

УДК 691.33

Хозин Вадим Григорьевич

доктор технических наук, профессор

Email: khozin.vadim@yandex.ru

Хохряков Олег Викторович

кандидат технических наук, доцент

Email: olvik@list.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Козлов Роман Владимирович

руководитель отдела проектно-изыскательных работ

Email: kozlov-roman@bk.ru

АО «Татарское специальное научно-реставрационное управление»

Адрес организации: 420095, Россия, г. Казань, ул. Восстания, д. 100, корп. 209

Экологический рейтинг «карбонатных» цементов низкой водопотребности и бетонов на их основе

Аннотация

Постановка задачи. Оценить «карбонатные» цементы низкой водопотребности и бетоны на их основе по экологическим показателям, рассчитываемым по клинкероёмкости вяжущих.

Результаты. Разработанные авторами «карбонатные» цементы низкой водопотребности с содержанием клинкера от 20 до 70 % превосходят стандартные цементы по всем техническим показателям и способны заменить их при производстве бетонов, имея при этом самый низкий «углеродный след», оцениваемый по экологическому рейтингу, предложенному Л. Эвансом и М. Муттером. Предлагается рассматривать экологический рейтинг не только для цемента, но и для цементного бетона и конструкций из него, охватывая весь их жизненный цикл вплоть до этапа утилизации демонтируемого объекта. Рассчитан экологический показатель K^{CO_2} «карбонатных» цементов низкой водопотребности и показано, что по сравнению с европейскими цементами, также содержащими добавки известняков, он ниже в 2 раза.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в обосновании использования «карбонатных» цементов низкой водопотребности, как обладающих наиболее низким содержанием цементного клинкера, что отвечает самым жестким экологическим требованиям по объемам выбросов углекислого газа в атмосферу.

Ключевые слова: «карбонатные» цементы низкой водопотребности, экологический рейтинг, выбросы CO_2 , бетон, цемент.

Для цитирования: Хозин В. Г., Хохряков О. В., Козлов Р.В. Экологический рейтинг «карбонатных» цементов низкой водопотребности и бетонов на их основе // Известия КГАСУ. 2021. № 2 (56). С. 60–66. DOI: 10.52409/20731523_2021_2_60.

1. Введение

С 1 января 2019 года вступил в силу Федеральный закон от 21.07.2014 № 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации», предусматривающие переход на технологическое нормирование на принципах наилучших доступных технологий (НДТ) и применение дифференцированных мер государственного регулирования к объектам, в зависимости от их негативного воздействия на окружающую среду (НВОС). Экологическое нормирование предусматривает учет категории объекта, оказывающей такое воздействие. Предприятия по производству цементного клинкера относятся к объектам I категории по уровню НВОС, в первую очередь, вследствие больших выбросов углекислого газа (CO_2) и NO. Поэтому снижение клинкероёмкости является главным экологическим устремлением мировой цементной и бетонной индустрии [1-3]. Её доля в мировом выбросе углекислого

газа составляет 7-8 % от всего объема парниковых газов, поступающих в атмосферу Земли в результате производственной деятельности человечества [4-5].

В российском журнале «Цемент и его применение» опубликована знаковая статья специалистов-цементников из Великобритании Л. Эванса и М. Муттера «Экологический рейтинг цемента» [6], в которой предлагается обобщенный экологический показатель производства цемента, равный отношению выбросов CO_2 при производстве 1 т бездобавочного вяжущего к его нормативной прочности при сжатии (в 28 суточном возрасте), определенный по EN 197-1:2011. Рейтинг имеет размерность $[\text{кг CO}_2/(\text{т} \cdot \text{МПа})]$. Авторами предлагается маркировочная шкала экологического рейтинга (обозначено $K_{\text{CO}_2}^{\text{II}}$) со значениями от 5.99 $\text{кг}/(\text{т} \cdot \text{МПа})$ – меньший «углеродный след» до 16.00 и более – больший «углеродный след».

Отмечается, что снижение доли клинкера в цементе, содержащем минеральные добавки, уменьшает удельный выброс CO_2 , но не всегда улучшает экологический рейтинг, т.к. при этом снижается его прочность (R_{28}). Это чётко прослеживается по показателю K_{CO_2} типичных европейских цементах (табл. 1), содержащих добавки известняка СЕМ II/A-LL (6-12 %), СЕМ II/B-LL (21-35 %) в сравнении с СЕМ IV/A-V, содержащем до 35 % золы-уноса.

