

ПЕНОБЕТОННЫЕ ДОМА НА ЛЕГКОМЕТАЛЛИЧЕСКОМ КАРКАСЕ

В.П. Вылегжанин

К.т.н., директор Центра ячеистых бетонов

В.А. Пинскер

К.т.н., научный руководитель Центра ячеистых бетонов

А.А. Шухардин

Генеральный директор ООО «Андромета»

А.Б. Акопян

Технический директор ООО «Андромета»

Ячеистый бетон является одним из наиболее перспективных материалов XXI века, производство которого в РФ растет с каждым годом. Он характеризуется экономичностью, долговечностью, огнестойкостью, экологичностью и хорошей теплоизоляцией на уровне эффективных теплоизоляционных материалов, но без их недостатков (токсичности, горючести, сминаемости, рассыпаемости, гигроскопичности, окислительной деструкции).

Более 15 лет тому назад были запроектированы, испытаны на фрагментах и построены жилые дома коттеджного типа из монолитного пенобетона в опалубке из сборного тяжелого пенобетона (поризованного бетона). Монолитный пенобетон имел марку по плотности D400 – D500, класс по прочности на сжатие B1 – B1,5. Несъемная опалубка из плит размером 600*300*40 имела D1000 – D1200, B3,5 – B5, будучи скреплена монолитным пенобетоном, выполняет несущие функции. Стены толщиной 40 см имеют сопротивление теплопередаче более 3 Вт·К/м², что удовлетворяет требованиям теплозащиты для Санкт-Петербурга и Москвы. Стоимость 1 м² стены составила 30 USD, а 1 м² общей площади домов 200 USD (с внешними сетями и благоустройством) по состоянию на 1999 год. Эти дома показали хорошие эксплуатационные свойства [1], [2].

В настоящее время марка по плотности монолитного пенобетона снижена до D200, и стены могут быть вдвое тоньше при той же теплозащите. При повышении этажности жилых домов несущей способности несъемной опалубки становится недостаточно. В этом случае ее могут заменить легкие листовые материалы (ЦСП, гидрофобные ГВП, сайдинг, асбоцемент, водостойкая фанера и т.д.). В качестве несущего элемента может быть гибкая или жесткая арматура, железобетонные линейные элементы, импрегнированная древесина, бамбук, широко применяемый на Востоке.

Одним из вариантов жесткой арматуры являются легкие металлические конструкции (ЛМК), собираемые из тонкостенных холодногнутых профилей, изготовленных из листового оцинкованного листа толщиной от 0,5 до 3 мм. Недосток таких сооружений – малая долговечность и огнестойкость, неустойчивость местная (сминаемость) и общая, отсутствие тепло- и звукозащиты.

Применение же ЛМК в качестве несущего каркаса стен, перекрытий, покрытий в монолитном пенобетоне позволяет решить следующие проблемы: теплозащита, долговечность (коррозионная стойкость), пожаростойкость, распорность (устойчивость местная и общая), звукоизоляция, сейсмостойкость, энергоэффективность, экологичность, экономичность.

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЛМК В ПЕНОБЕТОНЕ

Жилые, общественные и производственные здания, построенные из ЛМК в пенобетоне, должны иметь обеспечение по долговечности конструкций в обычных условиях эксплуатации согласно ГОСТ Р54257-2010 не менее 50 лет. Поэтому вопросу долговечности следует уделить особое внимание.

Долговечность ЛМК в таких конструкциях определяется стойкостью к коррозии оцинкованной стали в пенобетоне, которая зависит от химических и электрохимических процессов, происходящих на границе контакта цинкового покрытия и пенобетона, а также от технологии изготовления и условий эксплуатации конструкции.

Долговечность ЛМК с антикоррозионным цинковым покрытием в пенобетоне определяется следующими процессами.

1. Цинковое покрытие кислородо- и водонепроницаемо, что предотвращает влияние на электрохимическую коррозию неоднородности состава стали и характера ее обработки. Кроме того, цинк, обладая большим электрическим потенциалом и защищая сталь, выступает в этом случае катодом и этот вид защиты называется катодным. Энергия выхода электрона из цинка составляет 4,22-4,27 эВ, а из железа 4,71 эВ. Это указывает на большое количество электронов, выделяющихся и взаимодействующих с оксидантами, обеспечивая тем самым электронную защиту стали и спасая ее от коррозии.

