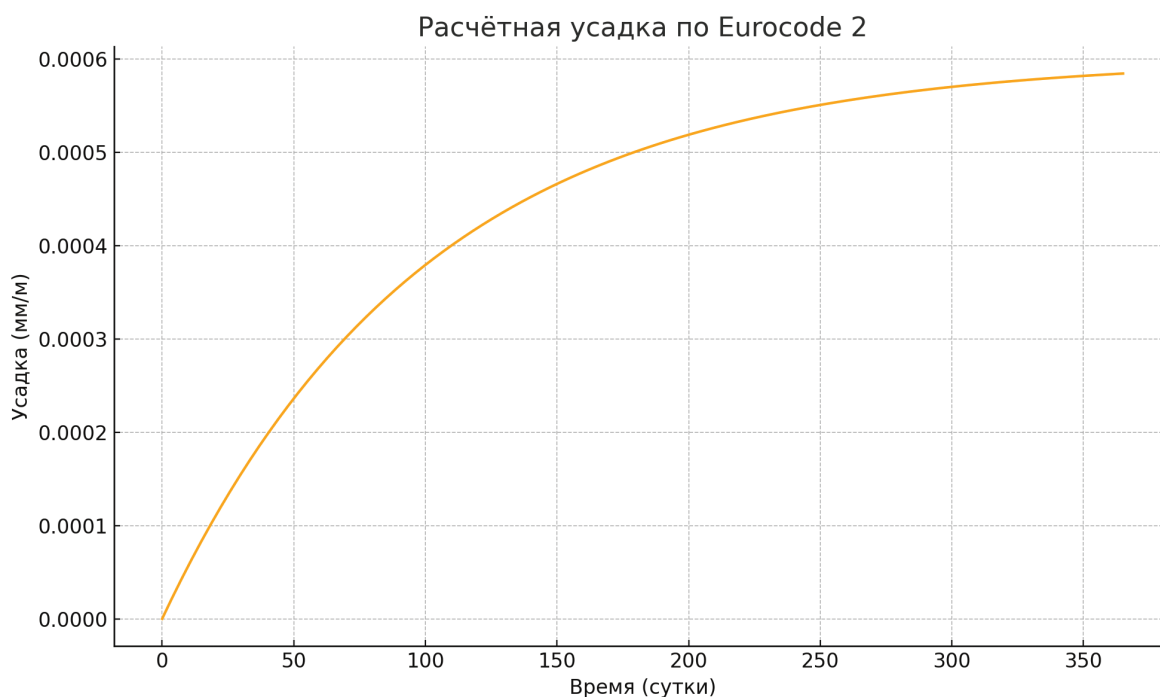
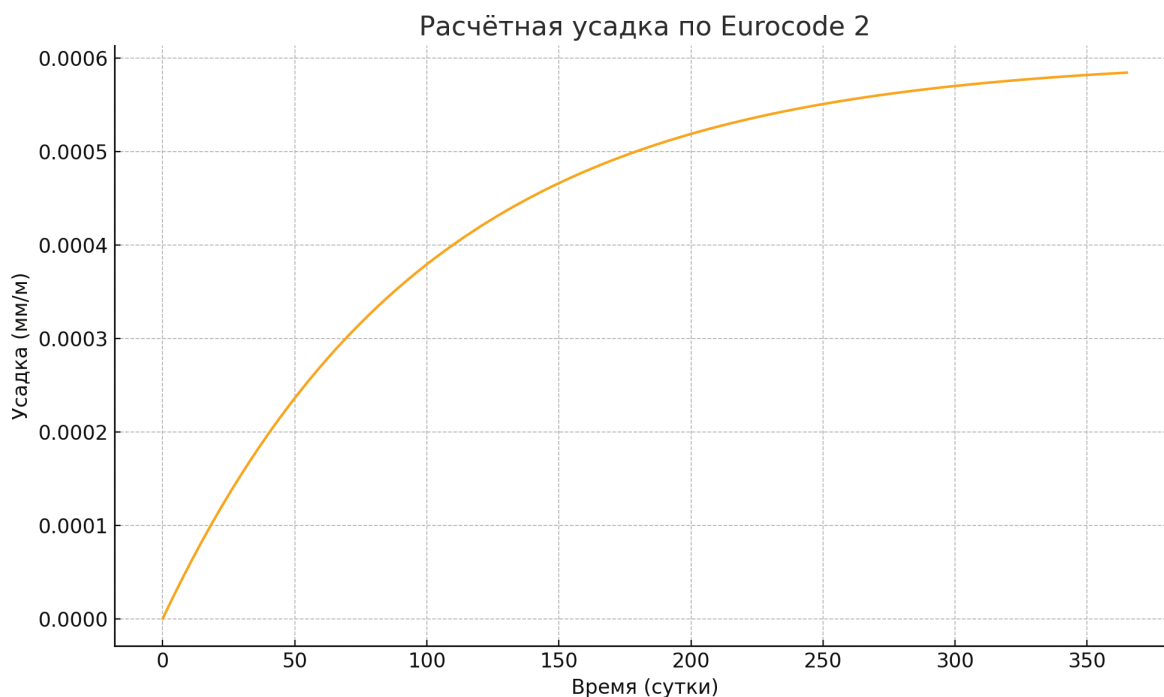