Таблица 1

Показатель рейтинга цемента, выпускаемых типичным европейским заводом, и удельные выбросы CO_2 при их производстве [2]

Тип цемента	Показатель рейтинга, $\text{кг CO}_2/(\text{т цемента} \cdot \text{МПа})$ (28-суточная прочность при сжатии)	Удельные выбросы, $\text{кг CO}_2/\text{т цемента}$
СЕМ II/A-LL 42.5R	13,4	700
СЕМ II/A-LL 32.5R	13,4	649
СЕМ II/B-LL 32.5R	15,7	573
СЕМ IV/A-V 32.5R	12,2	571

Очевидно, что низкие значения прочности цементов с добавками известняка обусловлены недомолом клинкера при его совместном помоле с более мягким вторым компонентом (для производителя цемента это выгодно, так как можно снизить энергозатраты на помол при сохранении нормируемой удельной поверхности смешанного цемента). Экологические преимущества цемента с золой-уноса ТЭС (СЕМ IV/A-V 32.5R) обеспечиваются его более низкой клинкероёмкостью и высокой прочностью, обусловленной одинаковым помолом пуццоланической добавки и клинкера.

Разработанная авторами технология «карбонатных» цементов низкой водопотребности – ЦНВ-КБ, основанная на раздельно-последовательном помоле ПЦ-клинкера с суперпластификатором и карбонатными породами (известняками, доломитами) позволяет получать композиционные цементы с низким содержанием клинкера (30-70 %), но высокой нормативной прочностью (классом) и лучшими технологическими показателями: подвижностью цементного теста, скоростью твердения и др. [7, 8].

По комплексу всех свойств ЦНВ-КБ не только не уступают стандартным общестроительным портландцементом, но и превосходят их по экономическим и экологическим показателям. Технология их производства соответствует критериям наилучших доступных технологий (НДТ) по энергосбережению, минимуму выбросов и сбросов (НВОС), а с учетом возможности и целесообразности использования отходов известняка (карьерных высевок фракции 0-10 мм) она относится к малоотходным ресурсосберегающим. Технология легко может быть реализована на существующих цементных заводах и автономных помольных установках.

В связи с этим представляет интерес сравнение экологического рейтинга этих цементов, оцениваемого по описанной выше методике – $K_{\text{CO}_2}^{\text{II}}$ $[\text{кг CO}_2/\text{т} \cdot \text{МПа}]$, с показателями рейтинга стандартных цементов. При их определении авторы опирались на указанные в статье [1] показатели рядового цемента СЕМ I 52.5N в Европе: выбросы CO_2 – 828 $\text{кг}/\text{т}$ цемента, 28-суточная прочность при сжатии R_{28}^{II} – 63 МПа. Отсюда его рейтинг $K_{\text{CO}_2}^{\text{II}}$ равен 13,14 (табл. 2).

Таблица 2

**Сравнительные показатели экологического рейтинга европейских цементов
и «карбонатных» ЦНВ-КБ (с содержанием клинкера 30, 50, 70 %)**

№	Тип цемента	Содержание клинкера, %	R ^c ₂₈ , МПа	Удельные выбросы кг CO ₂ /т Ц	Рейтинг K ^ц _{CO₂} кг CO ₂ /т·МПа
1	CEM I 52.5N (европейский)	95-100	63	828	13,14
2	CEM II/A-L 42.5N (европейский)	80-94	53	747	14,1
3	ЦНВ-30КБ	30	37	248	6,7
4	ЦНВ-50КБ	50	73	414	5,67
5	ЦНВ-70КБ	70	87	580	6,66

Как видно из данных табл. 1-2, экологические преимущества «карбонатных» ЦНВ перед европейскими цементами, содержащими добавки известняка и золы-уноса, весьма велики – их показатель K^ц_{CO₂} в 2 раза меньше.

