

УДК 691.32

Повышение достоверности результатов контроля прочности бетона при сжатии

Д. А. Черепанова, А. П. Лейкин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Черепанова Д. А., Лейкин А. П. Повышение достоверности результатов контроля прочности бетона при сжатии // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 811–822. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-811-822

Аннотация

Цель: Рассмотреть факторы, оказывающие влияние на однородность прочности бетона при сжатии в конструкции. Определить, оказывают ли правила системы контроля влияние на значение неоднородности прочности. Установить степень влияния на результат места отбора образца из конструкции, связь направления разрушения/испытания образца относительно линии формования (поперек/вдоль) с искажением результата испытания разрушающимися и неразрушающимися методами контроля. **Методы:** Проведен анализ нормативной документации в области контроля качества бетона в контексте всего жизненного цикла зданий и сооружений; изготовлены образцы бетона разной формы (кубы и призмы) и размера из монолитного образца бетона — призмы с соотношением сторон 1:4; определена прочность при сжатии указанных образцов методами неразрушающего контроля по ударному импульсу и скорости прохождения ультразвука в разных направлениях, а также методом разрушающего контроля (по ГОСТ 22690—2015, ГОСТ 10180—2012, ГОСТ 17624—2021). Оценка прочности осуществлялась в соответствии с ГОСТ 18105—2018. **Результаты:** Установлено, что в рамках действующей системы контроля предусмотрено большое количество варьируемых параметров, которые ведут к разному уровню достоверности выходной информации о прочности бетона при сжатии в конструкции. Экспериментально подтверждено, что на результат оценки прочности при сжатии, полученный разными способами контроля, по-разному оказывает влияние направление линии испытания (относительно линии формования): при разрушающем контроле и контроле по ударному импульсу прочность ниже при испытании вдоль линии формования; при ультразвуковом контроле направление испытания не оказывает влияние на результат. Испытания показали, что прочность бетона в центральной части монолита ниже прочности по краям (подтверждено двумя видами контроля). Подтверждено снижение скорости ультразвука в бетоне с сохранением однородности результатов при базе прозвучивания менее 100 мм. **Практическая значимость:** Проведенные исследования являются основой для эффективного проектирования контроля прочности бетона: установленные связи метода контроля, направления испытания, формы и размера образцов для испытания и достоверности получаемой измерительной информации позволяют снизить количество отказов конструкций и повысить эффективность использования потенциала прочности бетона.

Ключевые слова: Бетон, прочность при сжатии, контроль качества, неразрушающие методы, разрушающий контроль, ударный импульс, скорость ультразвука, достоверность, неоднородность, коэффициент вариации.

Введение

Основы контроля качества бетона, заложенные в 50–60-х гг. прошлого века, на сегодняшний день не позволяют обеспечить безотказность бетонных и железобетонных конструкций и эффективно использовать потенциал материала [1]. Это вызвано синергетическим влиянием двух факторов: неоднородности прочности бетона в конструкции и невозможности с достаточной достоверностью судить о ее уровне в течение всего жизненного цикла зданий и сооружений, что, в свою очередь, не позволяет своевременно обнаружить опасные локальные выбросы прочности бетона [2–7]. Соответственно, повышение достоверности результатов контроля прочности бетона при сжатии способно решить обозначенную проблему.

Неоднородность прочности бетона при сжатии является следствием неоднородности его структуры, которая образуется из-за воздействия на бетон ряда технологических факторов при изготовлении и строительстве, условиях транспортировки, твердения и эксплуатации. В вопросе однородности бетона на сегодняшний день удалось однозначно прийти лишь к тому, что «бетон исключительно однороден в своей неоднородности» [8], однако единая закономерность распределения неоднородности бетона в конструкции на сегодняшний день не установлена. Таким образом, эффективность системы контроля зависит от своевременности обнаружения и исключения негативного влияния факторов, снижающих достоверность результатов контроля.

С целью повышения достоверности результатов контроля для обеспечения возможности своевременного реагирования на наличие «бракованного» бетона на любом из этапов жизненного цикла здания/сооружения в рамках исследования определена степень влияния на результат контроля неоднородности прочности бетона (места отбора при испытании образца, отобранного из

конструкции); установлена связь направления линии нагружения образца относительно линии формования (поперек/вдоль) с искажением результата испытания разрушающими и неразрушающими методами контроля.

Методы

В рамках теоретических исследований для выявления слабых мест в системе контроля, приводящих к несвоевременному обнаружению «брака» бетона, в связке рассмотрены все правила и методы, закрепленные в действующих нормативно-правовых документах, документах по стандартизации в части контроля прочности классического тяжелого бетона [9–17].

В рамках экспериментальных исследований бетонная призма возраста, значительно превышающего проектный, с соотношением сторон 1:4 ($100 \times 100 \times 400$ мм), изготовленная с использованием стандартной разборной формы (рис. 1, а), была распилена на образцы — кубы и призмы разного размера и соотношения сторон (рис. 1, б–г). Схема расположения образцов после распила в исходной монолитной балке представлена на рис. 2. Данные о количестве, форме и размерах всех образцов представлены в табл. 1.

Поверхность образцов после распила была зашлифована, исключены отклонения по геометрии до установленных в нормативной документации значений. Для каждого образца были определены масса, геометрические размеры, рассчитан объем, площадь нагружаемого сечения, плотность. Средняя плотность — 2422 кг/м^3 , коэффициент вариации плотности составил 3,88 %. Также на образцах было обозначено направление формования.

