

УДК 624.012.45

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ ПОВЫШЕННОЙ АГРЕССИВНОСТИ СРЕДЫ

М.И. Ткачева, А.А. Васильев

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь

e-mail: ritko4ka@gmail.com; alex.vas.62@mail.ru

Проанализированы наиболее распространенные эксплуатационные условия железобетонных элементов и конструкций, выявлена среда с повышенной агрессивностью. Проведено исследование изменения глубины повреждения коррозией стальной арматуры в железобетонных элементах классов бетонов по прочности на сжатие C12/15 – C50/60 для различных толщин защитного слоя бетона с использованием расчетного содержания цемента вышеуказанных бетонов для эксплуатационной среды с повышенной агрессивностью.

Ключевые слова: карбонизация бетона, коррозия стальной арматуры, прогнозирование коррозии.

PREDICTION OF CORROSION DAMAGE OF STEEL REINFORCEMENT FOR OPERATIONAL CONDITIONS OF INCREASED AGGRESSIVENESS OF THE ENVIRONMENT

M. Tkacheva, A. Vasiliev

Belarusian State University of Transport, Gomel, Republic of Belarus

email: ritko4ka@gmail.com; alex.vas.62@mail.ru

The most common operating conditions of reinforced concrete elements and structures are analyzed, and an environment with increased aggressiveness is identified. The study of changes in the depth of corrosion damage to steel reinforcement in reinforced concrete elements of concrete classes in compressive strength C12/15 – C50/60 for various thicknesses of the protective layer of concrete using the calculated cement content of the above-mentioned concretes for an operating environment with increased aggressiveness.

Keywords: concrete carbonation, corrosion of steel reinforcement, corrosion prediction.

Введение. Подавляющая масса железобетонных элементов (ЖБЭ) и конструкций (ЖБК) эксплуатируются в атмосферных средах. В результате воздействия погодных явлений, статических и динамических нагрузок в них самопроизвольно развиваются коррозионные процессы ввиду того, что стальная арматура и цемент являются основными составляющими компонентами ЖБЭ (ЖБК) [4].

Углекислый газ, кислород и вода являются основными агрессивными компонентами воздушной среды, в которой находятся эксплуатируемые ЖБЭ (ЖБК), причем содержание двуокиси углерода в атмосфере в 10^2 – 10^4 раз превышает содержание других кислых газов. Химическая реакция между углекислым газом и цементом влечет за собой развитие карбонизации бетона, что способствует потере целостности защитного слоя и снижению его пассивирующих свойств по отношению к рабочей стальной арматуре. Эти процессы ускоряют разрушение стальной арматуры, давая к ней доступ воды и кислорода, содержащиеся в окружающей среде. С течением времени бетон и арматура теряют свои первоначальные характеристики, снижая несущую способности ЖБЭ (ЖБК) и провоцируя возникновение аварийных ситуаций.

На сегодняшний день большинство строительных конструкций из железобетона эксплуатируются в условиях общественной, производственной, жилой, сельскохозяйственной

постройки или в условиях открытой воздушной среды. Исключая атмосферные условия производств с агрессивной средой, то к условиям повышенной агрессивности относятся те здания, которые построены без каких-либо ограждающих конструкций (условия открытой атмосферы) и для нужд сельского хозяйства (условия сельскохозяйственных помещений и зданий).

Определяющими факторами при нахождении ЖБЭ (ЖБК) в условиях открытой атмосферы являются: перепады температур, количество осадков, влажность воздуха и его состав. Важным также является то, что в последние десятилетия происходят изменения климата: рост среднегодовых, особенно зимних, температур, уменьшение континентальности климата в целом.

К основным характеристикам условиям эксплуатации сельскохозяйственных помещений относятся: влажность среды, повышенная агрессивность газов (в сравнении с условиями открытой атмосферы), продукты жизнедеятельности животных.

Влажность в сельскохозяйственных помещениях обычно составляет от 50 до 90 %, причем максимальные показатели наблюдаются ближе к полу, в зимнее время содержание влаги в воздухе может достигать 100 %.

Увеличение содержания влаги в воздухе помещения в совокупности с углекислым газом, сероводородом и аммиаком значительно влияют на скорость протекания карбонизации бетона, что влечет за собой истончение защитного слоя и разрушение стальной арматуры коррозионными повреждениями.