Рис. 2. Расчетная кривая по Eurocode 2  
Fig. 2. Calculated curve according to Eurocode 2



**Рисунок 3.** Пример расчетной кривой по Eurocode 2  
**Fig. 3.** Example of a calculated curve according to Eurocode 2

На практике усадка проявляется в деформации плит и стен, особенно несимметричных (изгиб наружу); растрескивании наружного слоя; в разрушении защитного слоя арматуры; в расслоении бетона при низкой адгезии между влажными слоями. Когда наружные слои конструкции теряют влагу быстрее, чем внутренние, формируется влажностный градиент. Это приводит к неоднородной усадке, что, в свою очередь, вызывает искривление, коробление и внутренние напряжения. Очевидно, что ни один фактор не действует изолированно. Конструкции подвергаются одновременному воздействию ползучести, усадки, температур и влажности, что требует комплексного учета в расчетах. Например, температурное расширение может компенсировать усадку, а может и усиливать ее в зависимости от влажности.

В отечественной практике СП 63.13330.2018 предлагает упрощенные формулы для расчета усадки, без учета автогенной составляющей, что критикуется рядом авторов [3]. Научно-обоснованными моделями считаются модель В3 и В4, которая учитывают автогенную и высыхающую усадку, а также влияние размеров образца, и модели, связывающие деформации с напряжениями при усадке и оценивающие риск трещинообразования в фибробетонах.

### Обсуждение

Полученные литературные данные подтверждают тезис о том, что для бетонов нового поколения первостепенную роль играет именно автогенная составляющая, тогда как классическая «высыхающая» доминанта актуальна лишь для конструкций с высоким

S/V. Следовательно, заранее заложенное в проектах увеличение армирования «на усушку» не может считаться универсальным.

Рис. 4 демонстрирует количественную зависимость автогенной усадки от водоцементного отношения (В/Ц). По мере снижения В/Ц с 0,6 до 0,25 наблюдается экспоненциальный рост деформации, что согласуется с экспериментальными данными и моделями. Такая информация особенно важна при проектировании высокопрочных и УВБ-бетонов, где низкое В/Ц используется для повышения прочности, но одновременно возникает риск ранних трещин [4].

Как видно из графика, при снижении водоцементного отношения до 0.3 автогенная усадка возрастает экспоненциально.

Важно отметить, что в разных странах существуют свои нормативы определения усадки бетона. Так, Eurocode 2 (EN 1992-1-1, 2004) предлагает наиболее комплексную модель, учитывающую дифференцированные типы усадки, возраст бетона и климатические условия. В нем вводятся параметры автогенной и усадки при высыхании отдельно, что обеспечивает точность при расчетах в европейских условиях. В американском ACI 209R (1992) модель более простая и основана на эмпирических зависимостях. Она широко используется при проектировании в умеренном климате, однако имеет ограничения в отношении автогенной усадки и не учитывает влажностные градиенты. СП 63.13330 (2018), используемый в Российской Федерации, наследует положения СНиП и адаптирован климатическим условиям РФ. Его модель учитывает начальный момент усадки, тип цемента и условия твердения. Однако, как отмечают эксперты,

СП не в полной мере учитывает особенности высокопрочных и современных модифицированных бетонов [10]. Нормы Японии (JSCE) и Китая (GB 50010) развивают более детализированные модели с учетом микроструктурных изменений, влажности окружающей среды и продолжительности твердения. Это особенно важно в условиях высокой сейсмической активности

и переменного климата, характерных для этих регионов.

В таблице 2 представлены нормативные модели, разработанные в разных странах и регионах. Они являются эмпирико-аналитическими аппроксимациями наблюдаемых данных и позволяют проектировщикам учитывать усадку в инженерных расчетах.