Определение прочности осуществлялось в соответствии с ГОСТ 10180—2012 при разрушающем контроле, по ГОСТ 17624—2021 — при ультразвуковом контроле, механическим методом неразрушающего контроля — по ГОСТ 22690—

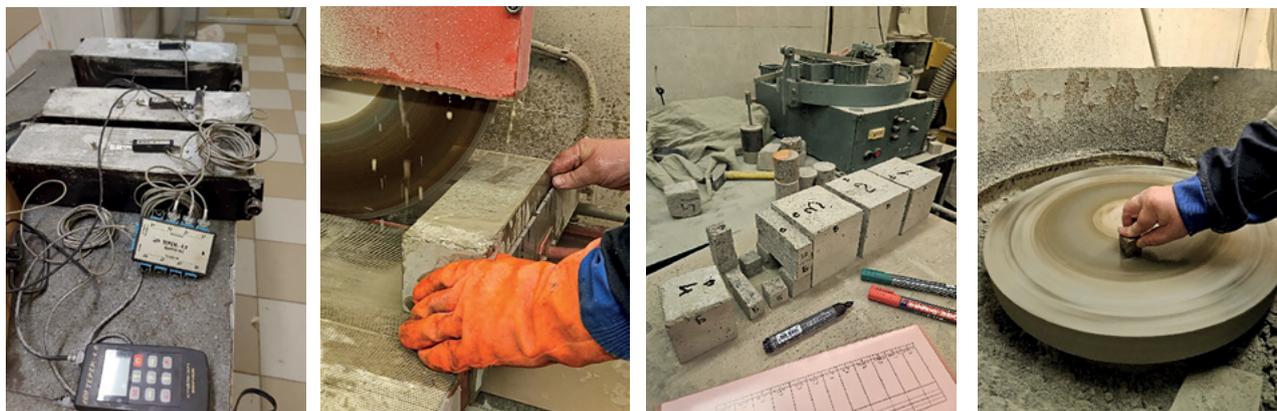


Рис. 1. Подготовка образцов для испытания:
 а — форма для изготовления образца-призмы; б — распил монолитной призмы;
 в — образцы, полученные после распила; г — шлифовка поверхности для испытания
 (автор фото: Д. А. Черепанова)

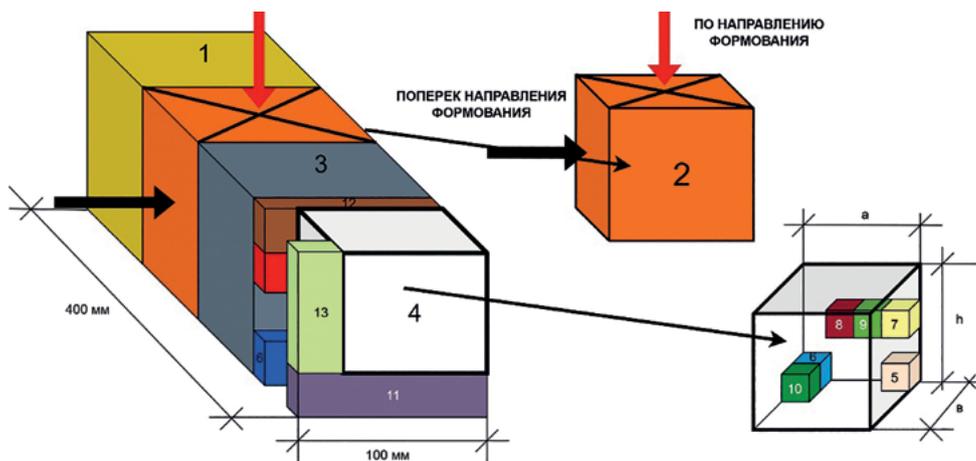


Рис. 2. Схема расположения образцов после распила в исходной монолитной балке

Таблица 1. Основные характеристики образцов для испытания

| № образца | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|----------------------|----------|-------|-------|---------|---------|-------|-----------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|
| Форма | Куб «10» | | | Куб «7» | Куб «3» | | Куб «2,5» | | | Призма «2,5» | | | |
| Размер | «1:1» | «1:1» | «1:1» | «1:1» | «1:1» | «1:1» | «1:1» | «1:1» | «1:1» | «1:1» | «1:4» | «1:4» | «1:3» |
| a, см | 9,6 | 9,9 | 9,4 | 6,6 | 3,1 | 2,9 | 2,5 | 2,5 | 3 | 2,6 | 2,1 | 2,7 | 2,5 |
| b, см | 9,7 | 10 | 10 | 7,1 | 3,2 | 3,2 | 2,5 | 2,5 | 2,7 | 2,6 | 2,9 | 2,5 | 2,4 |
| h, см | 10 | 9,9 | 10,1 | 6,4 | 3,1 | 3,6 | 2,6 | 2,6 | 2,5 | 2,6 | 9,9 | 9,9 | 6,9 |
| ρ, кг/м ³ | 2354 | 2341 | 2361 | 2301 | 2536 | 2395 | 2462 | 2585 | 2370 | 2503 | 2355 | 2544 | 2319 |

2015. Оценка прочности осуществлялась в соответствии с ГОСТ 18105—2018.

