

Научная статья

УДК 90.27.31

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-8-68-74>

Выбор по комплексному показателю качества методики количественного химического анализа для определения хлорид-иона в бетонных и железобетонных конструкциях

Светлана Анатольевна Митрофанова^{1✉}, Ирина Валентиновна Муравьева²

¹ Научно-исследовательский институт транспортно-строительного комплекса, Москва, Россия

¹ Академия стандартизации, метрологии и сертификации (учебная), Москва, Россия

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

¹s_bogomolova@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-6545-6119>

²iravm@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7870-2043>

Аннотация. Рассмотрена проблема рационального выбора методики для определения хлорид-иона в бетонных и железобетонных конструкциях, от содержания которого зависит скорость коррозии арматуры. Дан обзор стандартизованных и аттестованных методик количественного химического анализа для определения хлорид-иона в бетонных и железобетонных конструкциях. Представлены результаты сравнительного анализа широко применяемых в строительной отрасли методик на основе аргентометрического, фототурбидиметрического и потенциометрического (ионометрического) методов по критериям: «Назначение и область применения методики анализа», «Метод анализа», «Измерительные приборы и реактивы», «Подготовка к анализу», «Проведение анализа», «Обработка результатов измерений». Предложен актуальный для строительных организаций выбор рациональной методики количественного химического анализа по комплексному показателю качества (себестоимости методики). Обосновано применение в строительных организациях методик на основе аргентометрического и потенциометрического методов при массовой доле хлорид-иона в бетоне от 0,5 и 0,05 % соответственно. Предложенный в работе подход к выбору рациональной методики анализа позволяет на практике оптимизировать процесс исследования характеристик строительных материалов, в том числе в целях обеспечения безопасности зданий и сооружений.

Ключевые слова: хлорид, бетон, строительные материалы, аналитический контроль, методики количественного химического анализа, показатель качества, себестоимость

Для цитирования: Митрофанова С. А., Муравьева И. В. Выбор по комплексному показателю качества методики количественного химического анализа для определения хлорид-иона в бетонных и железобетонных конструкциях // Измерительная техника. 2022. № 8. С. 68–74. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-8-68-74>

Selection on complex quality indicator of the quantitative chemical analysis procedures for determining the chloride-ion in concrete and reinforced concrete structures

Svetlana A. Mitrofanova^{1✉}, Irina V. Muravyeva²

¹ Scientific Research Institute of Transport and Construction Complex, Moscow, Russia

¹ Academy of Standardization, Metrology and Certification (educational), Moscow, Russia

² National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

¹s_bogomolova@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-6545-6119>

²iravm@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7870-2043>

Abstract. The problem of the rational selection of measurement procedure for determining the chloride-ion in concrete and reinforced concrete structures, the content of which in concrete affects the rate of rebar corrosion, is considered. A review of standardized and validated measurement procedures for determining the chloride-ion in concrete and reinforced concrete structures is given. The results of a comparative analysis of measurement procedures for construction industry based on argentometric, phototurbidimetric and potentiometric (ionometric) methods are presented on the basis of criteria "Purpose and scope of the measurement procedure", "Analysis method", "Measuring instruments and reagents", "Preparation for analysis", "Analysis procedure", "Processing the measurement results". An order of rational measurement procedure selection in construction companies on the basis of complex quality index (cost price) calculation is proposed. Application of a measurement procedure based on the argentometric method (for mass fraction of chloride-ion in concrete from 0.5 %) and a measurement procedure based on the potentiometric method (for mass fraction of chloride-ion in concrete

from 0.05 %) with the use of estimated cost price has been argued. This proposed approach to the selection of a rational measurement procedure can be used in assessing the compliance of construction materials with the requirements of norms and regulations, as well as the Technical Regulation on the Safety of Buildings and Structures.

