

**ОЦЕНКА УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА И ПРОГНОЗ КОРРОЗИОННОЙ
СТОЙКОСТИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ НИЗКОКЛИНКЕРНЫХ
ВЯЖУЩИХ**

*Студент 2 курса магистратуры Жёлтышева Анастасия Дмитриевна,
Уфимский государственный нефтяной технический университет, Российская
Федерация, г.Уфа.*

**CARBON FOOTPRINT ASSESSMENT AND PREDICTION OF
CORROSION RESISTANCE OF MULTI-COMPONENT LOW-CLINKER
BINDERS**

*2nd-year Master's student Zholtyševa Anastasia Dmitrievna, Ufa State Petroleum
Technological University, Russian Federation, Ufa.*

Аннотация. В статье выполнен количественный расчет углеродного следа шести составов композиционных цементов по методологии оценки жизненного цикла «от колыбели до ворот» (ISO 14040:2006). Установлено, что снижение выбросов CO₂-экв относительно портландцемента ЦЕМ I составляет от 45,9 % (состав с 52 % клинкера) до 85,4 % (ультра-низкоklinkерный состав: 10 % клинкера, 52 % шлака, 36 % ваграночной пыли, 5 % метаксаолина). На основе анализа фазового состава (содержание портландита от 1,7 до 18,9 %) и плотности структуры выполнен прогноз сульфатостойкости, кислотостойкости, стойкости к выщелачиванию и риска депассивации арматуры при карбонизации. Предложены рекомендации по применению разработанных составов в зависимости от условий эксплуатации.

Ключевые слова: композиционные цементы, углеродный след, оценка жизненного цикла, сульфатостойкость, карбонизация, портландит, низкоуглеродные вяжущие.

Abstract. *The article presents a quantitative calculation of the carbon footprint of six composite cement compositions using the cradle-to-gate life cycle assessment methodology (ISO 14040:2006). It has been established that the reduction in CO₂-eq emissions relative to Portland cement CEM I ranges from 45.9 % (composition with 52 % clinker) to 85.4 % (ultra-low-clinker composition: 10 % clinker, 52 % slag, 36 % cupola dust, 5 % metakaolin). Based on the analysis of phase composition (portlandite content from 1.7 to 18.9 %) and structural density, a prediction of sulfate resistance, acid resistance, leaching resistance, and the risk of reinforcement depassivation during carbonation has been made. Recommendations for the application of the developed compositions depending on operating conditions are proposed.*

Keywords: *composite cements, carbon footprint, life cycle assessment, sulfate resistance, carbonation, portlandite, low-carbon binders.*

Цементная промышленность является одним из крупнейших антропогенных источников выбросов диоксида углерода, на долю которых приходится 7–8 % от общемирового объема. Два основных источника выбросов при производстве портландцементного клинкера – декарбонизация известняка ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$), обеспечивающая около 60 % выбросов, и сжигание ископаемого топлива для обжига (около 40 %). Композиционные цементы, в которых часть клинкера замещается техногенными продуктами (шлак, зола-унос, метакеолин), являются наиболее технологически готовой стратегией снижения углеродного следа.

Однако снижение доли клинкера неизбежно изменяет фазовый состав цементного камня, что влияет на его коррозионную стойкость. Целью данной работы является комплексная оценка разработанных композиционных цементов по двум

ключевым критериям – экологическому (углеродный след) и эксплуатационному (коррозионная стойкость в различных средах).

Методология расчета углеродного следа

Расчет выполнен по методологии оценки жизненного цикла типа «от колыбели до ворот» в соответствии с ISO 14040:2006 и ISO 14044:2006. Рассматриваются выбросы парниковых газов, выраженные в эквиваленте диоксида углерода (CO₂-экв), на этапах добычи сырья, транспортировки, производства клинкера, помола цемента и смешения с добавками.