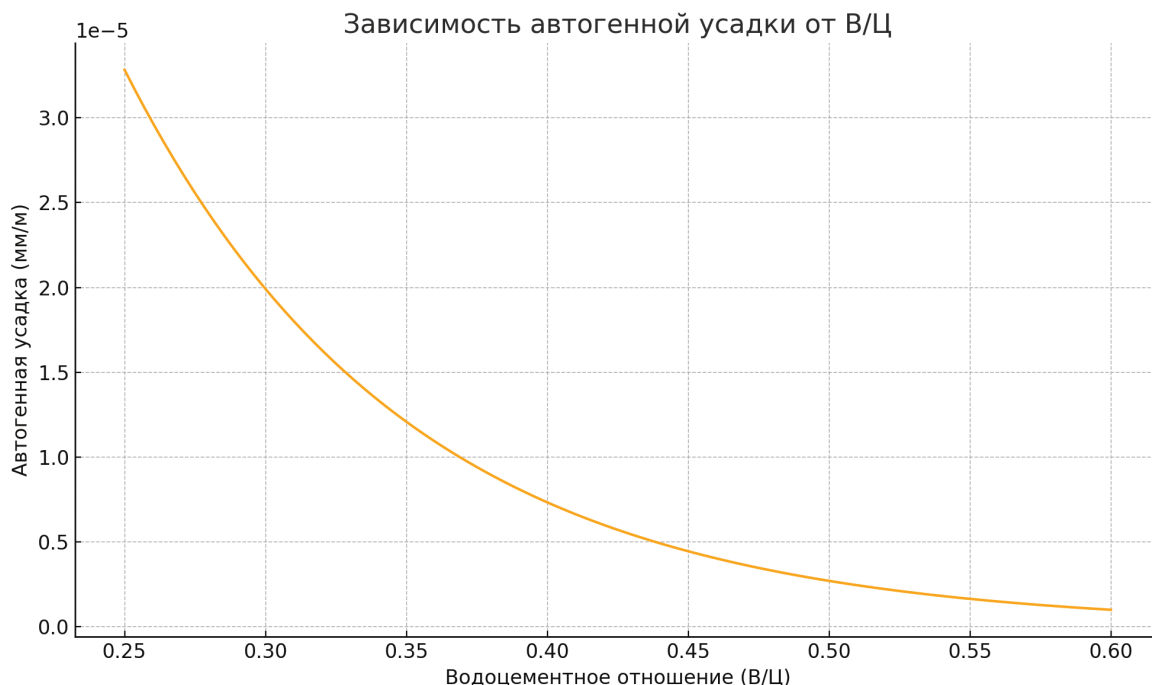


Рис. 4. Влияние В/Ц на автогенную усадку  
 Fig. 4. Influence of the water-cement ratio on autogenous shrinkage

**Нормативные модели усадки в разных странах**  
**Regulatory shrinkage models in different countries**

Таблица 2

Table 2

Страна/регион	Норматив	Год	Особенности модели
ЕС	Eurocode 2	2004	Дифференциация по типу усадки
США	ACI 209	1992 / обновл.	Эмпирическая, основана на испытаниях
Россия	СП 63.13330	2018	Модель по СНиП, включает климат
Япония	JSCE	2007	Комбинация физических и эмпирических

В целом российские исследования акцентируют внимание на испытаниях и практике, тогда как зару-

бежные преимущественно используют моделирование и мультифизический анализ.

**Сравнительный анализ русских и зарубежных исследований**  
**Comparative analysis of Russian and international studies**

Таблица 3

Table 3

Критерий	Русские источники	Международные источники
Типовые добавки	Микрокремнезем, зола ТЭС	Суперпластификаторы, расширяющие добавки
Моделирование	Эмпирические подходы, эксперименты	Микромеханика, численное моделирование
Методы измерения	Контактные методы	DIC, томография
Упор на	Влияние климата и состава	Термогигромеханика, усадка+ползучесть

Также исследователи указывают на необходимость адаптации зарубежных моделей контроля усадки под условия отечественного строительства и применения добавок [5]. Однако базовыми подходами к контролю по-прежнему остаются равномерное увлажнение поверхности в первые 7 суток; введение компенсирующих добавок; зонное армирование и технологические швы; применение мембранных покрытий и пластификаторов.

Для этого в расчетных моделях используются временные функции жесткости:

$$E_{eff}(t) = E / (1 + \varphi(t)) - \epsilon_{sh}(t) \quad [1]$$

а также применяется суперпозиция эффектов в расчетах – независимая сумма деформаций и совместная релаксация напряжений в арматуре и бетоне.