Большое влияние на состав воздушной среды в замкнутом пространстве оказывает выдыхаемый животными воздух, который содержит более чем в 100 раз больше углекислого газа и менее чем в 25 % кислорода по сравнению с обычной воздушной средой (условия эксплуатации в открытой атмосфере). Продукты жизнедеятельности животных также являются агрессивными по отношению к железобетону ввиду их состава и водородного показателя.

По результатам обследований [1] различных типов зданий, находящихся в условиях открытой атмосферы (А) и сельскохозяйственных зданий (СХ) получены следующие значения коррозионных повреждений бетона и (или) стальной арматуры ЖБЭ:

Плиты покрытия (А) при эксплуатации в течение 20 лет – до 52,3 %.

Плиты покрытия (СХ) при эксплуатации в течение 20 лет – до 69,7 %.

Стеновые панели (А) при эксплуатации в течение 20 лет – до 42,5 %.

Стеновые панели (СХ) при эксплуатации в течение 20 лет – до 55,4 %.

Данные показывают, что из двух рассмотренных сред эксплуатации ЖБЭ (ЖБК) наиболее агрессивной можно считать условия сельскохозяйственных зданий. Результаты исследований развития коррозионных повреждений стальных арматурных стержней в ЖБЭ (ЖБК), эксплуатируемых на открытом воздухе приведено в [3].

Экспериментальная часть. Для прогнозирования развития коррозионных процессов в стальной арматуре в ЖБЭ (ЖБК), находящихся в условиях сельскохозяйственных зданий при ускоренной карбонизации использованы данные натурных обследований. На их основе получены зависимости, отображающие процесс развития карбонизации бетона во времени, что дало возможность получить, регрессионные зависимости состояния стальной арматуры от степени карбонизации в зоне расположения рабочих стержней арматуры. Полученная зависимость скорости коррозии стальной арматуры в ЖБЭ с толщиной защитного слоя 10-25 мм для бетонов классов по прочности на сжатие $C_{12/15}$ – $C_{30/37}$ имеет вид:

$$h(t) = \alpha_0 (1 - \exp(-\alpha_1 t)), \quad (1)$$

где h – глубина повреждения коррозией стальной арматуры, мм;
 t – срок эксплуатации ЖБЭ (ЖБК), год;

α_0 и α_1 – коэффициенты, определяющие: предельную скорость коррозионных повреждений стальной арматуры при $t=\infty$ (α_0) и скорость протекания процесса коррозии (α_1).

Данная зависимость применима только для конкретных величин защитного слоя бетона (10; 15; 20 и 25 мм), что является недостаточным для использования на практике ввиду колебаний этой величины от элемента к элементу. Используя методы регрессионного анализа на основе диаграммам рассеивания $\alpha_0(s)$ и $\alpha_1(s)$ выявлено, что наиболее эффективными для описывания искомых параметров являются аппроксимирующиеся уравнения гипербол.

После обработки данные, выявлена зависимость глубины стальной арматуры для любой величины защитного слоя бетона (применимо для бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12/15}$ – $C^{30/37}$):

$$h(t,s) = \left(b_0 + \frac{b_1}{s} \right) \left\{ 1 - \exp \left[- \left(c_0 + \frac{c_1}{s} \right) t \right] \right\}, \quad (2)$$

где b_0, b_1, c_0, c_1 – коэффициенты, характеризующие класс бетона по прочности на сжатие; s – величина защитного слоя бетона, мм

Значения коэффициентов b_0, b_1, c_0, c_1 для бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12/15}$ – $C^{30/37}$ для ЖБЭ (ЖБК), используемых в условиях сельского хозяйства при ускоренной карбонизации (таблица 1) посчитаны методом наименьших квадратов в разделе “Simple regression” пакета “Statgraphics Centurion”, а также путем сопоставления кривых, полученных на основе формул 1 и 2.