Неразрушающий контроль прочности был реализован с помощью приборов, работа которых основана на методах оценки ударного импульса и скорости прохождения ультразвука (рис. 3)

При ультразвуковом контроле каждый образец был испытан по и против направления формования способом сквозного прозвучивания. Количество измерений — 3 в каждом направлении. Испытание методом ударного импульса осуществлялось в направлении, противополож-

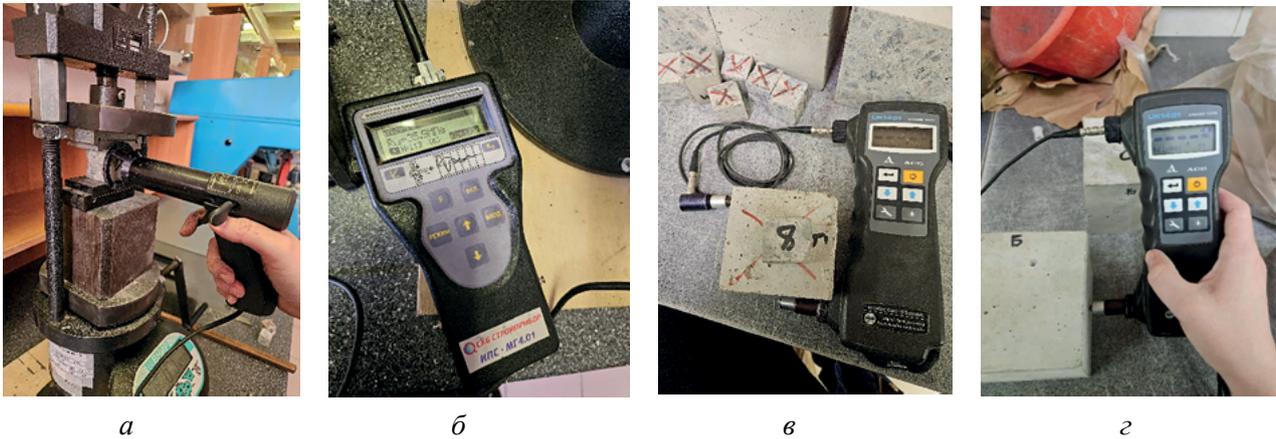


Рис. 3. Определение прочности неразрушающими методами контроля:
а, б — контроль методом ударного импульса с помощью склерометра (измерителя прочности материалов) ИПС МГ4.01; *в, г* — ультразвуковой контроль с помощью ультразвукового тестера УК1401 (автор фото: Д. А. Черепанова)

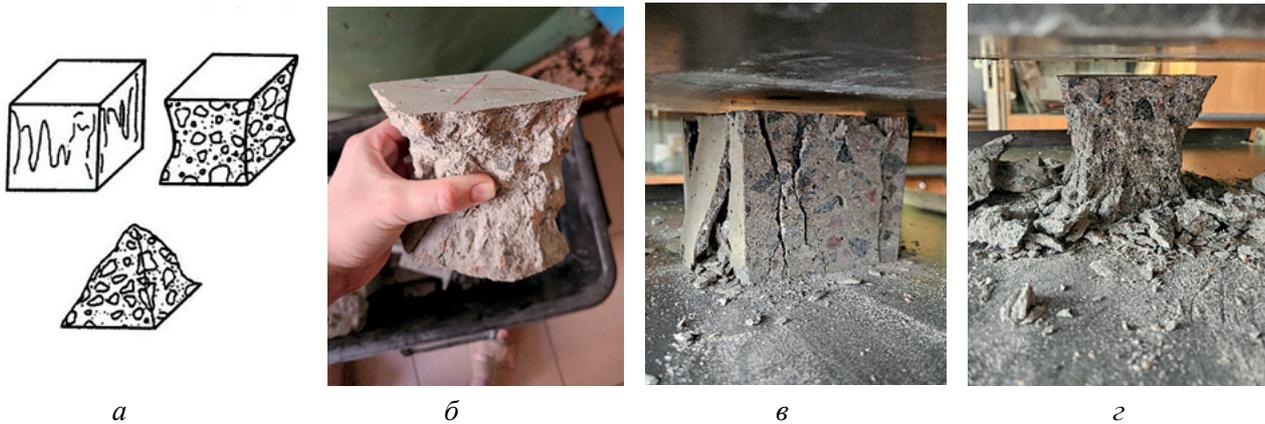


Рис. 4. Разрушение образцов:
а — удовлетворительная схема разрушения образцов-кубов при сжатии, закрепленная в нормативной документации; *б* — образец № 1 после испытания на сжатие поперек линии формования; *в, г* — образец № 2 после испытания на сжатие по линии формования (автор фото: Д. А. Черепанова)

ном направлению испытания при разрушающем контроле. Среднее определялось на основании 15 значений.

Все образцы-кубы, испытанные как вдоль линии формования, так и поперек, разрушились по удовлетворительной схеме (рис. 4).

Для перевода призмной прочности в кубиковую использовалась известная зависимость при соотношении стороны сечения призмы к высоте (a/h), равном 1:4 (1) [18]:

$$R_{\text{пр}} = 0,75 \cdot R_{\text{куб}}, \quad (1)$$

где $R_{\text{пр}}$ — прочность образца-призмы квадратного сечения;

$R_{\text{куб}}$ — прочность образца-куба соответствующего сечения.

При переводе прочности образцов-кубов с размером граней 7 и 10 см к размеру стандартного образца 15 см использовались переводные коэффициенты, закрепленные в нормативной документации [13], выдержка из которого представлена на рис. 5.

| Форма и размеры образца, мм | Масштабные коэффициенты при испытании | | | | |
|---|--|--|------------------------|---|------------------------------|
| | на сжатие всех видов бетонов, кроме ячеистого α | на растяжение при расклевывании γ | | на растяжение при изгибе тяжелого бетона δ | на осевое растяжение β |
| | | тяжелого бетона | мелкозернистого бетона | | |
| Куб (ребро) или квадратная призма (сторона поперечного сечения) | | | | | |
| 70 | 0,85 | 0,78 | 0,87 | 0,86 | 0,85 |
| 100 | 0,95 | 0,88 | 0,92 | 0,92 | 0,92 |
| 150 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 200 | 1,05 | 1,10 | 1,05 | 1,15 | 1,08 |

Рис. 5. Масштабные коэффициенты для приведения прочности испытанных образцов к прочности стандартных

Таблица 2. Прочность при сжатии по результатам разрушающего контроля

| № образца | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|-------------------------|----------|------|------|---------|---------|------|-----------|------|------|--------------|------|------|------|
| Форма | Куб «10» | | | Куб «7» | Куб «3» | | Куб «2,5» | | | Призма «2,5» | | | |
| Прочность, R , МПа | 69,8 | 43,2 | 66,5 | 65,9 | 19,2 | 50,4 | 33,0 | 58,9 | 29,1 | 71,3 | 47,0 | 51,9 | 51,3 |
| Направление разрушения* | → | ↓ | → | → | ↓ | → | ↓ | → | ↓ | → | → | → | ↓ |

*«↓» — по направлению формования; «→» — поперек направления формования.