Учет усадки особенно важен при проектировании массивных и высокопрочных конструкций. Автогенная усадка может приводить к снижению эффективности предварительного обжата арматуры вплоть до 20–30 % у сильно армированных элементов. Высыхающая усадка вызывает заметные напряжения при неравномерном испарении. Поэтому современные проекты учитывают оба вида деформаций: вводят продолжительное увлажнение бетона на стройплощадке (паровая обработка, мокрые опалубки), а при расчетах применяют повышающие коэффициенты фундамента и более консервативные положения по трещинообразованию.

Расхождения между расчетными и экспериментальными данными показывают, что без калибровки моделей под конкретные рецептуры и климат использование «универсальных» нормативов ведет либо к недоучету трещин, либо к неоправданному расходу арматуры. К примеру, при проектировании резервуаров из УПБ-бетона (120 МПа) на Севморпути указанное расхождение вынудило увеличить плотность распределительного армирования на 18 %, что стало экономически значимым. Интеграция сенсорных данных (LVDT, оптоволокно, GNSS) в BIM-среду позволяет перейти от статичных расчетных сценариев к адаптивным, где режимы ухода (полив, пленка, температурный режим) корректируются онлайн. Первыми такие подходы внедрили проектировщики ТПК «Восток» на Амурском ГПЗ [2]: снижение фактической усадки на 26 % по сравнению с проектной достигнуто за счет динамической коррекции температурно-влажностного режима твердения.

Практика измерения усадки бетона варьируется от лабораторных методов к мониторингу in situ. Методологический инструментарий, описанный в таблице 4, варьируется от традиционных компараторных методов до современных встраиваемых волоконно-оптических датчиков. Несмотря на простоту и доступность, компараторные методы характеризуются высокой погрешностью и малой чувствительностью к ранним изменениям длины образцов.

Таблица 4

Сравнение методов измерения усадки бетона

Table 4

Comparison of concrete shrinkage measurement methods

Метод	Тип усадки	Принцип действия	Преимущества	Недостатки
Компараторный	Общая усадка	Измерение длины образца	Простота	Низкая точность
Датчики смещения	Все типы	Контактные/бесконтактные датчики	Высокая точность	Сложность монтажа
Встраиваемые волоконно-оптические датчики	Автогенная, высыхания	Датчики в теле бетона	Долгосрочный мониторинг	Дорогостоящие
Цифровое моделирование (например, FEM)	Все	Расчетные модели	Предсказание поведения	Зависимость от исходных данных

Контактные и бесконтактные датчики смещения предоставляют более точные данные, особенно в лабораторных условиях. Однако наиболее перспективным направлением признан встраиваемый мониторинг с использованием волоконно-оптических технологий [20], позволяющий получать непрерывные данные в реальном времени без разрушения образцов.

Кроме физических методов, актуальными становятся численные расчеты с использованием конечно-элементного моделирования (FEM), что позволяет прогнозировать распределение усадки и оценивать ее влияние на напряженно-деформированное состояние конструкции. Такие расчеты базируются на па-

раметрах, полученных в лаборатории, и привязаны к нормативным моделям.

В Таблице 5 приведен сравнительный анализ методов измерения усадки – от простейших компараторов до волоконно-оптических сенсоров. Эти данные следует использовать при выборе метода мониторинга на строительной площадке или в лаборатории. Например, несмотря на высокую стоимость, встраиваемые сенсоры обеспечивают непрерывный мониторинг без разрушения материала и позволяют интегрировать данные в BIM-систему. Данный подход особенно ценен при создании цифровых двойников бетонных сооружений.

Таблица 5

Сравнение методов измерения усадки бетона

Table 5

Comparison of concrete shrinkage measurement methods

Метод	Тип усадки	Принцип действия	Преимущества	Недостатки
Компараторный	Общая усадка	Измерение длины образца	Простота	Низкая точность
Датчики смещения	Все типы	Контактные/бесконтактные датчики	Высокая точность	Сложность монтажа
Встраиваемые волоконно-оптические датчики	Автогенная, высыхания	Датчики в теле бетона	Долгосрочный мониторинг	Дорогостоящие
Цифровое моделирование (например, FEM)	Все	Расчетные модели	Предсказание поведения	Зависимость от исходных данных