Keywords: chloride, concrete, construction materials, analytical control methods, measurement methods, quality indicator, cost price

Введение. Повышение безопасности зданий и сооружений относится к стратегическому направлению развития строительной отрасли¹. К объектам технического регулирования относятся строительные материалы, технические характеристики которых влияют на безопасность конструкции зданий и сооружений в целом. Требования к бетонным и железобетонным конструкциям установлены в сводах правил². Принимая во внимание комплексный состав бетона, необходимо анализировать химический состав каждого компонента (цемента, песка, щебня, воды) на предмет химических добавок, вызывающих коррозию арматуры (см. ГОСТ 30459-2008³). Например, при использовании в качестве ускорителей затвердевания цемента водорастворимых неорганических соединений (хлоридов) содержание хлорид-иона в бетоне может превысить предельно допустимое значение, инициировав процесс коррозии арматуры [1–4]. Поэтому выбор эффективных методик и методов анализа для определения массовой доли хлора в строительных материалах в настоящее время является весьма актуальным.

На практике массовую долю хлора определяют следующими физическими методами анализа: атомно-эмиссионной спектрометрией с индуктивно связанной плазмой (наиболее распространена в аналитической практике); нейтронно-активационным, рентгеновским анализами; масс-спектрометрией с индуктивно связанной плазмой. Однако возможности этих методов в отношении галогенов (хлор, фтор) ограничены, поскольку аналитические линии галогенов характеризуются высокими энергиями возбуждения. Наибольшей популярностью пользуются химические методы определения хлора в виде хлорид-иона – титриметрический (аргентометрический и меркуриметрический), фотометрический, электрохимический (потенциометрическое титрования и ионометрия), ионно-хроматографический [5–7]. Каждый метод обладает рядом преимуществ и ограничений, влияющих на их область применения [8]. Например, аргентометрическое титрование обеспечивает высокую

воспроизводимость при концентрации хлорид-иона более 200 мг/дм³, в отличие от него метод меркуриметрического титрования более чувствительный, но менее селективный. При фотометрических методах, как и титровании с цветными индикаторами, при анализе окрашенных и мутных растворов требуется дополнительная операция осветления раствора. Методики ионометрического определения хлоридов в растворах отличаются простотой и экспрессностью при концентрациях хлорид-иона более 5 мг/дм³.

Цель работы – оптимизировать выбор методики количественного химического анализа для определения хлорид-иона в бетонных и железобетонных конструкциях (далее – методики) для повышения эффективности оценки соответствия этих конструкций.

Сравнительный анализ методик для определения хлорид-иона в бетонных и железобетонных конструкциях. Для определения хлорид-иона в цементах, клинкере, сырьевых смесях, минеральных добавках и сырье для производства цемента используются различные стандартизованные и аттестованные методики количественного химического анализа. К стандартизованным относят методики на основе аргентометрического, фототурбидиметрического и потенциометрического (ионометрического) методов, которые приведены в ГОСТ 5382-2019⁴. В качестве примеров аттестованных методик можно привести методику ускоренного определения хлорид-иона в водной вытяжке из почв и грунтов методом прямой ионометрии⁵, методику ионометрического определения хлора в горных породах и грунтах⁶, методику определения хлорид-иона в железобетонных конструкциях мостовых сооружений⁷. Аттестованные методики ионометрического определения хлорид-иона в бетонных и железобетонных конструкциях просты и быстры. В методике на основе метода прямой ионометрии и отраслевой дорожной методике объектами анализа служат материалы, разлагаемые кислотами, следовательно, эти методики не применимы к бетонным и железобетонным конструкциям и поэтому в настоящей статье не рассматриваются.

¹ Федеральный закон РФ от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

² СП 63.13330.2018. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Общие положения.

³ ГОСТ 30459-2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Определение и оценка эффективности.

⁴ ГОСТ 5382-2019. Цементы и материалы для производства цемента. Методы химического анализа.

⁵ Бебешко Г. И., Коновалова Е. Г., Нестерина Е. М. Ускоренное определение хлорид-иона в водных экстрактах из почв и грунтов методом прямой ионометрии. Инструкция НСАМ № 491-Х. М.: ВИМС, 2004. 13 с. URL: https://vims-geo.ru/documents/76/reestr_metodik_06_2019.pdf (дата обращения: 08.07.2022).

⁶ Бебешко Г. И., Коновалова Е. Г., Нестерина Е. М. Ионометрическое определение хлора в горных породах и почвах. Инструкция НСАМ № 358-Х. М.: ВИМС, 1994. 11 с. URL: https://vims-geo.ru/documents/76/reestr_metodik_06_2019.pdf (дата обращения: 08.07.2022).