Результаты

Основными варьируемыми параметрами при испытании бетона является метод испытания, форма, размер образцов для испытания и их количество. Арбитражным считается разрушающий контроль. Результаты разрушающего контроля прочности описанных ранее образцов представлены в табл. 2.

Обязательным для поддержания требуемого уровня обеспеченности является оценка прочности бетона с учетом фактической однородности. Для определения и учета однородности прочности бетона применяются 4 схемы: А, Б, В, Г. Представленные данные еще раз демонстрируют, что бетон «однороден в своей неоднородности»: коэффициент вариации прочности по разным группам образцов колеблется около значения 8,65 % с отклонением в 0,15 % в большую и меньшую стороны. То есть неоднородность бетона сохраняется при разном количестве, размере, форме образцов, направлении разрушения на одинаковом уровне.

Наибольший коэффициент вариации прочности получен на образцах-кубах «2,5». Это свя-

зано, в первую очередь, с масштабным фактором: на результат рассчитываемой прочности гораздо сильнее влияет точность измерения геометрических размеров для расчета площади нагружаемого сечения. В случае, если используются образцы небольшого размера, требуется повышать точность измерения геометрических размеров для получения корректных результатов.

Важным результатом является демонстрация того факта, что **прочность бетона при разрушающем контроле значительно отличается в зависимости от направления испытания относительно линии формования**: по линии или поперек. Для прочности в переводе на стандартные образцы-кубы «15» эта разница составляет по результатам проведенных испытаний 33,7 %: прочность бетона при нагружении по линии формования (именно так работает бетон в монолитных вертикальных конструкциях) ниже на 33,7 %. Аналогичный результат получен и на образцах-кубах меньшего размера («2,5»). При этом стандартные специально изготовленные образцы-кубы (например, при контроле на заводе или при контроле по образцам, твердевшим в условиях

Таблица 3. Результаты разрушающего контроля прочности при сжатии с разбивкой по группам образцов

| Образцы, направление испытания | Кубы «10», «7», → | | | Куб «10», ↓ | Кубы «2,5», → | | Призма «2,5», ¼, → | | Кубы «2,5», ↓ | |
|---|----------------------|------|------|----------------|------------------|------|-----------------------|------|------------------|------|
| | 1 | 3 | 4 | 2 | 8 | 10 | 11 | 12 | 7 | 9 |
| Прочность в переводе на стандартный образец-куб «15»/ образец-куб «2,5» (для призмы), R , МПа | 66,3 | 63,2 | 56,0 | 41,0 | 58,9 | 71,3 | 62,6 | 69,1 | 33,0 | 21,9 |
| Средняя прочность в группе, R_{cp} , МПа | 61,8 | | | 41,0 | 65,1 | | 65,9 | | 31,0 | |
| Отклонение прочности, $R \downarrow$ относительно $R \rightarrow$, % | – | | | –33,7 | – | | – | | –52,3 | |
| Коэффициент вариации прочности V_m , % | 8,5 | | | – | 13,5 | | 7,0 | | 8,7 | |
| K_T^* | 1,11 | | | 1,28/1,11 | 1,33 | | 1,08 | | 1,11 | |
| Обеспеченная с вероятностью 0,95 прочность, МПа | 59,7 | | | 33,7/37,0 | | | – | | | |
| Класс по прочности при сжатии | B55 | | | B30/B35 | | | | | | |

*Коэффициент K_T по схеме В/Г для расчета фактического класса по прочности.

Таблица 4. Результаты скорости ультразвука

| № образца | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|---|----------|------|------|---------|---------|------|-----------|------|------|--------------|------|------|------|
| Форма | Куб «10» | | | Куб «7» | Куб «3» | | Куб «2,5» | | | Призма «2,5» | | | |
| $V_{y3 \rightarrow}^*$, м/с | 2669 | 3049 | 2756 | 2892 | 1970 | 1993 | 1659 | 1437 | 1603 | 1526 | 3371 | 3486 | 2083 |
| $V_{y3 \downarrow}^{**}$, м/с | 2756 | 2979 | 2850 | 3009 | 1787 | 1782 | 1632 | 1689 | 1475 | 1699 | 2332 | 2658 | 1698 |
| $\Delta V_{y3 \downarrow} \text{ к } V_{y3 \rightarrow}$, %*** | 3 | –2 | 3 | 4 | –9 | –11 | –2 | 18 | –8 | 11 | –31 | –24 | –18 |

* $V_{y3 \rightarrow}$ — скорость ультразвука в образце при прозвучивании поперек направления линии формования;

** $V_{y3 \downarrow}$ — скорость ультразвука в образце при прозвучивании по направлению линии формования;

*** $\Delta V_{y3 \downarrow} \text{ к } V_{y3 \rightarrow}$ — отклонение скорости ультразвука по линии формования относительно скорости ультразвука поперек линии формования в процентах.

