

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS



УДК 666.9.017

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-95-103>

Корреляции между прочностью и электрическим сопротивлением бетона.

Часть 1. Краткий обзор

Д.М. Степин , Т.М. Хафизов , А.Х. Байбуurin  , А.Д. Овчинников ,

Э.А. Каминская , Н.О. Коломиец 

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация

 abayburin@mail.ru



EDN: IYYXFY

Аннотация

Введение. Существующие методы неразрушающего контроля прочности бетона предполагают доступ к поверхности бетона, что не всегда возможно в технологии бетонных работ. Например, при непрерывном формировании конструкции в скользящей опалубке требуется определять прочность бетона в процессе формирования без непосредственного доступа к уложенным слоям твердеющей бетонной смеси. Известный метод определения прочности бетона посредством измерения его электросопротивления редко используется, не стандартизирован и часто приводит к противоречивым результатам. Целью исследования первой части статьи является изучение обнаруженных ранее корреляций между прочностью бетона и его электросопротивлением, выявление преимуществ и недостатков методов измерений, чтобы выяснить целесообразность такого подхода для способа опускающегося бетона.

Материалы и методы. Применен классический метод обзора литературы с группированием определенных признаков в отдельные сравнительные таблицы с последующим обобщением, что облегчает понимание разработанности темы статьи. Из рассмотренных источников были выбраны только самые важные и информативные, в основном, иностранные.

Результаты исследования. Анализ данных обзора позволил установить: способы измерения электросопротивления (поверхностный, объёмный, внутренний, прямой), типы исследованных бетонов, размеры выборок, сроки испытаний, диапазоны прочности бетона, типы зависимостей и коэффициенты корреляции. Среди факторов, влияющих на результат, измерений отмечены: водоцементное отношение, тип вяжущего и заполнителей, вид добавок, температура бетона, его пористость и др. Для пояснения сути методов определения электросопротивления бетона приведена краткая информация.

Обсуждение и заключение. Основной сложностью в косвенных методах определения прочности является построение градуировочных зависимостей, на результаты могут оказывать влияние различные факторы. Трудности связаны также с креплением омических контактов на опалубку или бетон. Все эти особенности будут учтены в дальнейших исследованиях для определения связи между прочностью и электросопротивлением бетона и повышения точности измерений. Преимущества рассмотренного способа контроля прочности, такие как сохранение целостности конструкции, оперативность и малая трудоёмкость измерений, обуславливают его применение в автоматизированных бетонных технологиях.

Ключевые слова: неразрушающие методы испытаний, прочность бетона, электрическое сопротивление бетона, технология бетона, корреляция

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Степин Д.Н., Хафизов Т.М., Байбуurin А.Х., Овчинников А.Д., Каминская Э.А., Коломиец Н.О. Корреляции между прочностью и электрическим сопротивлением бетона. Часть 1. Краткий обзор. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(4):95–103. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-95-103>

Correlations between the Strength and Electrical Resistance of Concrete. Part 1. A Brief Overview

Dmitry M. Stepin , Tagir M. Khafizov , Albert Kh. Baiburin , Andrey D. Ovchinnikov ,
Evelina A. Kaminskaya , Nikita O. Kolomiets 

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

 abayburin@mail.ru

Abstract

Introduction. The existing methods of non-destructive testing of concrete strength entail access to the concrete surface, which is not always possible to accomplish in concrete work technology. E.g., while continuously forming a structure in a sliding formwork, it is required that the strength of the concrete is identified during the molding process with no direct access to the layers of the hardening concrete mix being laid. The well-known method of identifying concrete strength by means of measuring its electrical resistance is neither commonly used nor standardized, and tends to yield contradictory results. The aim of the study of the first part of the article is to investigate the previously identified correlations between the concrete strength and its electrical resistance, to identify the advantages and disadvantages of measurement methods in order to find how feasible such an approach is for identifying a method for sinking concrete.

Materials and Methods. The classical method of literature review is employed with grouping of certain features into separate comparative tables followed by generalization assisting understanding an extent to which the research topic has been studied. Those were only the most important and informative, largely foreign, sources that were selected from the reviewed sources.