Таблица 1. – Значения коэффициентов b_0, b_1, c_0, c_1

Класс бетона по прочности на сжатие	Коэффициент			
	b_0	b_1	c_0	c_1
$C^{12/15}$	-1,247800	43,577000	0,009499	0,215317
$C^{16/20}$	-0,808717	26,605600	-0,005199	0,400697
$C^{18/22,5}$	-0,798508	24,191108	-0,004122	0,395593
$C^{20/25}$	-0,795845	23,519160	-0,003894	0,306293
$C^{22/27,5}$	-0,819245	22,646950	-0,011522	0,398540
$C^{25/30}$	-0,770146	20,961260	-0,008970	0,350462
$C^{28/35}$	-0,613990	16,556498	-0,008175	0,316880
$C^{30/37}$	-0,614562	16,023775	-0,010570	0,332214

На рисунке 1 в качестве примера показаны регрессионные зависимости изменения глубины разрушения коррозией стальных рабочих стержней ЖБЭ (ЖБК) во времени, величина защитного слоя – 10 мм, классы бетонов по прочности на сжатие $C^{12/15}$ – $C^{30/37}$.

Используя зависимость (1) могут быть получены регрессионные зависимости при любой величине защитного слоя. Полученные зависимости наглядно показывают, что глубина повреждения коррозией стали в составе ЖБЭ (ЖБК) носит экспоненциальный характер и скорость развития коррозионных процессов для одного класса бетона по прочности на сжатие разительно отличается при тех же исходных данных для другого.

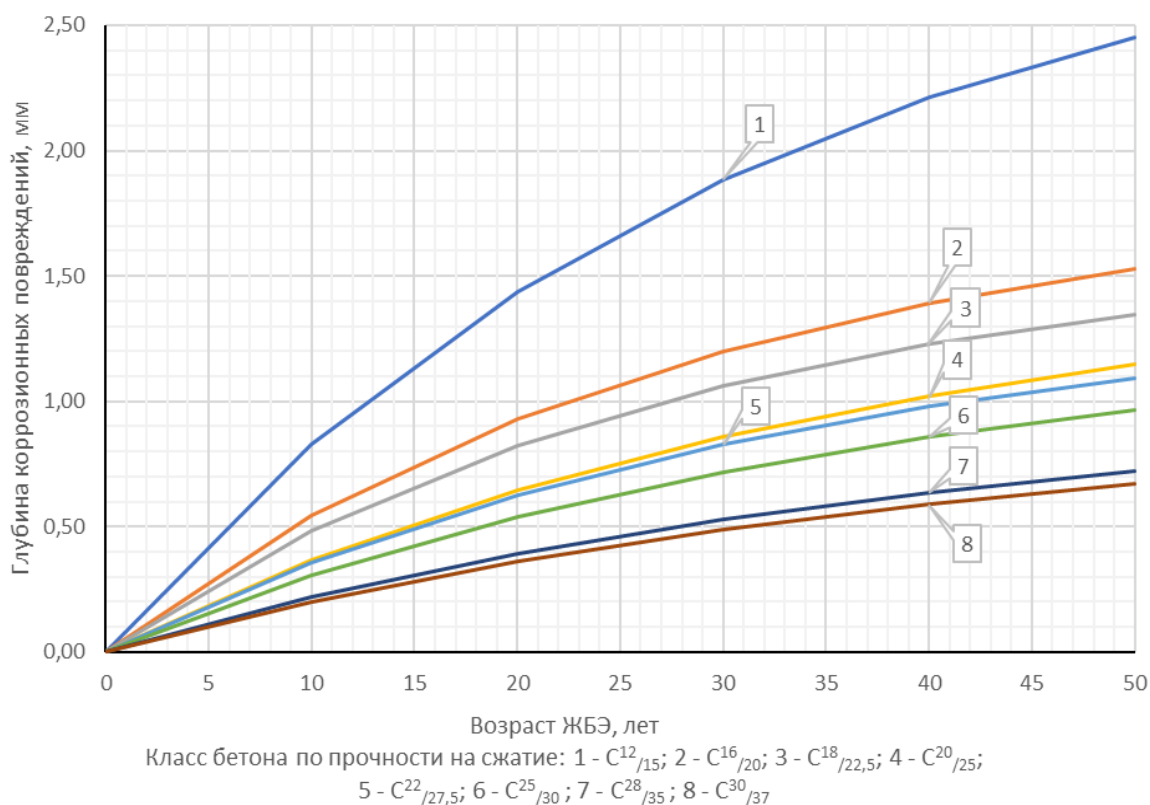


Рисунок 1. – Регрессионные зависимости изменения глубины поврежденности стальных арматурных стержней коррозией во времени (защитный слой бетона – 10 мм; исследуемые классы бетонов по прочности на сжатие C¹²_{/15} – C³⁰_{/37}; эксплуатационные условия – сельскохозяйственные здания при ускоренной карбонизации)