строительной площадки) при испытании разворачивают на боковую грань, то есть испытание происходит поперек направления линии формования, а именно по направлению, при котором прочность бетона выше. В случае, если не принимать в расчет направление испытания и полученные результаты по каждому направлению рассматривать отдельно, то получится, что оценить прочность одного и того же бетона из достаточно небольшого (в сравнении с монолитными конструкциями зданий и сооружений) монолитного образца можно и как класс B55, и как B30. Эти результаты одновременно демонстрируют как низкую эффективность использования потенциала бетона, так и то, почему «хороший» (соответ-

ствующий требованиям по результатам контроля) бетон приводит к отказам в конструкциях.

Образцы 8 и 9 (кубики «2,5») изначально находились в центральной части балки, образцы 7 и 10 (кубики «2,5») — по краям (рис. 2). Они были испытаны в разных направлениях (табл. 2, 3). В обоих случаях прочность образцов центральной части оказалась ниже прочности образцов, находившихся с края. Однако в связи с установленным фактом снижения прочности при испытании по направлению формования на всех других образцах, испытанных по линии формования, судить о конкретном значении доли снижения прочности по этим образцам не представляется возможным без проведения дополнительных

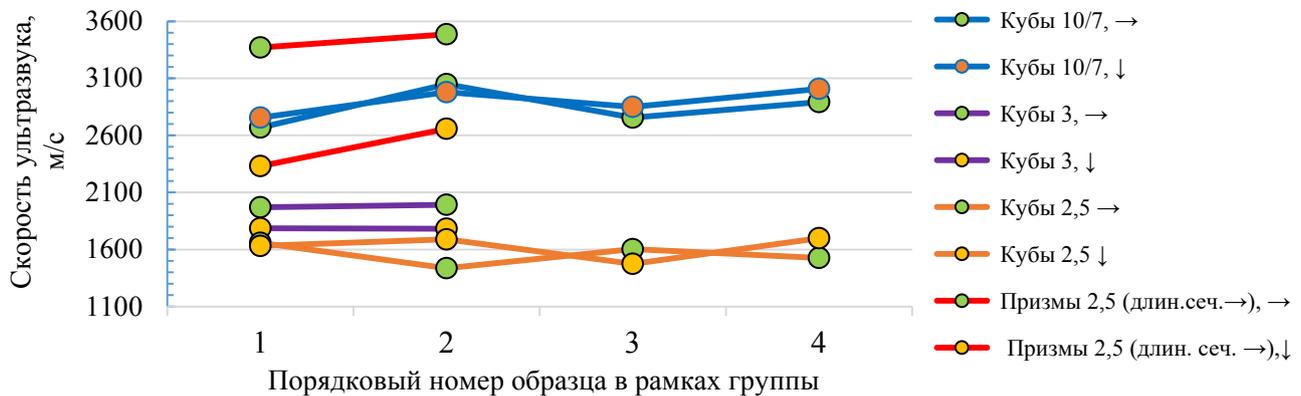


Рис. 6. Скорость ультразвука в образцах по группам в разном направлении

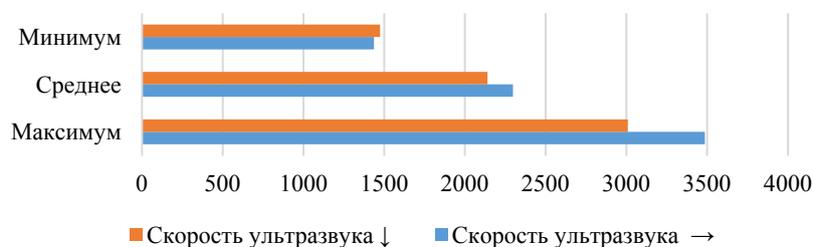


Рис. 7. Данные о результатах максимальной, средней и минимальной скорости по всем образцам в разных направлениях испытания

испытаний (сравнивались одинаковые образцы 7 и 9, испытанные в одном направлении). Что касается образцов 8 и 10, испытанных поперек направления линии формования, то прочность образца центральной части ниже на 18 % (что значительно превышает определенный коэффициент вариации).

Неразрушающие методы контроля имеют более низкую точность, однако позволяют, как предполагается, обеспечить сплошной контроль всех конструкций [19]. Результаты ультразвукового контроля представлены в табл. 4.

Согласно правилам, определенным в нормативной документации, база для сквозного прозвучивания должна составлять не менее 100 мм (допустимо не менее 70 мм для мелкозернистых) с учетом существующих ограничений самого прибора. Поэтому «эталонными» приняты данные, полученные по результатам испытания кубов «10» и «7». Коэффициент вариации зна-

чений скорости ультразвука по этим образцам составляет 4 %.

В нормативной документации установлено, что «измерения следует проводить на поверхности, занимающей при изготовлении положение относительно формы и направления формования, аналогичное положению контролируемой поверхности изделия». При этом полученные на «эталонных образцах» (кубах «10» и «7») данные демонстрируют, что скорость ультразвука не имеет закономерности по ее уменьшению при прозвучивании вдоль линии формования относительно скорости, полученной путем измерения поперек линии формования в отличие от разрушающего контроля. Она колеблется как в меньшую, так и в большую сторону (табл. 4, рис. 6)

Данные о параметрах скорости ультразвука во всех остальных образцах имеют аналогичную динамику (рис. 7).

Таблица 5. Результаты неразрушающего контроля прочности методом ударного импульса со сравнением результатов разрушающего контроля

| Номер образца | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--|-----------|------|------|------|
| Форма, размер | Куб «2,5» | | | |
| Направление испытания* | → | ↓ | → | ↓ |
| Средняя прочность по шкале прибора, МПа | 70,4 | 39,6 | 59,9 | 51,7 |
| Коэффициент вариации прочности, % | 9,1 | 11,3 | 11,4 | 13,1 |
| Прочность при разрушающем контроле в перпендикулярном направлении, R , МПа | 33,0 | 58,9 | 21,9 | 71,3 |

*«↓» — по направлению формования; «→» — поперек направления формования.