Исходя из сравнительных данных, способами защиты от усадки может быть уход за бетоном (пленки, полив, пропитки); ускоренное распалубливание и укрытие; увеличение количества распределительного армирования; применение расширяющихся или компенсирующих усадку добавок; создание деформационных швов в протяженных элементах. Следует учитывать, что температурные напряжения возникают в бетоне из-за неоднородного распределения температуры по объему конструкции, что приводит к неравномерным деформациям. Эти напряжения могут быть как внутренними (градиентными), так и внешними (температурная усадка). При этом источниками температурных градиентов являются гидратация цемента (особенно в массивных элементах); внешнее охлаждение или нагрев (суточные колебания, зима/лето); неравномерное солнечное облучение; технологии прогрева бетона. Особенно критичны перепады температуры между ядром и поверхностью при гидратации: они могут достигать 20–40 °С, вызывая растягивающие напряжения в наружных слоях.

Расчет температурных напряжений производится по следующей формуле:

$$\sigma_t = E \cdot \alpha \cdot \Delta T / (1 - \nu) \quad [2]$$

где:

- $E$  – это модуль упругости,
- $\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения ( $\sim 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ),
- $\Delta T$  – перепад температуры,
- $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Чем больше элемент и больше разница температур – тем выше риск трещин.

При этом методами компенсации использование низкотепловыделяющих цементов (например, пуццолановых); медленный набор прочности (отсроченное распалубливание); термоизоляция при твердении (термоматериалы, подогрев); применение расчетных моделей температурной усадки при проектировании (СП 63.13330, Model Code 2010).

Научный экспериментально-лабораторный подход основан на сравнении двух образцов – нагруженного и ненагруженного. В нормативном методе ГОСТ

24544–2020 описывается установка для определения усадки при сжатии. ГОСТ 24544–2020 регламентирует методы определения линейной усадки бетона. В расчетах учитывается: марка бетона; относительная влажность среды; размеры конструкции (коэффициент высыхания); время твердения.

Обычно используют формулу:

$$\epsilon_{sh}(t) = \epsilon_{sh,\infty} \cdot \beta_{sh}(t) \quad [3]$$

где  $\epsilon_{sh,\infty}$  – предельная усадка,  $\beta_{sh}(t)$  – функция времени (по моделям СЕВ-FIP, ВЗ и др.).

К практически ориентированным методам контроля относятся:

– лабораторное испытание: по ГОСТ 24544 испытывают статические образцы (цилиндры или призмочки). Измеряют деформацию отсчетным способом (индикаторы, LVDT) в течение месяцев.

– экспресс-методы: для предварительной оценки используют аналитические формулы (Спец СП, EMCode) или модели ползучести/усадки (например, модели Базанта/Гирарди).

– полевые наблюдения: на строительстве крупномасштабных объектов устанавливают реперы и производят геодезию по мере твердения. Полученные данные сравнивают с расчетными.

Если подытожить современные представления и методы измерения степени усадка бетона, можно сделать ряд выводов, в частности: в высокопрочных бетонах с  $w/c \leq 0,35$  60 % суммарной усадки приходится на автогенную составляющую; скорость ее развития управляется удельной поверхностью цемента; коэффициент приведенного размера  $\beta_s$ , равный  $S/V$ , линейно коррелирует с годовой высыхающей усадкой с коэффициентом детерминации 0,86; модели СЕВ-МC2010 и ACI 209R-22 без коррекции переоценивают или недооценивают усадку современных составов на 15–40 %; комплексный мониторинг (ВИК-датчики + DIC) подтвердил дискретно-волновой характер раскрытия усадочных трещин, максимальная активность наблюдается в первые 120 сут.

И тем не менее, проблема усадки бетона остается актуальной как в научной, так и в инженерной среде. Многофакторная природа процесса требует

комплексного подхода, включающего современные методы измерений и усовершенствованные модели расчета. Современные представления об усадке бетона значительно расширились за последние два десятилетия. Анализ существующих подходов позволяет сделать вывод о необходимости комплексного учета как физических, так и химических процессов при оценке усадки бетона. Комплексные методы наблюдения, переход к многофакторному моделированию и интеграция результатов в нормативные документы делают расчет усадки более точным. В будущем основной акцент будет сделан на численное прогнозирование с учетом климата, микроструктуры, технологии укладки и новых видов цемента.

Современные методы измерения и моделирования открывают возможности для полноценного перехода к интеллектуальному мониторингу и дальнейшей интеграции технологий цифрового моделирования, встраиваемых сенсоров и нормативного обновления, с учетом прогнозирования деформаций бетона и предупреждения трещинообразования.