Для дальнейшего прогнозирования фактора коррозии стальных арматурных стержней в зависимости от величины защитного слоя для бетонов классов по прочности на сжатие выше C³⁰_{/37} в условиях эксплуатации сельскохозяйственной постройки при ускоренной карбонизации данных обследований ЖБЭ (ЖБК), находящихся в эксплуатации, недостаточно. Это связано с тем, что практика использования подобных бетонов только набирает популярность, поэтому наиболее корректным показателем, характеризующим тот или иной бетон, является содержание цемента в нем.

Количество цемента, используемое в составе бетона (применяемо для конкретного класса по прочности на сжатие), колеблется в пределах 35 %, это связано с требованиями, предъявляемыми маркам по удобоукладываемости П1 – П5. Использование среднего значения содержания цемента является некорректным ввиду неравномерности частоты использования вышеуказанных марок по удобоукладываемости.

За расчетное содержание цемента приняты показатели для марки по удобоукладываемости П1, с осадкой конуса 4 см, как наиболее распространенных [2, 5], данные расчетного содержания цемента приведены в таблице 2.

Расчет глубины повреждения коррозией стальных арматурных стержней для конкретной величины защитного слоя для бетонов классов по прочности на сжатие C³²_{/40} – C⁵⁰_{/60} производился путем сопоставления величин $h(t,s)$ и $C_{p, П1}$ для бетонов классов по прочности на сжатие C¹²_{/15} – C³⁰_{/37} с последующим прогнозом кривых в диапазоне $C_{p, П1} = 213...774 \text{ кг/м}^3$.

Таблица 2. – Значения расчетного содержания цемента

Класс бетона по прочности на сжатие	C_p п1 (расчетное содержание цемента), кг/м ³	Класс бетона по прочности на сжатие	C_p п1 (расчетное содержание цемента), кг/м ³
C ¹² / ₁₅	213		
C ¹⁶ / ₂₀	275	C ³⁰ / ₃₇	490
C ¹⁸ / _{22,5}	305	C ³² / ₄₀	529
C ²⁰ / ₂₅	334	C ³⁵ / ₄₅	592
C ²² / _{27,5}	365	C ⁴⁰ / ₅₀	654
C ²⁵ / ₃₀	397	C ⁴⁵ / ₅₅	714
C ²⁸ / ₃₅	464	C ⁵⁰ / ₆₀	774

На рисунке 2 приведена зависимость величины поврежденности стальной арматуры коррозионными процессами от расчетного содержания цемента для ЖБЭ (ЖБК), $s = 10$ мм, эксплуатация происходит в условиях сельскохозяйственного использования в течение 50 лет. Диапазон величин расчетного содержания цемента соответствует характеристикам, приведенным в таблице 2,

Зависимости исследуемых бетонов и сроков эксплуатации, требуемые для дальнейшего прогнозирования получены аналогичным образом.