С уменьшением размера образцов уменьшается и скорость ультразвука. Данная зависимость известна. Это связано с рядом факторов: на результат начинают оказывать влияние поверхностные эффекты и неоднородность бетона. В небольших образцах (таких как кубы «3» и «2,5») доля поверхности по отношению к объему значительно выше, что приводит к искажению результатов измерений. Также такие образцы часто имеют больше дефектов на поверхности, таких как микротрещины или поры, которые в том числе являются результатом механической обработки и могут замедлять распространение ультразвука, а неоднородность бетона в больших образцах сглаживается, в то время как в маленьких образцах оказывает более существенное влияние на скорость ультразвука.

Рассмотрение результатов по группам разных размеров это подтверждает (образцов 1–4; 5–6; 7–10): каждая последующая группа имеет меньшую скорость ультразвука. Уменьшение скорости ультразвука из-за уменьшения базы прозвучивания наглядно видно на примере образцов-призм 11 и 12, которые были выпилены в одном направлении. При прозвучивании вдоль меньшего размера скорость ниже на 27 % (рис. 6).

Однако нельзя не отметить, что образец-призма 13, который имеет другое направление выпила по сравнению с образцами 11 и 12, имеет аналогичную динамику (хоть и в меньшей степени) по снижению скорости при прозвучивании вдоль линии формования, несмотря на то что данные по

меньшему значению скорости ультразвука получены на базе 690 мм, а большие — на базе 240 мм. С учетом изложенного целесообразно проведение дополнительных испытаний на образцах-призмах для установления конкретных закономерностей или их отсутствия в связи с определением влияния направления формования бетона и направления испытания при ультразвуковом контроле.

Кроме того, анализ результатов контроля образцов 7–10 (кубиков «2,5» и 11–12 (призм «2,5»)) показывает, что, несмотря на одинаковую базу прозвучивания, скорость ультразвука в призмах на 35 % выше скорости в образцах-кубах (табл. 4). Требуется дополнительные испытания для установления влияния формы образца на скорость ультразвука, так как если полученные данные подтверждаются на большей выборке, то на данный момент это будет еще одним не учитываемым в рамках системы контроля фактором, влияющим на достоверность результата контроля прочности бетона.

Нельзя не отметить, что на результат ультразвукового контроля оказывает значительное влияние компетентность лица, его осуществляющего, так как результат напрямую зависит от качества акустического контакта прибора и поверхности испытываемого образца, которое обеспечивается лицом, осуществляющим испытание.

Результаты контроля методом ударного импульса сведены в табл. 5.

Представленные данные демонстрируют, что на результат неразрушающего контроля прочности методом ударного импульса, как и результат

разрушающего контроля, влияет направление испытания. Средняя прочность образцов, испытанных по направлению формования, ниже относительно образцов, испытанных в перпендикулярном направлении, на 30 %. О корректности представленных данных (несмотря на небольшой объем выборки) косвенно свидетельствует рассмотрение данных в контексте результатов разрушающего контроля прочности этих же образцов (табл. 5, последняя строка).

Несмотря на то, что испытания проводились в разных направлениях, динамика соотношения прочности относительно друг друга в парах, испытанных в одном направлении, одинакова и при разрушающем, и при неразрушающем контроле: $R_7 > R_9$; $R_{10} > R_8$.

Отдельно стоит отметить, что в рамках всех методов контроля коэффициент вариации прочности или ее косвенных признаков (скорости ультразвука, ударного импульса) не превышает 13% в группах образцов с одинаковыми вводными данными испытания. Однако возможность использования недостоверных данных для построения градуировочной кривой является значительной с учетом представленных выше результатов испытаний и анализа.

Выводы

Значительную долю при оценке неоднородности прочности бетона при сжатии дают факторы контроля (различие форм, размеров образцов, направления испытания, места отбора проб), то есть исключение их влияния перспективно в целях повышения использования потенциала бетона и снижения вероятности отказов конструкций из него.

На результат, полученный разными способами контроля, по-разному оказывает влияние направление линии формования относительно линии испытания. Проектировать контроль требуется таким образом, чтобы образцы для кон-

троля отражали направление работы бетона в монолитной конструкции относительно линии формования. В случае использования стандартных образцов-кубов при определении прочности и установлении градуировочных зависимостей по ним для неразрушающих методов контроля требуется испытывать образцы по линии формования для получения достоверных результатов, отражающих в большей степени прочность бетона в конструкции. При этом в случае, если направление неразрушающего контроля будет иным, то градуировочную зависимость следует строить с учетом поправочного коэффициента, отражающего отношение прочности конкретного бетона по направлению формования к прочности в противоположном направлении.

Список источников

1. Статистика по авариям/обрушениям // Нострой. — URL: https://nostroy.ru/news_files/2020/01/15/Statystika.pdf (дата обращения: 25.07.2025).
2. Карапетов Э. С. Прогнозирование срока службы железобетонных мостов с учетом внешних факторов и особенностей бетона защитного слоя / Э. С. Карапетов, Д. А. Шестовицкий // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2014. — № 2(39). — С. 17–29.
3. Казанская Л. Ф. Взаимосвязь факторов, определяющих долговечность бетонов / Л. Ф. Казанская, В. А. Майер, Э. С. Сибгатуллин // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2024. — Т. 21. — № 4. — С. 931–943.
4. Беленцов Ю. А. Повышение надежности возводимых конструкций за счет повышения точности метода оценки класса бетона в стандартных образцах / Ю. А. Беленцов, В. М. Комов // Вестник Петровской Академии наук и искусств. — 2019. — № 1-2(54). — С. 51–55.
5. Беленцов Ю. А. Оценка методов контроля прочности бетона по критерию надежности возводимых конструкций / Ю. А. Беленцов, А. М. Харитонов, Ю. М. Тихонов // Вестник гражданских инженеров. — 2017. — № 6(65). — С. 147–151.