⁷ Отраслевая дорожная методика «Методика определения содержания хлоридов в железобетонных конструкциях мостовых сооружений» утверждена и введена в действие с 15.10.2002 распоряжением Минтранса России от 09.10.2002 № ОС-857-р.

Методология сравнительного анализа основана на выборе критериев. В случае сложных объектов их выбор осуществляют посредством имитационного моделирования [9, 10]. В настоящей работе при анализе методик на основании ИСО/МЭК 99:2007⁸, ГОСТ Р 8.563-2009⁹, Р 50.2.090-2013¹⁰ выбраны следующие критерии: «Назначение и область применения методики анализа», «Метод анализа», «Измерительные приборы и реактивы», «Подготовка к анализу», «Проведение анализа», «Обработка результатов измерений»¹¹.

Назначение и область применения методик. Методики количественного химического анализа, основанные на различных методах, применимы при определении массовой доли (в широком диапазоне значений) хлорид-иона в бетоне, клинкере, сырьевых смесях, минеральных добавках и сырье для производства бетона. Показатели точности измерений (суммарная относительная погрешность) нормированы как в диапазоне (см. ГОСТ 5382-2019), так и в поддиапазонах

(см. Инструкцию НСАМ № 358-Х). Информация о диапазоне измерений D и максимальных относительных погрешностях результатов измерений $\delta_{\max}$ приведена в табл. 1 (здесь и далее в таблицах аргентометрический, фототурбидиметрический и потенциометрический методы анализа обозначены соответственно АМ, ФМ и ПМ).

Результаты измерений хлорид-иона в бетонных и железобетонных конструкциях преимущественного находятся в диапазоне

0...3,35 % [4], поэтому применение аргентометрического метода возможно лишь в случае указания в нормативном документе на добавку для бетона значения массовой доли хлорид-иона более 0,5 %.

Методы анализа для определения хлорид-иона. Аргентометрический метод основан на осаждении в азотнокислой среде хлорид-иона избытком азотнокислого серебра с последующим обратным титрованием этого избытка роданистым аммонием (роданистым калием) в присутствии индикатора. Фототурбидиметрический метод по ГОСТ 5382-2019 предусматривает измерение оптической плотности коллоидного раствора при взаимодействии ионов хлора и серебра с образованием суспензии хлорида серебра в среде азотной кислоты. При потенциометрическом методе измеряют разность потенциалов, возникающую на границе хлорид-селективного электрода и раствора с хлорид-ионом. Потенциал хлорид-селективного электрода, пропорционально зависящий от активности хлорид-иона в растворе, определяют относительно хлорид-серебряного электрода сравнения.

Измерительные приборы и реактивы. Массу образца бетона измеряют на лабораторных весах с нижним пределом измерения не более 0,05 г и классом точности не менее 2-го по ГОСТ Р 53228-2008¹². В случае фототурбидиметрического метода по ГОСТ 5382-2019 используют фотометр. При потенциометрическом методе измеряют концентрацию хлорид-иона в образце иономером с диапазоном измерения активности ионов $-2...+14$ pCl ($pCl = -\lg C_{Cl}$, где C_{Cl} – молярная концентрация ионов хлора, моль/дм³) и основной абсолютной погрешностью $\Delta_i = \pm 0,01$ pCl. Аргентометрическое и фототурбидиметрическое титрование проводят с применением семи реагентов, при потенциометрическом методе используют шесть или пять реагентов в зависимости от методики (соответственно по ГОСТ 5382-2019 или Инструкции НСАМ № 358-Х). Вспомогательное оборудование – лабораторная посуда (колбы, бюретки, пипетки)

Таблица 1

Показатели точности результатов измерений хлорид-иона

Метод	D , %	$\delta_{\max}$, %
АМ*	0,50...10,00	2,5
ФМ*	0,05...2,00	15
ПМ*	0,05...0,50	15
ПМ**	0,01...0,10	17
	0,10...0,50	12

* – диапазон измерений нормирован по ГОСТ 5382-2019.