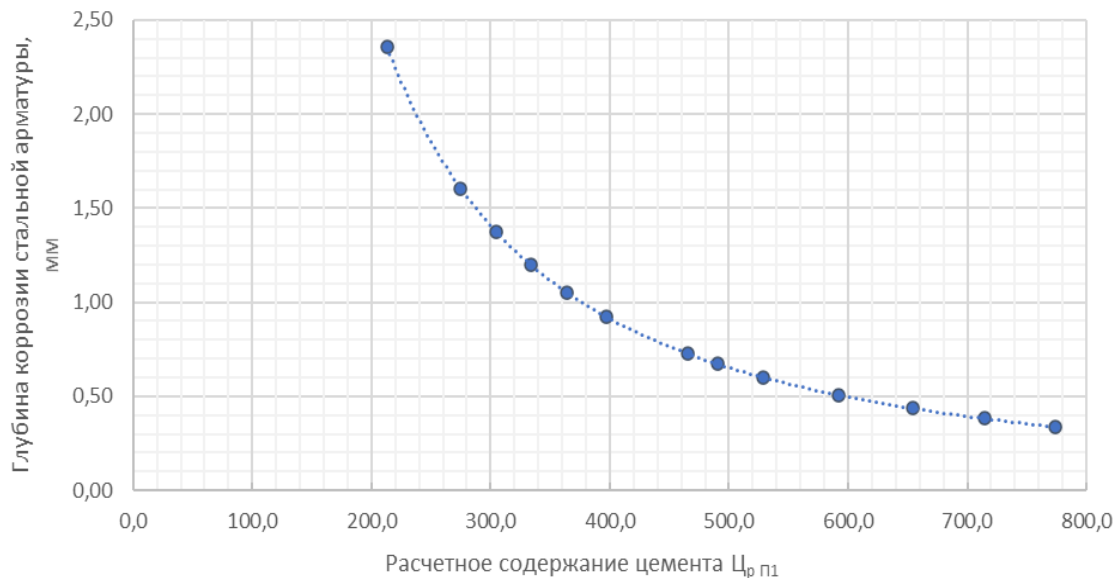


Рисунок 2. – Зависимость изменения глубины поражения коррозией стальных арматурных стержней от расчетного содержания цемента ($s = 10$ мм, эксплуатация происходит в течение 50 лет в условиях сельскохозяйственной постройки при ускоренной карбонизации)

Проведя необходимые расчеты, получены регрессионные зависимости изменения во времени величины поврежденности коррозией стальных рабочих стержней для ЖБЭ (ЖБК) с наиболее распространенными величинами защитного слоя классов бетонов по прочности на сжатие C¹²/₁₅ – C⁵⁰/₆₀ при эксплуатации в условиях сельскохозяйственного использования (ускоренная карбонизация бетона). Зависимости, полученные в результате исследований, для $s = 10$ мм приведены на рисунке 3.