6. Комов В. М. Статистический контроль качества бетонов для предотвращения «локальных выбросов» прочности в объеме материала / В. М. Комов, Ю. А. Беленцов, Д. А. Черепанова // Актуальные проблемы естественных и технических наук: сборник статей межвузовской научно-практической конференции. — СПб., 2023. — С. 234–244.
7. Беленцов Ю. А. Влияние методики контроля качества бетона по физико-механическим показателям на надежность строительных конструкций / Ю. А. Беленцов, Д. А. Черепанова // Бетон и железобетон. — 2023. — № 619(5/6). — С. 25–31.
8. Скоробогатов С. М. Руководство по расчету конструкций на основе теории катастроф / С. М. Скоробогатов. — Свердловск: Уральский электромеханический институт инженеров железнодорожного транспорта им. Я. М. Свердлова, 1991. — 161 с.
9. СП 48.13330.2019 «СНиП 12-01—2004. Организация строительства»: утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 24 декабря 2019 года № 861/пр.
10. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения (Актуализированная редакция СНиП 52-01—2003) / Минстрой России. — М., 2018. — 156 с.
11. СП 70.13330.2012 (СНиП 3.03.01—87) Несущие и ограждающие конструкции / Госстрой ФАУ ФЦС. — Введ. 01.07.2013. — М., 2012. — 135 с.
12. ГОСТ 27751—2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения.
13. ГОСТ 10180—2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.
14. ГОСТ 17624—2021. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности.
15. ГОСТ 22690—2015. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля.
16. ГОСТ 18105—2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности.
17. ГОСТ 31937—2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.
18. Байков В. Н. Железобетонные конструкции. Общий курс: учебник для вузов / В. Н. Байков. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Стройиздат, 1991. — 67 с.
19. Петрова Т. М. Особенности оценки качества железобетонных конструкций транспортного строительства неразрушающими методами контроля / Т. М. Петрова, А. П. Лейкин, А. В. Полетаев, Ю. А. Сорвачева и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2015. — № 1(42). — С. 46–51.

Дата поступления: 30.07.2025

Решение о публикации: 31.08.2025

Контактная информация:

ЧЕРЕПАНОВА Дария Алексеевна — ст. преподаватель, начальник отдела качества; cherepanova@pgups.ru

ЛЕЙКИН Алексей Павлович — канд. техн. наук, доц.; leikin@pgups.ru

Improving the Reliability of Test Results for Concrete Compressive Strength

D. A. Cherepanova, A. P. Leykin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Cherepanova D. A., Leykin A. P. Improving the Reliability of Test Results for Concrete Compressive Strength // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 811–822. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-811-822

Summary

Purpose: To consider the factors influencing the homogeneity of concrete's compressive strength in a structure. To determine whether the rules of the control system influence the value of strength heterogeneity. To establish the extent to which sample location within the structure influences the result, and the relationship between sample destruction/testing direction (across/along) relative to the moulding line and distortion of the test result by destructive and non-destructive methods. **Methods:** An analysis of regulatory documentation in the field of concrete quality control was conducted in the context of the entire life cycle of buildings and structures. Samples of concrete in different shapes and sizes (cubes and prisms) were made from a prism-shaped monolithic concrete sample with an aspect ratio of 1:4. The compressive strength of these samples was determined using non-destructive testing methods for impact pulse and ultrasound velocity in different directions, as well as by destructive testing (in accordance with the Russian standards GOST 22690-2015, GOST 10180-2012 and GOST 17624-2021). The strength of the material was assessed in accordance with the Russian standard GOST 18105-2018. **Results:** It was determined that the existing control system accommodates a multitude of variable factors, thereby resulting in divergent levels of reliability concerning the output information on the compressive strength of concrete. It has been experimentally confirmed that the compressive strength assessment results obtained by different testing methods are differently affected by the test line direction (relative to the line of molding). With destructive testing and impact pulse testing, the strength is lower when testing along the line of molding; with ultrasonic testing, the test direction does not affect the result. The findings of the tests indicated that the concrete strength in the central part of the monolith is lower than the strength at the edges (a conclusion that was corroborated by two types of testing). A decrease in the ultrasound velocity in concrete while maintaining the homogeneity of the results with a sounding base of less than 100 mm has been confirmed. **Practical significance:** The findings of the conducted studies will provide a solid foundation for the effective design of concrete strength testing. The established relationships between the testing method, test direction, shape and size of test specimens, and the reliability of the obtained measurement data will serve to reduce the number of structural failures and increase the efficiency of utilising the concrete strength potential.

Keywords: Concrete, compressive strength, quality control, non-destructive methods, destructive testing, impact pulse, ultrasound velocity, reliability, heterogeneity, variation coefficient.