Основное применение цемента в мире – бетон, поэтому снижение расхода цемента в нём и, тем самым, клинкероёмкости является главной задачей экологизации бетонного строительства. На втором этапе жизненного цикла цемента в составе бетона «углеродный след» логично оценивать соответственно его доле в кубометре бетона, а если использовать тот же смысл рейтинга K_{CO₂}, то удельные выбросы CO₂ на производство доли цемента в составе бетона также целесообразно отнести к марочной (28 суток) прочности самого бетона.

$$K_{CO_2}^B = \frac{kgCO_2 \cdot Ц(m)}{R_B(MPa)}, \quad (1)$$

где кг CO₂ – выбросы CO₂ в кг при производстве 1 т цемента;

Ц (т) – расход цемента в т на 1 м³ бетона;

R^B_{CO₂} – нормативная прочность бетона при сжатии (28 суток) в МПа.

Этот экологический показатель (рейтинг) бетона в случае его учета потребителями, государственными структурами, экологами, должен стимулировать производителей бетона применять не только цементы с низким K^ц_{CO₂}, но и с меньшим его содержанием в бетоне на единицу прочности последнего.

Современный тренд в мировом бетонном строительстве – это высокопрочные бетоны (R₂₈ = 120-150 МПа и более) для производства несущих конструкций. Их применение даже при большем расходе цемента в 1 м³ позволяет снизить рабочие сечения несущих элементов и, соответственно, их объем, расход арматурной стали и массу конструкций в целом [9]. Это обеспечивает существенный экологический эффект не только за счёт снижения расхода материалов на возведение строительного объекта, но и сокращения объема и стоимости строительно-монтажных работ [10]. Примечательно, что в Индии – второй стране после Китая по производству портландцемента, применение высокопрочных бетонов в конструкциях, позволяющее сократить расход цемента до 25 %, является одной из главных задач государственной программы экологизации строительства [11].

Цель данной работы – оценка «карбонатных» цементов низкой водопотребности и бетонов на их основе по экологическим показателям, рассчитываемым по клинкероёмкости вяжущих.

2. Материалы и методы

«Карбонатные» цементы низкой водопотребности получали по двухстадийной последовательно-раздельной технологии, которая заключается в предварительном измельчении портландцемента с суперпластификатором и последующим их домолом с карбонатным наполнителем. Использовали вибрационно-шаровую мельницу СВМ-3 ООО «Опытный завод со специальным бюро» (г. Москва) с мощностью двигателя 3 кВт и объемом помольной камеры 10 л.

Был использован бездобавочный портландцемент ЦЕМ I 42,5Б Мордовского цементного завода (ГОСТ 31108). В качестве суперпластификаторов приняты две

химические добавки на основе модифицированных эфиров поликарбоксилатов: порошкообразный Melflux 5581F (АО «Еврохим-1») и концентрированный 48 %-й водный раствор Stachement 2280 (ЗАО «Стахема-Волга»). Карбонатный наполнитель – известняковая мука, полученная из породы Бондюжского месторождения (РТ, г. Менделеевск). Свойства муки: истинная плотность – 2,7 г/см³, насыпная плотность – 1,4 г/см³, удельная поверхность – 300 м²/кг.

3. Результаты

На первом этапе работы был определен экологический рейтинг тяжелого крупнозернистого бетона (табл. 3) в зависимости от вида применяемого цемента при равном содержании суперпластификаторов Melflux 5581F и Stachement 2280 от массы цемента – 0,6 % (по активному веществу), введенных в бетонную смесь или в состав ЦНВ (выбросы CO₂ на 1 т цемента взяты из табл. 2). Расчетные данные экологических показателей бетонов на разных цементах представлены в табл. 4.

Таблица 3

Составы и свойства тяжелого бетона на стандартном цементе и ЦНВ-50КБ

№	Вид цемента и суперпластификатора в нем	Расход материалов, кг/м ³ бетона					R ^c ₂₈ , МПа	Удельный расход цемента на единицу прочности, кг/МПа
		цемент	песок M _к =2,6	щебень из гравия (фракция 5-20 мм)	вода	Melflux 5581F		
1	ЦЕМ I 42,5 Б	420	750	1100	160	0,6	41	10,24
2	ЦНВ-50КБ (Melflux 5581F – 0,6%)				113	-	76	5,52
3	ЦНВ-50КБ (Stachement 2280)				100	-	85	4,94

Таблица 4

Экологические показатели бетонов на разных цементах (составы в табл. 3)