Research Results. The analysis of the review data enabled us to identify the methods of measuring electrical resistance (surface, volumetric, internal, direct ones), types of the investigated concrete, sample sizes, test dates, concrete strength ranges, types of dependencies and correlation coefficients. Among the factors affecting the measurement result were the following: water-cement ratio, type of binder and aggregates, type of additives, temperature of concrete, its porosity, etc. To explain the essence of the methods for identifying concrete electrical resistance, a brief overview is provided.

Discussion and Conclusion. The major difficulty of the indirect methods of identifying the strength lies in designing calibration dependencies with the results affected by a wide range of factors. There are also some difficulties with fastening of ohmic contacts to the formwork or concrete. All of these will be accounted for in follow-up studies to identify the relationship between the concrete strength and electrical resistance and to improve the measurement accuracy. The advantages of the method of strength control, such as maintaining the integrity of the structure, efficiency and low measurement complexity enable it to be employed in automated concrete technologies.

Keywords: non-destructive testing methods, concrete strength, concrete electrical resistance, concrete technology, correlation

Acknowledgements. The authors appreciate the reviewers, whose critical assessment of the submitted materials and suggestions helped to significantly improve the quality of the project.

For citation. Stepin DM, Khafizov TM, Baiburin AKh, Ovchinnikov AD, Kaminskaya EA, Kolomiets NO. Correlations between the Strength and Electrical Resistance of Concrete. Part 1. A Brief Overview. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(4):95–103. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-95-103>

Введение. В запатентованной технологии опускающегося бетона, разработанной в Южно-Уральском государственном университете [1] и в других автоматизированных бетонных технологиях, возникает задача контроля прочности бетона непосредственно в форме (опалубке), которая не дает доступа к поверхности бетона для традиционных методов неразрушающего контроля. В качестве гипотезы была принята возможность оценки прочности бетона по его электросопротивлению, при этом датчики контроля легко размещаются на опалубке и не требуют остановки производства и доступа к конструкции.

Испытания прочности бетона должны выполняться по требованиям ГОСТ 28570 «Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкций», ГОСТ 22690 «Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля», ГОСТ 17624 «Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности», ГОСТ 18105 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности», ГОСТ 10180 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Существуют три группы методов контроля прочности бетона: разрушающие, неразрушающие прямые и неразрушающие косвенные. Первая группа методов позволяет получать наиболее достоверные данные о прочности бетона, так как испытанию подвергаются глубинные слои конструкции, однако у них высокая трудоёмкость при испытаниях и требуется восстановление локальных повреждений в конструкциях. В то же время неразрушающие косвенные сохраняют целостность конструкции, являются

относительно недорогими, но требуют построения градуировочных зависимостей для каждого вида и состава бетона. При этом на точность измерений существенное влияние оказывают различные факторы, такие как наличие дефектов и арматуры в зоне измерения, состояние поверхности бетона, температура, влажность и т.д. [2].

Материалы и методы. Неразрушающий контроль является неотъемлемой частью технологии производства и применения товарного бетона и сборного железобетона. Современные стандарты устанавливают обязательное использование неразрушающих методов для определения прочности бетона по предварительно установленным градуировочным зависимостям [3]. Трудоемкость неразрушающего контроля состоит непосредственно из измерений прибором того или иного параметра (отскок бойка, величина ударного импульса, скорость ультразвука, диаметр отпечатка и пр.) после выполнения надлежащего количества измерений.

Однако в указанных выше стандартах не нормируется метод контроля прочности по электросопротивлению. По изученной на эту тему литературе [3–13] в большинстве случаев электрическое сопротивление тесно связано с прочностью бетона, но требует правильной калибровки и учёта параметров смеси, а для некоторых конкретных типов бетона корреляция может отсутствовать или быть отрицательной.

При обзоре литературы анализировались следующие аспекты исследований: тип бетона, размер выборки, метод измерения электросопротивления, диапазон прочности бетона, вид и коэффициент корреляции, тип влияющего фактора и результат влияния.