References

1. Statistika po avariyam/obrusheniyam [Statistics on accidents/collapses]. *Nostroy*. Available at: https://nostroy.ru/news_files/2020/01/15/Statystika.pdf (accessed: July 25, 2025). (In Russian)
2. Karapetov E. S., Shestovitskiy D. A. Prognozirovanie sroka sluzhby zhelezobetonnykh mostov s uchetom vneshnikh faktorov i osobennostey betona zashchitnogo sloya [Prediction of the service life of reinforced concrete bridges taking into account external factors and characteristics of the protective layer concrete]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2014, Iss. 2(39), pp. 17–29. (In Russian)
3. Kazanskaya L. F., Mayer V. A., Sibgatullin E. S. Vzaimosvyaz' faktorov, opredelyayushchikh dolgovечnost' betonov [Interrelation of factors determining the durability of concretes]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2024, vol. 21, Iss. 4, pp. 931–943. (In Russian)
4. Belentsov Yu. A., Komov V. M. Povyshenie nadezhnosti vozvodimyykh konstruksiy za schet povysheniya tochnosti metoda otsenki klassa betona v standartnykh obraztsakh [Improving the reliability of erected structures by increasing the accuracy of the method for assessing the concrete class in standard samples]. *Vestnik Petrovskoy Akademii nauk i iskusstv* [Bulletin of the Petrovsky Academy of Sciences and Arts]. 2019, Iss. 1-2(54), pp. 51–55. (In Russian)
5. Belentsov Yu. A., Kharitonov A. M., Tikhonov Yu. M. Otsenka metodov kontrolya prochnosti betona po kriteriyu nadezhnosti vozvodimyykh konstruksiy [Evaluation of methods for controlling the strength of concrete based on the criterion of reliability of erected structures]. *Vestnik*

grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]. 2017, Iss. 6(65), pp. 147–151. (In Russian)

6. Komov V. M., Belentsov Yu. A., Cherepanova D. A. Statisticheskiy kontrol' kachestva betonov dlya predotvrashcheniya "lokal'nykh vybrosov" prochnosti v ob"eme materiala [Statistical quality control of concrete to prevent "local spikes" in strength in the bulk of the material]. *Aktual'nye problemy estestvennykh i tekhnicheskikh nauk: sbornik statey mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Current problems of natural and technical sciences: collection of articles of the interuniversity scientific-practical conference]. St. Petersburg, 2023, pp. 234–244. (In Russian)

7. Belentsov Yu. A., Cherepanova D. A. Vliyanie metodiki kontrolya kachestva betona po fiziko-mekhanicheskim pokazatelyam na nadezhnost' stroitel'nykh konstruksiy [The influence of the methodology for controlling the quality of concrete based on physical and mechanical indicators on the reliability of building structures]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2023, Iss. 619(5/6), pp. 25–31. (In Russian)

8. Skorobogatov S. M. *Rukovodstvo po raschetu konstruksiy na osnove teorii katastrof* [Guide to calculating structures based on catastrophe theory]. Sverdlovsk: Ural'skiy elektromekhanicheskiy institut inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta im. Ya. M. Sverdlova Publ., 1991, 161 p. (In Russian)

9. SP 48.13330.2019 "SNiP 12-01—2004. Organizatsiya stroitel'stva": utverzhen prikazom Ministerstva stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva RF ot 24 dekabrya 2019 goda № 861/pr [SP 48.13330.2019 "SNiP 12-01—2004. Organization of Construction": approved by the order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated December 24, 2019 № 861/pr]. (In Russian)

10. SP 63.13330.2018. *Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii. Osnovnye polozheniya (Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 52-01—2003)*. Minstroy Rossii [SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions (Updated version of SNiP 52-01-2003). Ministry of Construction of Russia]. M., 2018, 156 p. (In Russian)

11. SP 70.13330.2012 (SNiP 3.03.01—87) *Nesushchie i ograddayushchie konstruksii. Gosstroy FAU FTsS. Vved. 01.07.2013* [SP 70.13330.2012 (SNiP 3.03.01-87) Load-bearing and enclosing structures. Gosstroy FAU FTsS. Introduced 01.07.2013]. Moscow, 2012, 135 p. (In Russian)

12. GOST 27751—2014. *Nadezhnost' stroitel'nykh konstruksiy i osnovaniy. Osnovnye polozheniya* [GOST 27751—2014. Reliability of building structures and foundations. Basic provisions]. (In Russian)

13. GOST 10180—2012. *Betony. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nym obraztsam* [Concretes. Methods for determining strength using control samples]. (In Russian)

14. GOST 17624—2021. *Betony. Ul'trazvukovoy metod opredeleniya prochnosti* [GOST 17624—2021. Concretes. Ultrasonic method for determining strength]. (In Russian)

15. GOST 22690—2015. *Betony. Opredelenie prochnosti mekhanicheskimi metodami nerazrushayushchego kontrolya* [GOST 22690—2015. Concretes. Determination of strength by mechanical methods of non-destructive testing]. (In Russian)

16. GOST 18105—2018. *Betony. Pravila kontrolya i otsenki prochnosti* [GOST 18105—2018. Concretes. Rules for monitoring and assessing strength]. (In Russian)

17. GOST 31937—2024. *Zdaniya i sooruzheniya. Pravila obsledovaniya i monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya* [GOST 31937—2024. Buildings and structures. Rules for inspection and monitoring of technical condition]. (In Russian)

18. Baykov V. N. *Zhelezobetonnye konstruksii. Obshchiy kurs: uchebnik dlya vuzov, 5-e izd., pererab. i dop.* [Reinforced concrete structures. General course: textbook for universities, 5th ed., revised and enlarged]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1991, 67 p. (In Russian)

19. Petrova T. M., Leykin A. P., Poletaev A. V., Sorvacheva Yu. A. et al. Osobennosti otsenki kachestva zhelezobetonnykh konstruksiy transportnogo stroitel'stva nerazrushayushchimi metodami kontrolya [Features of quality assessment of reinforced concrete structures of transport construction by non-destructive testing methods]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2015, Iss. 1(42), pp. 46–51. (In Russian)

Received: July 30, 2025

Accepted: August 31, 2025

Author's information:

Dariya A. CHEREPANOVA — Senior lecturer, Head of Quality Department; cherepanova@pgups.ru

Aleksey P. LEYKIN — PhD in Engineering, Associate Professor; leikin@pgups.ru