Состав бетона	Вид цемента	Выбросы CO ₂ , кг на 1 т цемента	Выбросы CO ₂ , кг на 1 м ³ бетона	Рейтинг $K_{CO_2}^B = \frac{kgCO_2}{m^3 R_{28}^c}$
1	ЦЕМ I 42,5	828	347,8	$\frac{347,8}{41} = 8,48 \frac{kgCO_2}{m^3 MPa}$
2	ЦНВ-50КБ	414	173,9	$\frac{173,9}{76} = 2,28 \frac{kgCO_2}{m^3 MPa}$
3	ЦНВ-50КБ	414	173,9	$\frac{173,9}{85} = 2,05 \frac{kgCO_2}{m^3 MPa}$

4. Обсуждение

Как видно из табл. 3 бетоны на «карбонатных» ЦНВ при равном содержании минеральных компонентов и суперпластификатора, а также подвижности готовой смеси, имеют значительно меньшую водопотребность, чем на стандартном цементе, в 2 раза большую прочность в 28 суточном возрасте и, соответственно, меньший расход вяжущего на единицу прочности (кг/МПа). Логично, что и «углеродный след» бетона на «карбонатных» ЦНВ оказывается в 4 раза ниже, чем на стандартном цементе, что подтверждается расчетными данными табл. 4.

Следуя логике «экологического рейтинга» Эванса-Муттера [6], для аналогичной оценки конкретной несущей конструкции (и даже целого бетонного объекта) можно удельные выбросы CO₂ в кг на 1 м³ бетона (табл. 4) умножить на расход бетона (м³) в этой конструкции. В этом случае величина кг CO₂ конструкции (бетонного объема) будет обосновано характеризовать её экологический рейтинг.

По мнению авторов, «углеродный след» цемента может быть прослежен и оценен на всех трех этапах его жизненного цикла (от производства самого цемента до строительной конструкции из бетона). На четвертом этапе – утилизации конструкции из цементного бетона, вышедшей из строя или демонтированной, «судьба» цемента будет определяться технологией переработки бетонного лома в щебень [12] или его помолом

для получения гидравлически активного наполнителя – добавки в новый бетон. А это ресурсосбережение – главный показатель циркулярной экономики [13-15], в которой НДТ играет ведущую роль.

Не преминем добавить «ложку дегтя» в экологическую «бочку мёда» (или, наоборот), точнее, в ее «углеродную» часть. Речь о том, действительно ли столь значима роль углекислого газа в «парниковом эффекте», угрожающем нашей планете или это еще одна «бизнес-страшилка» на фоне не вызывающей сомнений «Концепции устойчивого развития», принятой почти всеми государствами в мире в 1992 г. в Рио-де-Жанейро. Опасная роль углекислого газа «вброшена» в мировые СМИ с далеко небескорыстной целью, как, в свое время, «пугало озоновых дыр».

В связи с этим авторы считают уместным процитировать автора книги «Сенсационная история Земли» [16]: «Если до широких масс, наконец, дойдет простейшая мысль о том, что всего одно крупное извержение вулкана выбрасывает в атмосферу гораздо больше углекислого газа, чем выработала вся человеческая индустрия за свою историю, то ограниченному кругу лиц будет куда сложнее набивать себе карманы за чужой счет, торгуя «квотами» на выброс углекислого газа в атмосферу.

А если правительства это поймут..., то перестанут принимать глупые и популистские решения и выбрасывать огромные бюджетные средства на «борьбу с ограничением роста температуры на планете» и, возможно, направят эти деньги на что-то более полезное».

5. Заключение

1. Проанализирована мировая тенденция по оценке влияния парниковых газов, образующихся в результате производственной деятельности человечества, на атмосферу Земли. Показано, что, в зависимости от их негативного воздействия на окружающую среду, вводятся новые экологические критерии для промышленных объектов, например, устанавливаются категории по уровню НВОС. Особое внимание уделяется заводам цементной промышленности, которые вследствие производственной деятельности, выделяют значительные объемы углекислого газа.

2. Разработанные авторами ранее [7, 8] составы и технология получения карбонатных цементов низкой водопотребности, согласно новым экологическим показателям, существенно превосходят общестроительные цементы. Это обеспечивается их низкой клинкероёмкостью, что, соответственно, приводит к меньшим выбросам углекислого газа при производстве ЦНВ. Эти цементы и бетоны на их основе превосходят самые жесткие экологические требования по удельным объемам выброса углекислого газа в атмосферу.