Результаты исследований. Измерения электрического сопротивления по-разному соотносятся с прочностью бетона на сжатие. В исследованиях [4] установлена логарифмическая зависимость, а в это же время авторы [8] с помощью зонда Веннера подтверждают сильную нелинейную логарифмическую зависимость ($R^2 > 0,99$). В работе [10] сделан вывод, что методы внутреннего электросопротивления надёжно прогнозируют прочность смесей с различными свойствами вяжущего и заполнителя. В этом исследовании также приводятся данные о сильной положительной корреляции (значения R^2 от 0,823 до 0,999). Напротив, авторы [12] не обнаружили значимой корреляции в электропроводящих бетонах, а в статье [7] отмечается отрицательная корреляция при замене крупного заполнителя стальным шлаком (что, по нашему мнению, логично).

Исследования также показывают, что параметры бетонной смеси, такие как соотношение воды и цемента или воды и вяжущего, тип цемента и использование добавок (цеолит или пуццолан), влияют как на удельное электрическое сопротивление, так и на прочность [9]. Различные способы измерения сопротивления также влияют на силу корреляции [10]. Эти результаты показывают, что при правильной калибровке и учёте влияющих факторов измерения удельного электрического сопротивления могут служить практичным неразрушающим методом оценки прочности бетона в строительных материалах [8]. Основные характеристики исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные характеристики включенных исследований

Исследователи, источник	Тип бетона	Размер выборки	Продолжительность исследований
Araújo and Meira, 2022 [4]	Шесть различных смесей	Упоминаний не найдено	Упоминаний не найдено
Deda, 2020 [10]	24 смеси с разным содержанием заполнителей, соотношением воды и вяжущего, добавок	24 смеси	До 28 дней
Dehghanpour and Yilmaz, 2019 [12]	Электропроводящие бетоны с углеродным волокном и наноуглеродной сажой	8 смесей и контрольная серия	28 дней
Hnin et al., 2016 [13]	Различное соотношение воды и вяжущего, содержание золы и цементного теста	Упоминаний не найдено	Упоминаний не найдено
Medeiros-Junior et al., 2014 [9]	12 смесей с четырьмя типами бразильского цемента	12 смесей	То же
Medeiros-Junior et al., 2019 [6]	Смеси с двумя типами цемента и различным содержанием пуццолана	Упоминаний не найдено	То же
Nzar et al., 2022 [7]	Бетон нормальной прочности с отходами стального шлака в качестве крупного заполнителя	338 точек данных	1–180 дней
Scasserra et al., 2023 [8]	Сборный железобетон	Упоминаний не найдено	До 28 дней
Silva et al., 2016 [5]	Упоминаний не найдено	То же	До 28 дней
Yurt et al., 2023 [11]	Бетонные композиты, активируемые щелочью	4 смеси	28 дней
Штакельберг и др., 2010 [3]	Цементно-бетонные композиты	8 смесей	Упоминаний не найдено

Анализ включенных исследований показывает следующее.

Типы бетона: в 6-ти исследованиях использовались несколько смесей с разным составом; в 4-х исследованиях использовались специализированные бетоны (например, электропроводящие, сборные, щелочестойкие); в одном исследовании мы не нашли информации о типе бетона.

Размер выборки: размер выборки упоминается в 6-ти исследованиях и не указывается в 5-ти исследованиях. Сообщаемый размер выборки варьировался от 4 до 24 смесей, а в одном исследовании указаны 338 точек данных.

Продолжительность исследования: имеются упоминания о продолжительности исследования в 6-ти исследованиях; нет упоминаний в 5-х исследованиях. Из них 3 исследования длились до 28 дней, два исследования длились ровно 28 дней, а одно исследование длилось от 1 до 180 дней.

Проанализированные исследования имели своей целью определение вида корреляции между электросопротивлением и прочностью бетона, результаты исследований сведены в таблице 2.