Удельные факторы выбросов (EF, кг CO₂-экв/т) приняты на основании Бюро наилучших доступных технологий (НДТ 38-2021 «Производство цемента»), работ Hasanbeigi и Price (2015) и отраслевых справочников:

Портландцементный клинкер (ЦЕМ I) – 870 кг/т;

Гранулированный доменный шлак – 52 кг/т;

Зола-унос ТЭС – 8 кг/т;

Ваграночная пыль – 15 кг/т (оценочно);

Метакаолин – 150 кг/т;

Керамзитовая пыль – 20 кг/т.

Расчет углеродного следа для каждого состава выполнен по принципу аддитивной смеси: $CF = \sum(m_i \cdot EF_i)$, где m_i – массовая доля i -го компонента.

Результаты расчета углеродного следа

Для базового сравнения принят традиционный портландцемент ЦЕМ I (95 % клинкера, 5 % гипса) с углеродным следом 870 кг/т. Результаты расчета для шести разработанных составов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Углеродный след композиционных цементов C0–C5

Состав	Доля клинкера, %	Углеродный след, кг CO ₂ -экв/т	Снижение относительно ЦЕМ I, %
C0	52,1	470,9	45,9
C1	52,0	458,4	47,3
C2	10,0	126,9	85,4
C3	21,0	215,2	75,3
C4	21,0	210,4	75,8
C5	25,3	258,9	70,2

Анализ таблицы показывает, что все разработанные составы обеспечивают значительное снижение углеродного следа. Состав C2 (10 % клинкера, 52 % шлака, 36 % ваграночной пыли, 5 % метакеолина) достигает уровня ультра-низкоуглеродных вяжущих (менее 200 кг CO₂-экв/т), приближаясь по экологичности к бесклинкерным щелочно-активированным системам. Даже «наиболее клинкерные» составы C0 и C1 (52 % клинкера) соответствуют требованиям европейского стандарта EN 197-1 для цементов типа ЦЕМ V/A (снижение на 40–50 %).

Прогноз коррозионной стойкости

Прогноз выполнен на основе данных о фазовом составе (содержание портландита по ТГ-ДСК, наличие цеолитоподобных фаз по РФА) и плотности структуры. Ключевые характеристики составов сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Фазовые и структурные характеристики составов C0–C5

Состав	Содержание Ca(OH) ₂ , %	Плотность, кг/м ³	Фазовые особенности (РФА)
C0	18,9	1881	Портландит, этtringит, гидросиликаты
C1	8,2	1869	Портландит, розенханит, ягаварит

Состав	Содержание Ca(OH)_2 , %	Плотность, кг/м^3	Фазовые особенности (РФА)
C2	5,8 (следы РФА)	1795	Цеолитоподобные фазы, этtringит
C3	8,2	1979	Цеолиты, карбонатно-сульфатный этtringит
C4	4,1	1812	Портландит (следы), три гидросиликатные фазы
C5	1,7 (следы РФА)	2191	Цеолитоподобные фазы, высокая плотность

На основе этих данных выполнен прогноз по четырем видам коррозионной стойкости и защите арматуры (таблица 3).

Таблица 3 – Прогноз коррозионной стойкости составов C0–C5

Соста в	Сульфато- стойкость	Кислото- стойкость	Стойкость к выщелачиванию	Риск депассивации арматуры
C0	Низкая	Низкая	Низкая	Низкий (хорошая защита)
C1	Умеренная	Умеренная	Умеренная	Умеренный
C2	Высокая	Повышенная	Средняя	Высокий
C3	Хорошая	Хорошая	Повышенная	Высокий
C4	Хорошая	Хорошая	Средняя	Умеренно высокий
C5	Очень высокая	Очень высокая	Высокая	Очень высокий

Обсуждение и рекомендации.