** – поддиапазон измерений нормирован по Инструкции НСАМ № 358-Х.

Таблица 2

Измерительные приборы и реактивы при определении хлорид-иона

Метод	Прибор	Реактивы	K_1
АМ*	Лабораторные весы	Карбонат натрия, железоаммонийные квасцы, азотная кислота, нитрат серебра, роданид аммония, хлорид калия, дистиллированная вода	1,00
ФМ*	Лабораторные весы, фотометр	Азотная кислота, нитрат серебра, тетраборат натрия 10-водный, карбонат калия-карбонат натрия, хлорид калия, карбонат кальция, дистиллированная вода	1,78
ПМ*	Лабораторные весы, иономер	Азотная кислота, тетраборат натрия 10-водный, карбонат калия-карбонат натрия, хлорид калия, карбонат кальция, дистиллированная вода	0,66
ПМ**	Лабораторные весы, иономер	Азотная кислота, смесь Эшка, хлорид калия, нитрат калия, индикатор α -динитрофенола, дистиллированная вода	0,68

⁸ ИСО/МЭК 99:2007. Международный словарь метрологии – основные и общие понятия и связанные с ними термины (VIM).

⁹ ГОСТ Р 8.563-2009. Методики (методы) измерений.

¹⁰ Р 50.2.090-2013. Методики количественного химического анализа. Общие требования к разработке, аттестации и применению.

¹¹ Обработка результатов измерений хлорид-иона основана на методологии статистического анализа косвенных измерений и предполагает использование математических моделей, результаты измерений выражают в процентах.

¹² ГОСТ Р 53228-2008. Неавтоматические весы. Часть 1. Метрологические и технические требования. Тесты.

и устройства для приготовления растворов. Информация об измерительных приборах и реагентах, в том числе относительная стоимость реактивов с ежемесячной суммой амортизации измерительных приборов K_1 в долях единицы, приведена в табл. 2 (примечания *, ** – те же, что в табл. 1).

Подготовка к анализу для определения хлорид-иона.

Процедура подготовки к определению массовой доли хлорид-иона в образце включает от восьми до одиннадцати различных элементарных операций. При этом число элементарных операций непосредственно связано с трудоёмкостью процедуры подготовки. Перечни элементарных операций при подготовке к анализу различными методами с указанием (в скобках) трудоёмкости каждой операции приведены ниже.

Подготовка к анализу *аргентометрическим методом* по ГОСТ 5382-2019:

- 1) определение объёмного соотношения между концентрациями вспомогательного раствора (0,1 М раствора нитрата серебра) и титранта (роданида аммония) (0,25 ч);
- 2) определение точной концентрации вспомогательного раствора (0,1 М раствора нитрата серебра) (0,25 ч);
- 3) приготовление анализируемой смеси из образца и смеси для спекания (карбонат натрия) (0,25 ч);
- 4) подготовка (прогрев) муфеля (0,67 ч);
- 5) обработка анализируемой смеси в муфеле (0,1 ч);
- 6) растворение спека в азотной кислоте (0,25 ч);
- 7) фильтрование анализируемого раствора (0,33 ч);
- 8) приготовление анализируемого раствора в колбе фиксированного объёма (0,1 ч).

Подготовка к анализу *фототурбидиметрическим методом* по ГОСТ 5382-2019:

- 1) приготовление «солевой» смеси из карбоната кальция и смеси для спекания (карбонат калия – карбонат натрия и тетраборат натрия) (0,25 ч);
- 2) приготовление анализируемой смеси из образца и смеси для спекания (карбонат калия – карбонат натрия и тетраборат натрия) (0,25 ч);
- 3) подготовка (прогрев) муфеля (0,67 ч);
- 4) обработка «солевой» и анализируемой смеси в муфеле (0,1 ч);
- 5) растворение «солевой» смеси в азотной кислоте (0,25 ч);
- 6) приготовление «солевого» раствора в колбе фиксированного объёма (0,42 ч);
- 7) растворение спека анализируемой смеси в азотной кислоте (анализируемый раствор) (0,25 ч);
- 8) приготовление анализируемого раствора в колбе фиксированного объёма (0,42 ч);
- 9) приготовление стандартных растворов (хлорид натрия и дистиллированная вода) и калибровочных растворов («солевой» раствор, стандартный раствор и дистиллированная вода) (0,5 ч).