3. Предложена методика расчета «углеродного следа» (выбросов CO₂) бетона, учитывающая содержание клинкера в единице объема бетона и прочность последнего в нормативном возрасте, которая позволяет оценить весь жизненный цикл цемента от его производства до сноса строительной конструкции из бетона на его основе.

Список библиографических ссылок

1. Guynn J., Kline J. Maximizing SCM content of blended cements // IEEF – IAS/PCA Cement Industry Conf. IAS/PCACIC Toronto. 2015. P. 1–15.
2. Клайн Дж. Проектирование цементного завода будущего. Часть II // Цемент и его применение. 2019. № 1. С. 48–53.
3. Schneider M. The cement industry on the way to a low carbon future innovation and technical trends in cement production // Proc. 8th Intern VDZ Congr. 2018 (Duesseldorf, 26-28 September 2018). Düsseldorf. 2018. P. 55–72.
4. Andrew M. R. Global CO₂ emissions from cement production // Earth Syst. Sci. Data. 2017. URL: <https://essd.copernicus.org/articles/10/195/2018> (дата обращения: 15.02.2021). DOI: 10.5194/essd-10-195-2018.
5. Friedlingstein P. et al. Global Carbon Budget 2020 // Earth Syst. Sci. Data. 2020. Vol. 12, P. 3269-3340. URL: <https://essd.copernicus.org/articles/12/3269/2020/> (дата обращения: 15.02.2021). DOI: 10.5194/essd-12-3269-2020.

6. Эванс Л., Муттер М. Экологический рейтинг цемента // Цемент и его применение. 2019. № 4. С. 24–27.
7. Хозин В. Г., Хохлаков О. В., Сибгатуллин И. Р., Гиззатуллин А. Р., Харченко И. Я. «Карбонатные» цементы низкой водопотребности – зеленая альтернатива цементной индустрии России // Строительные материалы. 2014. № 5. С. 76–82.
8. Хозин В. Г., Хохлаков О. В., Низамов Р. К. Карбонатные цементы низкой водопотребности – перспективные вяжущие для цементных бетонов // Бетон и железобетон. 2020. № 1. С. 15–28.
9. Хозин В. Г., Ханифов Ф. М. Стратегия инновационного развития бетонного строительства в Республике Татарстан // БСТ. 2016. № 12. С. 45–47.
10. Низамов Р. К., Хозин В. Г., Никитин Г. П., Ханифов Ф. М. Экономить не цемент в бетоне, а бетон в конструкциях // Стройэкспертиза. Республика Татарстан. 2019. № 5. С. 12–15.
11. Chouksey Sh. Indian cement industry — evolution, growth and future challenges // «АЛИТинформ». International Analytical Review. 2017. № 1. P. 4–10.
12. Красникова Н. М., Кириллова Е. В., Хозин В. Г. Вторичное использование бетонного лома в качестве сырьевых компонентов цементных бетонов // Строительные материалы. 2020. № 1-2. С. 56–65.
13. Александрова В. Д. Современная концепция циркулярной экономики // International Journal of Humanities and Natural Sciences. 2019. Vol. 5-1. P. 87–93.
14. Gureva M. A. The theoretical basis of the concept of circular economy // Journal of international economic affairs. 2019. № 3. P. 2311–2336. DOI: 10.18334/eo.9.3.40990.
15. Пахомова Н. В., Рихтер К. К., Ветрова М. А. Переход к циркулярной экономике и замкнутым цепям поставок как фактор устойчивого развития // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. 2017. № 5. С. 244–268. DOI: 10.21638/11701/spbu05.2017.203.
16. Скляр А. Ю. Сенсационная история Земли. Сколько на самом деле лет нашей планете? М. : Вече, 2012. 256 с.

Khozin Vadim Grigorievich

doctor of technical sciences, professor

Email: khozin.vadim@yandex.ru

Khokhryakov Oleg Viktorovich

candidate of technical sciences, associate professor

Email: olvik@list.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Kozlov Roman Vladimirovich

head of design and survey department

Email: kozlov-roman@bk.ru

JSC «Tatar Special Scientific and Restoration Department»

The organization address: 420095, Russia, Kazan, Vosstaniya st. 100, b. 209

The environmental rating of «carbonate» cements is low water demand and concrete based on them**Abstract**

Problem statement. To evaluate «carbonate» cements of low water demand and concretes based on them according to environmental indicators, calculated by the clinker capacity of binders.