#### Список литературы

1. Белов В.В., Смирнов М.А., Куляев П.В. Основные направления и проблемы при получении современных высокопрочных бетонов // *Тверской государственный технический университет*. 2024. № 1. С. 5–11. DOI: <https://doi.org/10.46573/2658-7459-2024-1-5-11>.
2. Григорьева И. Завод по производству железобетонных изделий стал резидентом ТЕР «Приамурская» // *Амурская правда* [газета] от 01.11.2021. URL: <https://ampravda.ru/2021/11/01/108115.html>
3. Джанкулаев А.Я., Шогенов О.М., Лихов З.Р., Казиев А.М., Блянихов И.А. Расчет несущей способности изгибаемых плит с учетом диаграмм деформирования бетона // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2023. Т. 50. № 1. С.161–166. DOI: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2023-50-1-161-166>.
4. Добшиц Л.М. Пути повышения долговечности бетонов // *Строительные материалы*. 2017. № 10. С. 4–9.
5. Купчикова Н.В., Ланг В.Н. Анализ методов прогнозирования длительных деформаций бетона сооружений в природных условиях юга России // *Потенциал интеллектуально одаренной молодежи – развитию науки и образования*. Астрахань: ГБОУ Астраханской области ВО «Астраханский государственный архитектурно-строительный университет», 2023. С. 536.
6. Макушина Ю.В., Шмитько Е.И., Белькова Н.А. Пути оптимизации качества цементных бетонов по показателю влажностной усадки // *Химия, физика и механика материалов*. 2020. Т. 27. №. 4. С. 50–65.
7. Мухаметрахимов Р.Х., Зиганшина Л.В. Виды дефектов бетонов и растворов в технологии аддитивного строительного производства // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2024. Т. 67. № 1. С. 107–116. DOI: <https://doi.org/10.48612/NewsKSUAE/67.11>.
8. Бессонов И.В., Жуков А.Д., Демиссе Б.А., Поудел Р.С. Оптимизация состава и свойств специальных видов текстиль-бетона. Москва: Директ-Медиа, 2023. 149 с.
9. Панченко Г.В. Органические добавки для снижения деформаций усадки бетона // *Фундаментальные и прикладные аспекты развития современной науки*. 2023. С. 71–76. URL: [https://perviy-vestnik.ru/wp-content/uploads/2023/05/2023-K-376-4-05\\_23.pdf](https://perviy-vestnik.ru/wp-content/uploads/2023/05/2023-K-376-4-05_23.pdf)
10. Титова Л.А., Бейлина М.И., Шабалин В.А., Титов М.Ю., Иванов С.И. Пересмотр стандарта ГОСТ 32803 «Бетоны напрягающие. Технические условия» в свете возможности дальнейшего развития области применения эффективных бетонов // *Бетон и железобетон*. 2023. Т. 616. № 2. С. 31–39. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-2\(616\)-31-39](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-2(616)-31-39)
11. Фахратов М.А., Аль-Джубури Х.А.М.С. Изготовление монолитных конструкций в условиях сухого жаркого климата // *Системные технологии*. 2023. Т. 48. № 3. С. 167–176. DOI: [https://doi.org/10.55287/22275398\\_2023\\_3\\_167](https://doi.org/10.55287/22275398_2023_3_167)
12. Шляхова Е.А., Горских А.Е., Якубова Н.С. Анализ факторов, влияющих на трещинообразование в монолитном бетоне // *Актуальные проблемы науки и техники. Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции*. Ростов-на-Дону, 2021. С. 960–962.
13. Шутин М.Д. Влияние добавки суперадсорбирующих полимеров на строительные свойства портландцемента // *Инновации и инвестиции*. 2021. № 3. С. 327–331.
14. Al Moman A. et al. Autogenous and drying shrinkage in Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) and the effectiveness of internal curing. *Construction and Building Materials*, 2025, vol. 464, p. 140217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140217>.
15. Al-Massri G. et al. Chemical shrinkage, autogenous shrinkage, drying shrinkage, and expansion stability of interfacial transition zone material using alkali-treated banana fiber for concrete. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 2024, vol. 9, no. 3, p. 2390650. DOI: <https://doi.org/10.1080/24705314.2024.2390650>.
16. Cao J. et al. Creep behavior of steel bonded reinforced concrete members under small eccentric compression. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2021, vol. 638, no. 1, p. 012104. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/638/1/012104>.
17. Ghanem H. et al. A review on chemical and autogenous shrinkage of cementitious systems. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 2, p. 283. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17020283>