Подготовка к анализу *потенциометрическим методом* по ГОСТ 5382-2019:

- 1) приготовление «солевой» смеси из карбоната кальция и смеси для спекания (карбонат калия – карбонат натрия и тетраборат натрия) (0,25 ч);

2) приготовление анализируемой смеси из образца и смеси для спекания (карбонат калия – карбонат натрия и тетраборат натрия) (0,25 ч);

3) подготовка (прогрев) муфеля (0,67 ч);

4) обработка «солевой» и анализируемой смеси в муфеле (0,1 ч);

5) растворение «солевой» смеси в азотной кислоте (0,25 ч);

6) приготовление «солевого» раствора в колбе фиксированного объёма (0,42 ч);

7) растворение спека анализируемой смеси в азотной кислоте (анализируемый раствор) (0,25 ч);

8) приготовление анализируемого раствора в колбе фиксированного объёма (0,42 ч);

9) приготовление стандартных растворов (хлорид натрия и дистиллированная вода) и калибровочных растворов («солевой» раствор, стандартный раствор и дистиллированная вода) (0,5 ч).

Подготовка к анализу *потенциометрическим методом* по Инструкции НСАМ № 358-Х:

1) приготовление трёх «холостых» смесей (смесь Эшка) (0,25 ч);

2) приготовление анализируемой смеси (образец и смесь Эшка) (0,25 ч);

3) подготовка (прогрев) муфеля (0,67 ч);

4) обработка «холостой» и анализируемой смеси в муфеле (0,1 ч);

5) выщелачивание спека «холостой» смеси водой (получение «холостого» раствора) (0,25 ч);

6) выщелачивание спека анализируемой смеси водой (0,25 ч);

7) кипячение растворов, полученных в пп. 5, 6 (0,12 ч);

8) фильтрование растворов, полученных в п. 7 (0,33 ч);

9) приготовление трёх «холостых» растворов и анализируемого раствора в колбах фиксированного объёма (0,67 ч);

10) приготовление «нулевого» раствора, объединяющего три «холостых» раствора (0,1 ч);

11) приготовление стандартных растворов (хлорид калия и дистиллированная вода) и калибровочных растворов («нулевой» раствор, стандартный раствор и дистиллированная вода) (0,5 ч).

Проведение анализа для определения хлорид-иона.

При определении хлорид-иона аргентометрическим и фототурбидиметрическим методами по ГОСТ 5382-2019 используют три элементарных операции, при определении потенциометрическими методами (соответственно по ГОСТ 5382-2019 или Инструкции НСАМ № 358-Х) – две. Как и при подготовке к анализу наблюдается прямая зависимость между числом элементарных операций и трудоёмкостью анализа.

Перечень элементарных операций при анализе *аргентометрическим методом* по ГОСТ 5382-2019:

- 1) приготовление раствора для титрования, состоящего из пробы фиксированного объёма, вспомогательного раствора (нитрат серебра) и индикатора (железоаммонийные квасцы) (0,1 ч);

- 2) титрование (0,1 ч);
- 3) измерение объёма титранта (роданид аммония) (0,05 ч).

Перечень элементарных операций при анализе *фототурбидиметрическим методом* по ГОСТ 5382-2019:

- 1) приготовление раствора для фотометрирования, состоящего из пробы фиксированного объёма и вспомогательный раствор (нитрат серебра) (0,1 ч);
- 2) измерение оптической плотности в калибровочных растворах (0,75 ч);
- 3) измерение оптической плотности в анализируемом растворе (0,1 ч).

Перечень элементарных операций при анализе *потенциометрическим методом* по ГОСТ 5382-2019 или согласно Инструкции НСАМ № 358-Х:

- 1) измерение разности потенциалов между электродом, селективным к хлориду, и электродом сравнения в калибровочных растворах (0,75 ч);
- 2) измерение концентрации хлорид-иона в анализируемом растворе (0,17 ч).