Таблица 2

Корреляции между электросопротивлением и прочностью

Исследователи, источник	Метод изучения электросопротивления	Диапазон прочности	Коэффициент корреляции	Результаты
Araújo and Meira, 2022 [4]	Поверхностное электрическое сопротивление	Упоминаний не найдено	Упоминаний не найдено	Логарифмическое соотношение
Deda, 2020 [10]	Объемный, поверхностный и внутренний	То же	То же	Электросопротивление надёжно для прогнозирования прочности
Dehghanpour and Yilmaz, 2019 [12]	Двухзондовый датчик, метод Веннера и ASTM C1760-12	То же	Не имеет значения	Никаких существенных соотношений
Hnin et al., 2016 [13]	Четыре зонда Веннера	То же	Упоминаний не найдено	Хорошая корреляция
Medeiros-Junior et al., 2014 [9]	Поверхностное электрическое сопротивление	То же	$R^2 = 0,823-0,999$	Сильная положительная корреляция
Medeiros-Junior et al., 2019 [6]	Упоминаний не найдено	То же	Упоминаний не найдено	Обратная пропорциональность соотношению воды и цемента (w/c)
Nzar et al., 2022 [7]	То же	10–55 МПа	То же	Отрицательная корреляция со стальным шлаком
Scasserra et al., 2023 [8]	Метод Веннера (четырёхзондовый)	Упоминаний не найдено	$R^2 > 0,99$	Сильная нелинейная логарифмическая корреляция
Silva et al., 2016 [5]	Упоминаний не найдено	То же	Упоминаний не найдено	Тесная взаимосвязь
Yurt et al., 2023 [11]	Прямое измерение (мегаомметр)	То же	То же	Сильная связь, снижение прочности с увеличением доли цеолита в составе
Штакельберг и др., 2010 [3]	Упоминаний не найдено	2–72 МПа (по графикам)	То же	Линейная или близкая к линейной корреляция

Кратко поясним суть основных методов. Двухзондовый метод (датчик) применяют для измерения удельного сопротивления образцов, имеющих правильную геометрическую форму и постоянное поперечное сечение. При этом на торцевых гранях образца, например, в виде прямоугольной пластины, изготавливают омические контакты, то есть контакты между металлом и полупроводником или двумя разнородными полупроводниками, характеризующиеся линейной и симметричной вольт-амперной характеристикой. Через эти контакты вдоль образца пропускают электрический ток. На одной из поверхностей образца вдоль линий тока устанавливают два контакта в виде металлических иголок-зондов, имеющих малую площадь соприкосновения с поверхностью и позволяющих измерить разность потенциалов. Если образец однороден, то его удельное сопротивление измеряется в Ом·см.

Четырёхзондовый метод измерения удельного сопротивления полупроводников (метод Веннера) является наиболее распространенным. Кроме высоких метрологических показателей преимущество этого метода состоит в том, что для его применения не требуется создания омических контактов к образцу, возможно измерение удельного сопротивления объемных образцов самой разнообразной формы и размеров, а также удельного сопротивления слоев полупроводниковых структур. Условием для его применения, с точки зрения формы образца, является наличие плоской поверхности, линейные размеры которой превосходят линейные размеры системы зондов. К образцу в линию прикладывают четыре зонда, расположенные на равном расстоянии. Два внешних зонда подводят ток к образцу, а два внутренних — измеряют результирующее падение потенциала. Все зонды устанавливаются на одну и ту же поверхность образца, поэтому метод подходит для измерения удельного сопротивления объемного бетона на месте.

Метод по стандарту ASTM C1760-12 предназначен для определения объемной электрической проводимости насыщенных образцов затвердевшего бетона. Цель метода — быстро оценить сопротивление бетона проникновению хлорид-ионов путём диффузии. Процедура проведения замеров:

- 1) цилиндрический образец диаметром 10 см и длиной 20 см помещают между двумя ячейками, заполненными раствором хлорида натрия;
- 2) между ячейками прикладывают потенциал в 60 вольт;
- 3) измеряют общий объём тока за одну минуту между двумя ячейками;
- 4) на основе измеренного тока, приложенного напряжения и размеров образца вычисляют объёмную электрическую проводимость бетона.