Results. Developed by the authors «carbonate» cements of low water demand with a clinker content of 20 to 70 % surpass standard cements in all technical parameters and can replace them in the production of concrete, while having the lowest «carbon footprint», assessed by the environmental rating proposed by L. Evans and M. Mutter. It is proposed to consider the environmental rating not only for cement, but also for cement concrete and structures made of it, covering their entire life cycle up to the stage of disposal of the dismantled object. The ecological

index K^{CO_2} of «carbonate» cements of low water demand was calculated and it was shown that in comparison with European cements, also containing limestone additives, it is 2 times lower.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry is to substantiate the use of «carbonate» cements of low water demand, as having the lowest content of cement clinker, which meets the most stringent environmental requirements for carbon dioxide emissions into the atmosphere.

Keywords: «carbonate» cements of low water demand, environmental rating, CO_2 emissions, concrete, cement.

For citation: Khozin V. G., Khokhryakov O. V., Kozlov R. V. The environmental rating of «carbonate» cements is low water demand and concrete based on them // *Izvestija KGASU*. 2021. № 2 (56). P. 60–66. DOI: 10.52409/20731523_2021_2_60.

References

1. Guynn J., Kline J. Maximizing SCM content of blended cements // IEEF – IAS/PCA Cement Industry Conf. IAS/PCACIC Toronto. 2015. P. 1–15.
2. Kline J. Designing a cement plant of the future. Part II // *Cement and its application*. 2019. № 1. P. 48–53.
3. Schneider M. The cement industry on the way to a low carbon future innovation and technical trends in cement production // *Proc. 8th Intern VDZ Congr. 2018 (Duesseldorf, 26-28 September 2018)*. Düsseldorf. 2018. P. 55–72.
4. Andrew M.R. Global CO_2 emissions from cement production // *Earth Syst. Sci. Data*. 2017. URL: <https://essd.copernicus.org/articles/10/195/2018> (reference date: 15.02.2021). DOI: 10.5194/essd-10-195-2018.
5. Friedlingstein P. et al. Global Carbon Budget 2020 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2020. Vol. 12, P. 3269–3340. URL: <https://essd.copernicus.org/articles/12/3269/2020/> (reference date: 15.02.2021). DOI: 10.5194/essd-12-3269-2020.
6. Evans L., Mutter M. Ecological rating of cement // *Cement and its application*. 2019. № 4. P. 24–27.
7. Khozin V. G., Khokhryakov O. V., Sibgatullin I. R., Gizzatullin A. R., Kharchenko I. Ya. «Carbonate» cements of low water demand – a green alternative to the cement industry in Russia // *Stroitelnye materialy*. 2014. № 5. P. 76–82.
8. Khozin V. G., Khokhryakov O. V., Nizamov R. K. Carbonate cements of low water demand – promising binders for cement concretes // *Beton i zhelezobeton*. 2020. № 1. P. 15–28.
9. Khozin V. G., Khanifov F. M. Strategy of innovative development of concrete construction in the Republic of Tatarstan // *BST*. 2016. № 12. P. 45–47.
10. Nizamov R. K., Khozin V. G., Nikitin G. P., Khanifov F. M. Saving not cement in concrete, but concrete in structures. *Stroyexpertiza*. Republic of Tatarstan. 2019. № 5. P. 12–15.
11. Chouksey Sh. Indian cement industry – evolution, growth and future challenges // «АЛИТинформ». *International Analytical Review*. 2017. № 1. P. 4–10.
12. Krasnikova N. M., Kirillova E. V., Khozin V. G. Recycling of concrete scrap as raw materials for cement concrete // *Stroitelnye materialy*. 2020. № 1-2. P. 56–65.
13. Alexandrova V. D. The modern concept of circular economy // *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2019. Vol. 5-1. P. 87–93.
14. Gureva M. A. The theoretical basis of the concept of circular economy // *Journal of international economic affairs*. 2019. № 3. P. 2311–2336. DOI: 10.18334/eo.9.3.40990.
15. Pakhomova N. V., Richter K. K., Vetrova M. A. Transition to a circular economy and closed supply chains as a factor of sustainable development // *Bulletin of Saint Petersburg University. Economy*. 2017. № 5. P. 244–268. DOI: 10.21638/11701/spbu05.2017.203.
16. Sklyarov A. Yu. Sensational history of the Earth. How old is our planet actually? M. : Veche, 2012. 256 p.