Выбор методики по комплексному показателю качества (себестоимости методики). При обосновании выбора методики следует использовать количественные характеристики показателей качества. Термины и определения показателей качества, основные понятия в области контроля качества продукции изложены в ГОСТ 15467-79¹³, международном стандарте ИСО 9000:2015¹⁴. В частности, ГОСТ 15467-79 содержит рекомендации по расчёту единичных, комплексных и интегральных показателей качества. На практике используют различные методологии принятия рациональных решений при внедрении процессов и технологий, например, системный подход при оценке поставщиков [11], многофакторную модель оценивания доходности мероприятия [12], классификацию показателей эффективности и качества применительно к производству [13].

В настоящей работе выбор рациональной методики основан на расчёте себестоимости услуги по проведению количественного химического анализа. Себестоимость – важный экономический показатель – является базой для

определения цены, расчёта прибыли организации от оказания услуги, налога на прибыль. Кроме того, вычисление данного показателя позволяет охарактеризовать методику с различных позиций (например, трудоёмкости, материалоёмкости). Таким образом, себестоимость представляет собой комплексный показатель качества услуги.

Таблица 3

Единичный и комплексный показатели качества методов анализа

Метод	K_2	K
АМ*	1,00	1,00
ФМ*	1,66	1,72
ПМ*	1,64	1,15
ПМ**	1,80	1,24

Выбор методики состоит из трёх этапов: сравнительного анализа методов, включая выбор единичных показателей качества; оценки единичных показателей качества; расчёта комплексного показателя качества (себестоимости) как характеристики рациональности применения метода.

В общем случае математическая модель для расчёта комплексного показателя качества имеет вид

$$K = \sum_{i=1}^n K_i \alpha_i; \quad K_i = x_i / x_6,$$

где K_i – i -й единичный показатель качества для методики количественного химического анализа; α_i – коэффициент весоности единичного показателя качества K_i ; x_i , x_6 – значения i -го параметра соответственно для рассматриваемой и базовой (принятой в качестве основы для сравнения) методики анализа.

Единичные показатели качества для методики анализа выбраны исходя из математической модели себестоимости, учитывающей затраты организации на оказание услуги. В соответствии с Положением¹⁵ расходы организации необходимо группировать по следующим элементам: материальные затраты; затраты на оплату труда; отчисления на социальные нужды; амортизация; прочие затраты. При этом перечень статей затрат устанавливается организацией самостоятельно. В рассматриваемом случае в этот перечень включены стоимость реактивов, непосредственно используемых при анализе, сумма амортизации измерительных приборов, а также затраты на оплату труда операторов, выполняющих подготовку и проведение анализа, $C_{\text{тр}} = TC$, где T – трудоёмкость выполнения операций по подготовке и проведению количественного химического анализа; C – стоимость одного часа работы оператора, установленная с учётом его средней заработной платы, принятого в организации коэффициента рентабельности, косвенных расходов и расходов на уплату страховых взносов организацией.

В качестве базовой при расчёте относительных значений единичных показателей качества принята методика на основе *аргентометрического метода*. Относительную стоимость K_1 реактивов и ежемесячную сумму амортизации измерительных приборов см. в табл. 2. При расчёте ежемесячной суммы амортизации K_2 , определяемой как произведение первоначальной стоимости измерительных приборов и ежемесячной амортизационной нормы (1,6667 %), использованы первоначальные стоимости следующих измерительных приборов: весов электронных лабораторных Acculab ALC-210.4 (Acculab Group, США); иономера лабораторного И-160 МИ (ООО «Измерительная техника», Россия); фотоэлектрического фотометра КФК-3-01 (ОАО «Загорский оптико-механический завод», Россия).

В табл. 3 приведены относительные значения единичного K_2 и комплексного K показателей качества для

¹³ ГОСТ 15467-79. Контроль качества продукции. Основные понятия. Термины и определения.

¹⁴ ИСО 9000:2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь.

¹⁵ Положение по бухгалтерскому учёту «Расходы организации» ПБУ 10/99, утверждённое Приказом Минфина России от 06.05.1999 № 33н.

рассматриваемых методик анализа и коэффициенты весо-
мостности (примечания *, ** — те же, что в табл. 1). Коэффи-
циенты весо-мостности единичных показателей качества опреде-
лены с учётом равнозначности всех показателей: $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$.
Таким образом, $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,5$.