На результаты измерений влияют разные факторы, среди которых соотношение воды и цементных материалов, тип и количество дополнительных цементных материалов, наличие полимерных добавок и другие¹.

Анализ корреляций электросопротивления и прочности показал следующее. Упоминания о методах определения электросопротивления мы нашли во всех исследованиях:

- поверхностные методы были упомянуты в 3-х исследованиях;
- методы Веннера были упомянуты в 3-х исследованиях;
- другие методы (внутренний, объёмный по ASTM C1760-12, прямой) упоминались в одиночных исследованиях;
- мы не нашли упоминания о конкретном методе для 4-х исследований.

Коэффициенты корреляции: имеются упоминания о коэффициентах корреляции в 3-х исследованиях:

- в 2-х исследованиях сообщалось о сильной корреляции ($R^2 > 0,99$ или $R^2 = 0,823–0,999$);
- в 1-м исследовании сделан вывод об отсутствии значимой корреляции (что в технических науках соответствует $r < 0,6–0,7$).

Важность взаимосвязей: все исследования предоставили некоторую информацию о важности взаимосвязи между электрическим сопротивлением и прочностью бетона:

- в 2-х исследованиях сообщалось о логарифмических зависимостях;
- 2 исследования сообщили о прочных соотношениях без указания типа;
- в 2-х исследованиях была выявлена отрицательная корреляция с добавками в бетон (стальной шлак, цеолит);
- в одиночных исследованиях сообщалось: линейная или близкая к линейной корреляция, незначительная корреляция, хорошая корреляция, обратная зависимость от соотношения воды и сухого вещества, а также корреляция от внутреннего электросопротивления, надёжная для прогнозирования прочности.

Диапазон прочности бетона: мы нашли упоминание о диапазоне прочности бетона только в 2-х исследованиях (10–55 и 2–72 МПа).

В большинстве включенных исследований имеются прямые указания о влияющих факторах (таблица 3).

Анализ влияющих факторов показал следующее.

Типы факторов: типы факторов указаны во всех включенных исследованиях. Наиболее распространёнными факторами были соотношение воды и вяжущего и температура, которые упоминались в 2-х исследованиях. Каждый из 14-ти других факторов упоминался только в одном исследовании.

Влияние на электросопротивление указывалось в 8-ми исследованиях: в 4-х исследованиях сообщалось, что на электросопротивление влияли различные факторы; в каждом из 11-ти исследований сообщалось о значительном эффекте: повышении проводимости, снижении электросопротивления или о том, что это зависит от времени и соотношения количества воды к цементу w/c (water-to-cement ratio).

¹ Примечание: метод ASTM C1760-12 был отменён в январе 2021 года

Влияние на прочность упомянуто в 7-ми исследованиях: эксперименты показали значительную или улучшенную прочность; в каждом из исследований сообщалось, что прочность зависит от типа цемента, водоцементного соотношения, пористости, добавок, уменьшается при добавлении цеолита. Мы не нашли упоминаний о влиянии на сопротивление в 2-х исследованиях и о влиянии на прочность — в 4-х исследованиях.

Таблица 3

Описания влияющих факторов

Исследователи, источник	Тип фактора	Влияние на электросопротивление	Влияние на прочность
Araújo and Meira, 2022 [4]	Упоминаний не найдено	Упоминаний не найдено	Упоминаний не найдено
Deda, 2020 [10]	Тип вяжущего, природа заполнителя	Значительный эффект	Значительный эффект
Dehghanpour and Yilmaz, 2019 [12]	Углеродное волокно, наноуглерод черного цвета	Повышенная проводимость	Улучшенная прочность
Hnin et al., 2016 [13]	Соотношение вода/вяжущее, содержание летучей золы	Под влиянием факторов	Под влиянием факторов
Medeiros-Junior et al., 2014 [9]	Тип цемента, соотношение вода/вяжущее	Увеличивается со временем, уменьшается с увеличением соотношения w/c	Зависит от типа цемента
Medeiros-Junior et al., 2019 [6]	Содержание пуццолана в соотношении вода/цемент (w/c)	Выше при большем количестве пуццолана, ниже при большем соотношении w/c	Более низкая с более высоким w/c
Nzar et al., 2022 [7]	Содержание стального шлака	Пониженный	Увеличенная
Scasserra et al., 2023 [8]	Температура, форма, размер образцов	Под влиянием факторов	Упоминаний не найдено
Silva et al., 2016 [5]	Температура	Под влиянием температуры	То же
Yurt et al., 2023 [11]	Замена цеолита, температура активации	Под влиянием факторов	Снижается с увеличением содержания цеолита
Штакельберг и др., 2010 [3]	Пористость цементного камня и цементно-бетонных композиций	Пропорциональна увеличению гелевой пористости	Пропорциональна увеличению прочности