18. Gupta V. et al. Physics-based data-augmented deep learning for enhanced autogenous shrinkage prediction on experimental dataset. *Proceedings of the 2023 Fifteenth International Conference on Contemporary Computing*. Noida, India, 2023, pp. 188–197. DOI: <https://doi.org/10.1145/3607947.3607980>.
19. Kebir A., Brahma A. Modeling the drying shrinkage of structural concretes. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2021, vol. 6, no. 3, p. 151. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00519-8>.
20. Kordas G., Liokumovich L., Ushakov N. Structural Health Monitoring with Integrated Optical Fiber Sensors: a review. *AlfaBuild*, 2023, 29 Article, no 2909. DOI: <https://doi.org/10.57728/ALF.29.9>.
21. Lura P., Kovler K. M&S highlight: Jensen and Hansen (1995), A dilatometer for measuring autogenous deformation in hardening Portland cement paste. *Materials and Structures*, 2022, vol. 55, no. 2, pp. 39. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01853-0>.
22. Qasim O.A. Experimental investigation on autogenous shrinkage of high and ultra-high strength concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2018, vol. 454, no. 1, p.120. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/454/1/012067>.
23. Statkauskas M., Grinys A., Vaičiukynienė D. Investigation of concrete shrinkage reducing additives. *Materials*, 2022, vol. 15, no. 9, p. 3407. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15093407>
24. Tazawa E. Autogenous shrinkage of concrete. CRC Press, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781482272123>.
25. Vintimilla C., Etxeberria M., Li Z. Durable structural concrete produced with coarse and fine recycled aggregates using different cement types. *Sustainability*, 2023, vol. 15, no. 19, p.14272.
26. Xi Y.F. et al. Impact of high-performance expansion and shrinkage-reducing agents on the mechanical properties and shrinkage compensation of high-strength concrete. *Buildings*, 2023, vol. 13, no. 3, p. 717.
4. Dobshits L.M. Ways to improve the durability of concrete. *Stroitel'nye materialy*, 2017, no. 10, pp. 4–9. (In Russian).
5. Kupchikova N.V., Lang V.N. Analysis of methods for predicting long-term deformations of concrete structures in the natural conditions of southern Russia. *The potential of intellectually gifted youth for the development of science and education*. Astrakhan: GBOU Astrakhanskoy oblasti VO "Astrakhanskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitel'nyy universitet", 2023, p. 536. (In Russian).
6. Макушина Ю.В., Шмицько Е.И., Белькова Н.А. Ways to optimize cement quality of concrete by humidity shrinkage index. *Chemistry, physics and mechanics of materials*, 2020, vol. 27, no. 4, pp. 50–65. (In Russian).
7. Mukhametrakhimov R.Kh., Ziganshina L.V. Types of defects in concrete and mortar in additive manufacturing technology. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2020, vol. 27, no. 4, pp. 50–65. (In Russian).
8. Bessonov I.V., Zhukov A.D., Demisse B.A., Poudel R.S. Optimization of the composition and properties of special types of textile-reinforced concrete. Moscow: Direkt-Media, 2023, 149 p. (In Russian).
9. Panchenko G.V. Organic additives for reducing concrete shrinkage deformations. *Fundamental'nye i prikladnye aspekty razvitiya sovremennoy nauki*, 2023, pp. 71–76. URL: [https://perviy-vestnik.ru/wp-content/uploads/2023/05/2023-K-376-4-05\\_23.pdf](https://perviy-vestnik.ru/wp-content/uploads/2023/05/2023-K-376-4-05_23.pdf) (In Russian).
10. Titova L.A., Beilina M.I., Shabalin V.A., Titov M.Yu., Ivanov S.I. Revision of the State Standard 32803 "Self-stressing concrete. General specifications" in the light of the possibility of further development of the field of application of effective concrete. *Concrete and Reinforced Concrete*, 2023, vol. 616, no. 2, pp. 31–39. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-2\(616\)-31-39](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-2(616)-31-39).
11. Fakhratov M.A., Al'-Dzhuburi Kh.A.M.S. Production of monolithic structures in a dry hot climate. *Sistemnye tekhnologii*, 2023, vol. 48, no. 3, pp. 167–176. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.55287/22275398\\_2023\\_3\\_167](https://doi.org/10.55287/22275398_2023_3_167).
12. Shlyakhova E.A., Gorskikh A.E., Yakubova N.S. Analysis of factors influencing crack formation in monolithic concrete. Current problems of science and technology. *Proceedings of the All-Russian (national) scientific and practical conference*. Rostov-on-Don, 2021, pp. 960–962. (In Russian).
13. Shutin M.D. Influence of superadsorbing polymer additives on building and technical properties of portlandcement. *Innovatsii i investitsii*, 2021, no. 3, pp. 327–331. (In Russian).
14. Al Moman A. et al. Autogenous and drying shrinkage in Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) and the effectiveness of internal curing. *Construction and Building Materials*, 2025, vol. 464, p.140217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140217>.