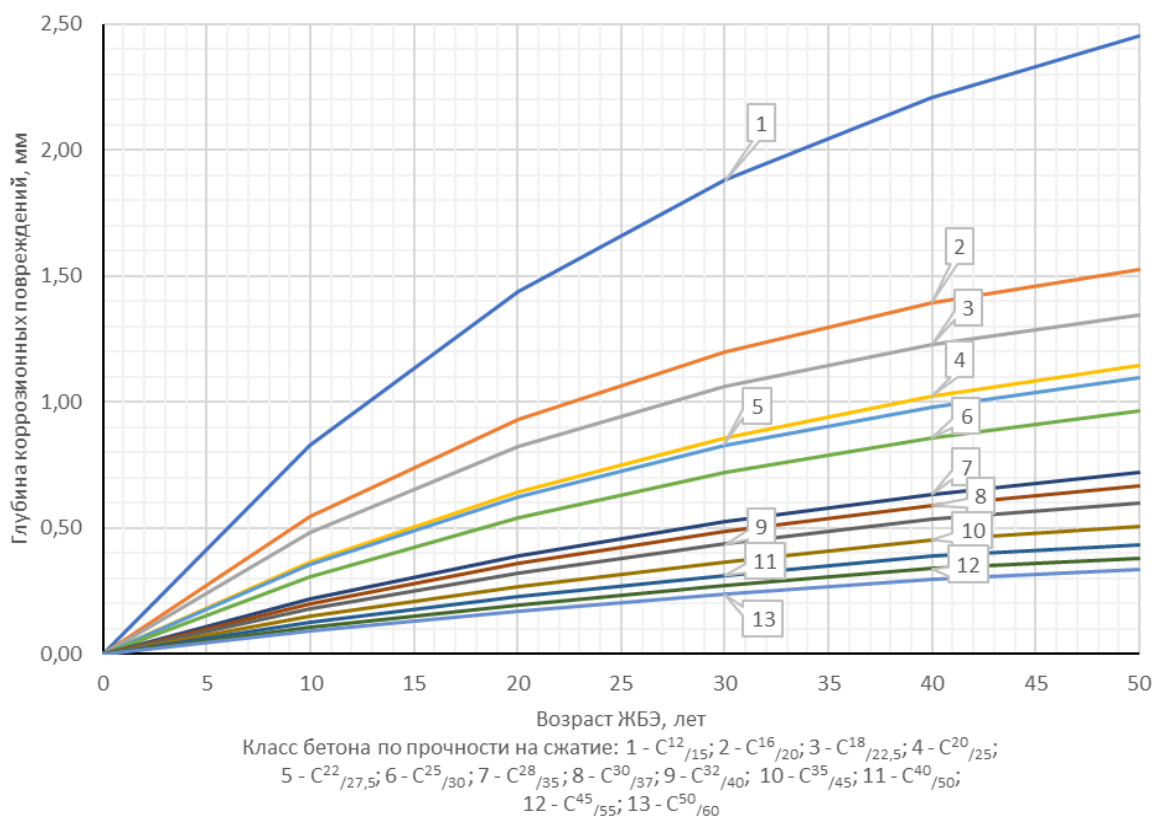


Рисунок 3. – Регрессионные зависимости изменения глубины поврежденности стальных арматурных стержней коррозией во времени (величина защитного слоя бетона – 10 мм; классы бетонов по прочности на сжатие C¹²/₁₅ – C⁵⁰/₆₀ ; эксплуатационные условия – сельскохозяйственная постройка при ускоренной карбонизации)

Заключение. В ходе исследований влияния карбонизации бетона на развитие коррозионных повреждений рабочих стальных арматурных стержней в ЖБЭ (ЖБК) выявлено, что средами с повышенной агрессивностью являются условия эксплуатации на открытом воздухе и сельскохозяйственных зданий. Прогнозирование глубины повреждений коррозионными процессами производилось для условий эксплуатации сельскохозяйственной постройки, как наиболее агрессивной из вышеуказанных. Основываясь на многолетних исследованиях в области карбонизации бетона получены регрессионные зависимости изменения величины коррозии рабочих стальных арматурных стержней во времени от величины защитного слоя бетонов классов по прочности на сжатие C¹²/₁₅ – C⁵⁰/₆₀ во времени.

Полученные зависимости позволяют утверждать, что состояние защитного слоя бетона, его толщина и содержание цемента в составе ЖБЭ (ЖБК) в значительной степени влияют на скорость развития коррозионных процессов в стальной арматуре. Так с увеличением величины защитного слоя и увеличением класса бетона по прочности на сжатие происходит уменьшение скорости развития коррозионных повреждений и наоборот, деградация защитных свойств бетона по отношению к стали в составе железобетона ухудшает его техническое состояние, оказывая существенное влияние на возможный срок эксплуатации объекта.

Дальнейшие исследования вопроса влияния карбонизации на коррозионные процессы стали в составе ЖБЭ (ЖБК) позволят повысить точность проводимых обследований эксплуатируемых зданий и сооружений и расчете их остаточного ресурса, так как разрушение стальной арматуры напрямую влияет на их способность в дальнейшем нести требуемые нагрузки.

Является необходимым продолжить исследования ЖБЭ (ЖБК) связи карбонизации бетона со скоростью коррозии не только в условиях сельскохозяйственных зданий, но и открытой атмосферы, общественных и производственных зданий с неагрессивной средой, а также при использовании в конструкторском решении предварительно напряженной арматуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев, А. А. Оценка и прогнозирование технического состояния железобетонных конструкций с учетом карбонизации бетона / А. А. Васильев. – Гомель : Учреждение образования "Белорусский государственный университет транспорта", 2019. – 215 с. – ISBN 978-985-554-825-7. – EDN PPYMDN.
2. Васильев, А. А. Прогнозирование фактической карбонизации с учетом технологических параметров бетона : Монография / А. А. Васильев, А. М. Нияковский. – Гомель : Белорусский государственный университет транспорта, 2024. – 205 с. – ISBN 978-985-891-159-1. – EDN VDHDDG.
3. Ткачева, М. И., Васильев, А. А. Прогнозирование коррозионных повреждений стальной арматуры железобетонных конструкций очистных сооружений / М. И. Ткачева, А. А. Васильев, - Водоснабжение, химия и прикладная экология : материалы Междунар. В62 науч.-практ. конф. (Гомель, 26 марта 2024 г.) / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Е.Ф. Кудиной – 189с. – ISBN 978-985-891- 168-3.
4. Железобетон в XXI веке: Состояние и перспективы развития бетона и железобетона в Рос-сии / Госстрой России; НИИЖБ.–М.: Готика, 2001.– 684 с.
5. Агеева, К. Э. Определение расчетного содержания цемента бетона класса по прочности на сжатие с30/37 / К. Э. Агеева, Ю. К. Кабышева, М. И. Ткачева // Лучшая исследовательская статья 2024 : сборник статей VII Международного научно-исследовательского конкурса, Пенза, 30 июня 2024 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2024. – С. 13-16. – EDN DULDOT.