В исследованиях использовались различные методы измерения удельного электрического сопротивления, в том числе поверхностные, объёмные и внутренние. Хотя прямое сравнение точности и надёжности во всех исследованиях ограничено из-за разнообразия подходов, можно сделать несколько ключевых выводов.

Поверхностные и внутренние измерения: в исследовании [10] методы внутреннего электрического сопротивления оказались особенно надёжными для прогнозирования прочности на сжатие. Это говорит о возможных различиях в точности между методами поверхностных и внутренних измерений.

Сравнение нескольких методов: в [12] сравнили три разных метода (двухзондовый, метод Веннера и ASTM C1760-12). Хотя они не обнаружили значимой связи с прочностью проводящих бетонов, но полученные линейные зависимости между значениями удельного сопротивления, измеренными данными методами, оказались соответствующими, что говорит о согласованности результатов, полученных разными методами измерения.

Использование зондов Веннера: в исследованиях [8, 12, 13] использовался метод зондов Веннера, что говорит о его широком применении при данных исследованиях. Авторы [8] сообщили об очень сильной корреляции ($R^2 > 0,99$) при использовании этого метода, что указывает на его потенциальную надёжность.

Специальное оборудование: исследователи [11] использовали мегаомметр для прямого измерения сопротивления, что может быть преимуществом для некоторых типов бетона (например, для композитов, активированных щелочью).

Обсуждение и заключение. Исследования выявили несколько потенциальных практических применений измерения удельного электрического сопротивления для оценки прочности бетона.

Неразрушающий контроль: в исследовании [8] подчеркнули важность использования электрического сопротивления в качестве неразрушающего метода оценки прочности бетона при производстве сборных железобетонных конструкций.

Оценка прочности бетона в раннем возрасте: исследователи [5] продемонстрировали возможность прогнозирования прочности в возрасте 28 дней с помощью измерения удельного сопротивления в раннем возрасте.

Контроль качества: выявленные в большинстве исследованиях сильные корреляции позволяют предположить, что измерение удельного сопротивления можно использовать в качестве быстрого и эффективного метода постоянного контроля качества при производстве бетона [3, 4, 8–10].

Специализированные бетоны: исследования проводящих бетонов [12] и щелочеактивированных композитов [11] показывают, что измерения удельного сопротивления могут иметь уникальное применение в специализированных типах бетонов, хотя зависимости могут отличаться от обычных бетонов.

Авторы [8] отметили необходимость калибровки и использования поправочных коэффициентов, подчеркнув важность разработки стандартизированных процедур для различных типов бетона и областей применения, чтобы обеспечить надёжную оценку прочности на практике.

Как указано в обобщающей многолетние исследования статье [3], корреляционные зависимости между прочностью цементно-бетонных композиций и их электропроводностью либо линейные, либо близкие к линейным. В указанном исследовании сделана попытка раскрыть физическую сущность линейных корреляций «прочность–электросопротивление». Вместе с тем показано, что линейные корреляции зависят от вида и количества добавки замедлителя твердения, от марки цемента и класса бетона. Возрастание электрического сопротивления обусловлено увеличением гелевой составляющей формирующейся в процессе твердения пористости, а также изменением ее собственных электропроводящих свойств [3].