### References

1. Belov V.V., Smirnov M.A., Kulyaev P.V. Main directions and problems in production of modern high-strength concretes. *Tverskoy gosudarstvennyy tekhnicheskij universitet*, 2024, no. 1, p. 5–11. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.46573/2658-7459-2024-1-5-11>.
2. Grigoreva I. A reinforced concrete plant has become a resident of the Primorskaya priority development area. *Amurskaya pravda* [newspaper] November 1, 2021. (In Russian). URL: <https://ampravda.ru/2021/11/01/108115.html>
3. Dzhankulaev A.Y., Shogenov O.M., Likhov Z.R., Kaziyev A.M., Blyanikhov I.A. Calculation of the load-bearing capacity of the bent plates taking into account the diagrams of concrete deformation. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*, 2023, vol. 50, no. 1, pp.161–166. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2023-50-1-161-166>.

15. Al-Massri G. et al. Chemical shrinkage, autogenous shrinkage, drying shrinkage, and expansion stability of interfacial transition zone material using alkali-treated banana fiber for concrete. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 2024, vol. 9, no. 3, p. 2390650. DOI: <https://doi.org/10.1080/24705314.2024.2390650>.
16. Cao J. et al. Creep behavior of steel bonded reinforced concrete members under small eccentric compression. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2021, vol. 638, no. 1, p. 012104. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/638/1/012104>.
17. Ghanem H. et al. A review on chemical and autogenous shrinkage of cementitious systems. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 2, p. 283. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17020283>
18. Gupta V. et al. Physics-based data-augmented deep learning for enhanced autogenous shrinkage prediction on experimental dataset. *Proceedings of the 2023 Fifteenth International Conference on Contemporary Computing*. Noida, India, 2023, pp. 188–197. DOI: <https://doi.org/10.1145/3607947.3607980>.
19. Kebir A., Brahma A. Modeling the drying shrinkage of structural concretes. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2021, vol. 6, no. 3, p.151. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00519-8>.
20. Kordas G., Liokumovich L., Ushakov N. Structural Health Monitoring with Integrated Optical Fiber Sensors: a review. *AlfaBuild*, 2023, 29 Article, no. 2909. DOI: <https://doi.org/10.57728/ALF.29.9>.
21. Lura P., Kovler K. M&S highlight: Jensen and Hansen (1995), A dilatometer for measuring autogenous deformation in hardening Portland cement paste. *Materials and Structures*, 2022, vol. 55, no. 2, p. 39. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01853-0>.
22. Qasim O.A. Experimental investigation on autogenous shrinkage of high and ultra-high strength concrete. IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2018, vol. 454, no. 1, p. 120. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/454/1/012067>.
23. Statkauskas M., Grinys A., Vaičiukynienė D. Investigation of concrete shrinkage reducing additives. *Materials*, 2022, vol. 15, no. 9, pp. 3407. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15093407>
24. Tazawa E. Autogenous shrinkage of concrete. CRC Press, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781482272123>.
25. Vintimilla C., Etxeberria M., Li Z. Durable structural concrete produced with coarse and fine recycled aggregates using different cement types. *Sustainability*, 2023, vol. 15, no. 19, p.14272.
26. Xi Y.F. et al. Impact of high-performance expansion and shrinkage-reducing agents on the mechanical properties and shrinkage compensation of high-strength concrete. *Buildings*, 2023, vol.13, no. 3, p. 717.

#### Информация об авторах / Information about the authors

**Ланг Владимир Николаевич\***, Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, кафедра «Промышленное и гражданское строительство», аспирант. Астрахань, Россия  
**Lang Vladimir N.**, Department of industrial and civil engineering, Astrakhan state university of architecture and civil engineering, postgraduate student. Astrakhan, Russia

**Кочеткова Анна Евгеньевна**, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Институт пути, строительства и сооружений, кафедра «Строительные конструкции, здания и сооружения», студент. Москва, Россия  
**Kochetkova Anna E.**, Russian university of transport, Institute of railway track, Department of building structures, buildings and facilities, construction and structures, student. Moscow, Russia

\*Автор, ответственный за переписку / *Corresponding author*