Согласно данным табл. 3 минимальную себестоимость
имеет аргентометрический метод, результаты измерений
этим методом получены с минимальной погрешностью
(по сравнению с погрешностями других рассмотренных
методов, см. табл. 1). Однако методика на основе арген-
тометрического метода применима лишь при массовой
доле хлорид-иона более 0,5 % (указанной в нормативном
документе на добавку для бетона), в противном случае
предпочтительной является методика на основе потенцио-
метрического метода по ГОСТ 5382-2019, позволяющая
определить содержание хлорид-иона при массовой доле
более 0,05 %.

Заключение. Расчёт комплексного показателя качества
(себестоимости) методик количественного химического
анализа позволил обоснованно выбрать методику на основе
аргентометрического метода (при массовой доле хлорид-
иона в бетоне от 0,5 %) и методику на основе потенциомет-
рического метода (при массовой доле хлорид-иона в бе-
тоне от 0,05 %). Предложенный в работе подход к выбору
рациональной методики анализа для строительных органи-
заций даёт возможность на практике оптимизировать про-
цесс исследования характеристик строительных материа-
лов, в том числе в целях обеспечения безопасности зданий
и сооружений. В частности, выбор рационального метода
анализа по определению массовой доли хлорид-иона в бе-
тонных и железобетонных конструкциях повышает качество
измерительной информации, используемой при оценке со-
ответствия строительных материалов требованиям норм и
правил, а также технического регламента о безопасности
зданий и сооружений.

Предложенный подход к выбору методики количествен-
ного химического анализа может быть рекомендован при
выборе методик исследований (испытаний) и измерений
для оценки соответствия различных объектов как обяза-
тельным, так и добровольным к исполнению требованиям.

Список источников

1. Khan M. U., Ahmad S., Al-Gahtani H. J., *International Journal of Corrosion*, 2017.
<https://doi.org/10.1155/2017/5819202>
2. Батраков В. Г. Модифицированные бетоны. Теория
практики, 2-е изд. перераб. и доп. М.: Фирма Технопроект АО
«Астра семь», 1998. 768 с.
3. Рамачадран В. С. Добавки в бетон. Справочное посо-
бие. М.: Стройиздат. 1988. 575 с.
4. Шевцов Д. С., Зарцын И. Д. Моделирование элек-
трохимической коррозии стальной арматуры в железобетоне. Оценка эффективности вторичной защиты ги-
дрофобизаторами глубокого проникновения // Сборник
материалов Третьего междисциплинарного молодёжного

научного форума с международным участием «Новые ма-
териалы». 2017. Москва, 21–24 ноября 2017, М.: ООО «Буки
Веди», 2017. С. 387–390.

5. Муравьева И. В., Бебешко Г. И. Определение со-
держания хлора в объектах доменного производства // Из-
вестия высших учебных заведений. Чёрная металлургия.
2017. Т. 60. № 5. С. 342–347.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-5-342-347>

6. Муравьева И. В., Бебешко Г. И. Контроль содержания
хлора в углях // Заводская лаборатория. Диагностика мате-
риалов. 2017. Т. 83. № 8. С. 23–26.

7. Богомолова С. А., Муравьева И. В. Применение ро-
бастного параметрического проектирования при разработке
методики количественного химического анализа в металлур-
гическом производстве // Метрология. 2021. № 3. С. 48–61.
<https://doi.org/10.32446/0132-4713.2021-3-48-61>

8. Bogomolova S. A., Muravyeva I. V., *Materials Science Fo-
rum*, 2022, vol. 1052. pp. 429–435. <https://doi.org/10.4028/p-j53sv2>

9. Лукина Н. В. и др. Биоразнообразие и климаторегу-
лирующие функции лесов: актуальные проблемы и перспек-
тивы исследований // Вопросы лесной науки. 2020. Т. 3. № 4.
С. 1–90. <https://doi.org/10.31509/2658-607x-2020-3-4-1-90>

10. Chaban L. N. et al., *AIP Conference Proceedings*, 2019,
vol. 2171, no. 1. pp. 180003-1–180003-7.

<https://doi.org/10.1063/1.5133344>

11. Кершенбаум В. Я., Ващенко Н. В., Гонтаренко Т. И.
Значимость системы менеджмента качества в системе
оценки российских поставщиков нефтегазового оборудова-
ния // Оборудование и технологии для нефтегазового ком-
плекса. 2020. № 1(115). С. 42–44.