Таким образом, после рассмотрения преимуществ и недостатков существующих методов контроля прочности бетона стало ясно, что для способа опускающегося бетона применим неразрушающий метод контроля прочности посредством электросопротивления (косвенный метод). С целью определения дальнейшего вектора исследований и определения способа измерения электросопротивления были проанализированы результаты современных исследований, на основе которых были составлены сравнительные таблицы по ряду критериев, где установлены методы исследования, особенности образцов, размеры выборок, вид и степень корреляции, влияющие факторы. Данный анализ стал фундаментом для дальнейших исследований связи электросопротивления и прочности бетона, результаты которых авторы планируют опубликовать во второй части.

Список литературы/References

1. Хафизов Т.М., Головнев С.Г., Денисов С.Д. *Способ формирования железобетонных конструкций посредством опускающегося бетона*. Патент РФ № RU2566540. 2015.

Khafizov TM, Golovnev SG, Denisov SD *A Method of Forming Reinforced Concrete Structures by Means of Sinking Concrete*. RF Patent No. RU2566540. 2015. (in Russ.)

2. Улыбин А.В. О выборе методов контроля прочности бетона построенных сооружений. *Инженерно-строительный журнал*. 2011;4:10–15. URL: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2011/4\(22\)/ulybin_control.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2011/4(22)/ulybin_control.pdf) (дата обращения 07.10.2025).

Ulybin A.V. On the Choice of Concrete Strength Inspection Methods of Ready-built Structures. *Magazine of Civil Engineering*. 2011;4:10–15. (in Russ.) URL: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2011/4\(22\)/ulybin_control.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2011/4(22)/ulybin_control.pdf) (accessed: 07.10.2025)

3. Штакельберг Д.И., Вильге Б.И., Бойко С.В., Гольдман Ф.А. Физическая сущность линейных корреляций прочность — электрическое сопротивление при контроле упрочнения цементно-бетонных композиций. *Строительные материалы*. 2010;3:118–122.

Shtakelberg DI, Vilge BI, Boyko SV, Goldman FA Physical Essence of Linear Strength-Electrical Resistance Correlations in Controlling Hardening of Cement-Concrete Compositions. *Construction Materials*. 2010;3:118–122. (in Russ.)

4. Araújo C.C., Meira G.R. Correlation between concrete strength properties and surface electrical resistivity. *Rev. IBRACON Estrut. Mater.* 2022;1(15):e15103. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952022000100003>

5. Silva J., Jalali S., Ferreira R.M. Estimating Long-Term Durability Parameters Based on Electrical Resistivity Measurements. In: *Proceedings of the International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability. ICEETS*. Nagercoil, India; 2016.

6. Medeiros-Junior R.A., Munhoz G.S., Medeiros M.H.F. Correlations between water absorption, electrical resistivity and compressive strength of concrete with different contents of pozzolan. *Revista ALCONPAT*. 2019;9(2):152–166. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.335>

7. Nzar S.M., Ahmed S.M., Samir H., Rawaz K. Electrical resistivity-Compressive strength predictions for normal strength concrete with waste steel slag as a coarse aggregate replacement using various analytical models. *Construction and Building Materials*. 2022;327(12):127008. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127008>
8. Scasserra M.C., Balzamo H., Fernandez Luco L. The use of electrical resistivity measurement to estimate compressive strength in precast concrete processes. In: *Proceedings of the LACCEI international multi-conference for engineering, education and technology: Leadership in Education and Innovation in Engineering in the Framework of Global Transformations*. Buenos Aires, Argentina; 2023 <https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.1564>
9. Medeiros-Junior R.A., Lima M.G., Medeiros M.H.F., Real L.V. Investigaç o da resist ncia   compress o e da resistividade el trica de concretos com diferentes tipos de cimento. *Revista ALCONPAT*. 2014;4(2):113–128. <https://doi.org/10.21041/ra.v4i2.21>
10. Grazia MT, Deda H, Sanches LFM. The Influence of the Binder Type & Aggregate Nature on the Electrical Resistivity and Compressive Strength of Conventional Concrete. *Journal Building Engineering*. 2021;43:102540. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102540>
11. Yurt  ., Kir B., Bicen Y. Correlation of destructive and non-destructive tests with electrical resistance in cementless composites. *D zce  niversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 2023;11(5):2283–92. <https://doi.org/10.29130/dubited.1364092>
12. Dehghanpour H., Yilmaz K. The Relationship between Resistances Measured by Two-Probe, Wenner Probe and C1760-12 ASTM Methods in Electrically Conductive Concretes. *SN Applied Sciences*. 2020;2. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1811-7>
13. Hnin S.W., Sancharoen P., Tangtermsirikul S. Effects of Concrete Mix Proportion on Electrical Resistivity of Concrete. *Materials Sciences Forum*. 2016;866:68–72. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.866.68>