Полученные результаты выявляют четкое противоречие. Составы с высоким содержанием портландита (С0, С1) обеспечивают надежную защиту арматуры благодаря высокой щелочности поровой жидкости (рН 12,5–13,0), но обладают низкой стойкостью к сульфатной и кислотной коррозии. Их углеродный след снижен на 45–47 % – хороший, но не максимальный результат.

Напротив, составы с минимальным содержанием портландита (С2, С5) демонстрируют высокую и очень высокую сульфатостойкость, а также низкую проницаемость (особенно С5 с плотностью 2191 кг/м³). Их углеродный след снижен на 70–85 %, что является выдающимся экологическим показателем. Однако риск депассивации арматуры при карбонизации для этих составов является высоким или очень высоким.

На основе интегральной оценки сформулированы следующие рекомендации по применению:

1. Для железобетонных конструкций в обычных условиях эксплуатации (отсутствие сульфатной агрессии, защита от карбонизации) оптимальны составы С0 и С1. Они обеспечивают надежную пассивацию арматуры и снижение углеродного следа на 45–47 %.

2. Для неармированных конструкций и изделий (фундаментные блоки, дорожные плиты, тротуарная плитка, бордюры) в агрессивных сульфатных средах (грунтовые воды, морская вода) рекомендуются составы С2 и С5. Состав С2 является предпочтительным с экологической точки зрения (снижение выбросов на 85,4 %), состав С5 – с точки зрения максимальной плотности и стойкости к выщелачиванию.

3. В качестве компромиссного решения для конструкций со средними требованиями по всем критериям может быть рекомендован состав С4 (снижение выбросов 75,8 %, умеренная защита арматуры, хорошая сульфатостойкость).

4. При использовании низкоуглеродных составов (С2, С5) в железобетонных конструкциях обязательна дополнительная защита арматуры:

увеличение защитного слоя, применение эпоксидного покрытия или ингибиторов коррозии.

Заключение

1. Выполнен количественный расчет углеродного следа шести составов композиционных цементов. Все составы обеспечивают снижение выбросов CO₂-экв на 45,9–85,4 % по сравнению с портландцементом ЦЕМ I.

2. Максимальная экологическая эффективность достигнута для состава С2 (10 % клинкера, 52 % шлака, 36 % ваграночной пыли, 5 % метаксаолина): углеродный след 126,9 кг/т, снижение на 85,4 %.

3. На основе анализа фазового состава и плотности выполнен прогноз коррозионной стойкости. Установлено противоречие между высокой сульфатостойкостью низкоклинкерных составов и повышенным риском депассивации арматуры при карбонизации.

4. Предложены рекомендации по применению разработанных составов в зависимости от условий эксплуатации и требований к защите арматуры.

Список использованных источников

1. Andrew R. M. Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2018 // Earth System Science Data. – 2019. – Vol. 11, No. 4. – P. 1675–1710.
2. Бюро наилучших доступных технологий. Справочник НДТ 38-2021 «Производство цемента». – М., 2021. – 420 с.
3. Hasanbeigi A., Price L. Emerging Energy-efficiency and Carbon Dioxide Emissions-reduction Technologies for Cement and Concrete Production. – Berkeley: LBNL, 2015. – 95 p.
4. Gartner E., Sui T. Alternative cement clinkers // Cement and Concrete Research. – 2018. – Vol. 114. – P. 27–39.
5. Москвин В. М. Коррозия бетона. – М.: Стройиздат, 1980. – 536 с.
6. Степанова И. А. Долговечность бетона в агрессивных средах. – М.: Издательство АСВ, 2016. – 312 с.
7. Скворцов Л. А., Потапова Е. В. Методологические аспекты оценки углеродного следа композиционных цементов // Цемент и его применение. – 2022. – № 4. – С. 78–83.
8. De Weerdt K., Geiker M. R., Lothenbach B. Effect of supplementary cementitious materials on the corrosion of steel in concrete // Cement and Concrete Research. – 2019. – Vol. 122. – P. 270–281.