[https://doi.org/10.33285/1999-6934-2020-1\(115\)-42-44](https://doi.org/10.33285/1999-6934-2020-1(115)-42-44)

12. Каракчиева И. В., Чумаченко К. И. Система оценки
экономической доходности древесных ресурсов леса и эко-
номической доступности лесных участков // Фундаменталь-
ные исследования. 2016. № 7-2. С. 372–377.

13. Franceschini F., Galetto M., Maisano D., *International
Journal of Services and Operations Management*, 2006, vol. 2,
no. 3, pp. 294–311. <https://doi.org/10.1504/IJSOM.2006.009862>

References

1. Khan M. U., Ahmad S., Al-Gahtani H. J., *International
Journal of Corrosion*, 2017.
<https://doi.org/10.1155/2017/5819202>
2. Batrakov V. G., *Modificirovannye betony. Teoriya prak-
tiki [Modified concrete. Theory of Practice]*, 2nd edition, revised
and supplemented, Moscow, Firm Teleproekt JSC “Astra seven”,
1998, 768 p. (In Russ.)
3. Ramachadran V. S., *Dobavki v beton. Spravochnoe poso-
bie [Concrete additives. Reference Guide]*, Moscow, Strojizdat
Publ., 1988, 575 p. (In Russ.)
4. Shevtsov D. S., Zarcin I. D., Modeling of electrochemical
corrosion of steel reinforcement in concrete. Evaluation of the ef-
fectiveness of secondary protection gidrofobizatorami deep pe-
netration, *The 3d interdisciplinary youth scientific forum with in-
ternational participation “New Materials”, Collection of materials*,

Moscow, 21–24 November 2017, Moscow, Buki-Vedi Publ., 2017, pp. 387–390. (In Russ.)

5. Murav'eva I. V., Bebashko G. I., *Steel in Translation*, 2017, vol. 47, no. 5, pp. 287–290.

<https://doi.org/10.3103/S0967091217050084>

6. Muravyeva I. V., Bebashko G. I., Control of chlorine content in coals, *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2017, vol. 83, no. 8, pp. 23–26. (In Russ.)

7. Bogomolova S. A., Muravyeva I. V., *Measurement Techniques*, 2021, vol. 64, no. 9, pp. 772–777.

<https://doi.org/10.1007/s11018-022-02002-x>

8. Bogomolova S. A., Muravyeva I. V., *Materials Science Forum*, 2022, vol. 1052, pp. 429–435. <https://doi.org/10.4028/p-j53sv2>

9. Lukina N. V. et al., Biodiversity and climate regulating functions of forests: current issues and prospects for research, *Voprosy lesnoj nauki [Forest science issues]*, 2020, vol. 3, no. 4, pp. 1–90. (In Russ.) <https://doi.org/10.31509/2658-607x-2020-3-4-1-90>

10. Chaban L. N. et al., *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2171, no. 1, pp. 180003-1–180003-7.

<https://doi.org/10.1063/1.5133344>

11. Kershenbaum V. Ya., Vashchenko N. V., Gontarenko T. I., Significance of a quality management system in the assessment system of russian suppliers of oil and gas equipment, *Oborudovanie i tehnologii dlja neftegazovogo kompleksa [Equipment and technologies for oil and gas complex]*, 2020, no. 1(115), pp. 42–44. (In Russ.) [https://doi.org/10.33285/1999-6934-2020-1\(115\)-42-44](https://doi.org/10.33285/1999-6934-2020-1(115)-42-44)

12. Karakchieva I. V., Chumachenko C. I., System of the assessment of economic profitability of wood resources of the wood and economic availability of the timberland, *Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental research]*, 2016, no. 7-2, pp. 372–377. (In Russ.)

13. Franceschini F., Galetto M., Maisano D., *International Journal of Services and Operations Management*, 2006, vol. 2, no. 3, pp. 294–311. <https://doi.org/10.1504/IJSOM.2006.009862>

Статья поступила в редакцию 11.05.2022; одобрена после рецензирования 14.06.2022; принята к публикации 15.06.2022.
The article was submitted 11.05.2022; approved after 14.06.2022; accepted for publication 15.06.2022.