Об авторах:

Степин Дмитрий Михайлович, студент Южно-Уральского государственного университета (454080, Российская Федерация, г. Челябинск, пр. Ленина, 76), [ORCID](#), dmitriistepin@yandex.ru

Хафизов Тагир Мавлитович, заведующий лабораторией кафедры строительного производства и теории сооружений Южно-Уральского государственного университета (454080, Российская Федерация, г. Челябинск, пр. Ленина, 76), [ORCID](#), khafizovtm@susu.ru

Байбурун Альберт Халитович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительного производства и теории сооружений Южно-Уральского государственного университета (454080, Российская Федерация, г. Челябинск, пр. Ленина, 76), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), abayburin@mail.ru

Овчинников Андрей Дмитриевич, инженер кафедры строительного производства и теории сооружений Южно-Уральского государственного университета (454080, Российская Федерация, г. Челябинск, пр. Ленина, 76), [ORCID](#), ovchinnikovad@susu.ru

Каминская Эвелина Александровна, студентка Южно-Уральского государственного университета (454080, Российская Федерация, г. Челябинск, пр. Ленина, 76), [ORCID](#), melena20021@mail.ru

Коломиец Никита Олегович, студент Южно-Уральского государственного университета (454080, Российская Федерация, г. Челябинск, пр. Ленина, 76), [ORCID](#), Nikita.colomiec03@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Д.М. Степин: поиск и анализ литературы, подготовка основного текста.

Т.М. Хафизов: анализ результатов исследований, корректировка выводов.

А.Х. Байбурун: научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

А.Д. Овчинников: поиск литературы, анализ результатов исследований.

Э.А. Каминская: поиск и анализ литературы.

Н.О. Коломиец: поиск и анализ литературы.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Dmitry M. Stepin, student, South Ural State University (76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation), [ORCID](#), dmitriistepin@yandex.ru

Tagir M. Khafizov, Head of the Laboratory of the Department of Building Technologies and Structural Engineering, South Ural State University (76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation), [ORCID](#), khafizovtm@susu.ru

Albert Kh. Baiburin, Dr.Sc.(Eng.), Professor of the Department of Construction Production and Theory of Structures, South Ural State University (76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation), Associate Professor, [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), abayburin@mail.ru

Andrey D. Ovchinnikov, Engineer of the Department of Construction Production and Theory of Structures, South Ural State University (76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation), [ORCID](#), ovchinnikovad@susu.ru

Evelina A. Kaminskaya, student, South Ural State University (76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation), [ORCID](#), melena20021@mail.ru

Nikita O. Kolomiets, student, South Ural State University (76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation), [ORCID](#), Nikita.colomiec03@gmail.com

Claimed contributorship:

DM Stepin: literature search and analysis, preparation of the main manuscript.

TM Khafizov: analysis of the research results, correction of the conclusions.

AKh Baiburin: scientific supervision, analysis of the research results, revision of the manuscript, correction of the conclusions.

AD Ovchinnikov: literature search, analysis of the research results.

EA Kaminskaya: literature search and analysis.

NO Kolomiets: literature search and analysis.

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

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 10.10.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 25.10.2025

Принята к публикации / Accepted 10.11.2025