2. В пенобетоне изменяется pH (щелочность), начиная с момента его укладки и во время дальнейшей эксплуатации конструкции. В свежесуложенном пенобетоне, изготовленном на портландцементе, величина $\text{pH} > 12$, что соответствует щелочной среде, и в процессе схватывания pH быстро снижается и в дальнейшем в процессе эксплуатации величина pH колеблется в пределах 9,5 – 11. Известно, что цинковое покрытие устойчиво к коррозии в щелочной среде при изменении pH в этом диапазоне. Его термодинамическая неустойчивость прекращается при $\text{pH} < 12$. При снижении $\text{pH} < 11$ он становится термодинамически устойчив, т.к. химические реакции приводят к образованию малорастворимых комплексов $[\text{Zn}(\text{OH})_3]\text{Na}$, $\text{Ca}[\text{Zn}(\text{OH})_3]_2$ [3, 4, 5]. Степень стойкости цинкового покрытия в зависимости от pH хорошо демонстрируется диаграммой (рисунок 1) [6].



Рисунок 1 – Степень стойкости цинкового покрытия в зависимости от pH

Из диаграммы следует, что при pH 9-11 разрушение цинкового покрытия близко к малым величинам, которые можно принять равным 0,1-0,3 мкм/год. Это подтверждается исследованиями скорости коррозии в атмосфере Москвы в конструкциях из ячеистого бетона, армированных оцинкованной горячим способом арматурой при толщине защитного слоя 15 мм с раскрытием трещин 0,2 – 0,5 мм. Скорость коррозии в такой арматуре в конструкции с трещинами составила 0 – 0,5 мкм/год (в среднем 0,2 – 0,3 мкм/год) [7].

3. Влажность пенобетона в процессе эксплуатации здания убывает. Наиболее интенсивно коррозия протекает при влажности бетона 30 % по массе. В меньшей степени арматура корродирует при влажности бетона 40 % по массе. В этом случае ввиду избытка воды в порах бетона затруднен доступ кислорода воздуха к металлу. Еще более замедляется коррозия при влажности бетона 5 – 10 % по массе. В этом случае причиной замедления коррозии является недостаточная влажность. При влажности ячеистого бетона 5 % по объему (10 % по массе для бетона плотностью 500 кг/м^3) коррозия арматуры после начальной фазы стабилизируется к 6-месячному сроку и в дальнейшем не развивается, т.к. прекращается электрохимический процесс из-за структурирования воды.

Следовательно, вторым мероприятием, предупреждающим развитие коррозии арматуры, является такая защита фасадной поверхности панелей, которая предотвратит увлажнение бетона в

зоне, окружающей металл, сверх указанных величин. Такая защита может достигаться при использовании отделок, имеющих повышенную водонепроницаемость. Предел допустимого увеличения влажности бетона в зоне, окружающей арматуру, - 5% по объему регламентирован нормами СН 277-80 [9]. Он установлен по результатам опытов с ячеистыми бетонами на основе песка. Абсолютная удельная поверхность этих бетонов такова, что при влажности менее 5 – 8 % по объему большая часть влаги распределена по поверхности твердой фазы полимолекулярным слоем, подвижность молекул воды в котором ограничена и обычное протекание процессов электрохимической коррозии затруднено. С изменением абсолютной удельной поверхности должна изменяться и влажность бетона, при которой коррозия не развивается. В зависимости от вида сырья и технологии производства ячеистые бетоны могут иметь различную удельную поверхность и различное содержание влаги в полимолекулярных слоях при одинаковом общем уровне влажности, и наоборот, одинаковой толщине полимолекулярных слоев воды бетонов с различной удельной поверхностью будет соответствовать разный уровень влажности.

4. Величина защитного слоя ЛМК из пенобетона должна быть в армированных ячеистобетонных конструкциях согласно ГОСТ 11118-2010 не менее 25 мм. В наружных стенах из ЛМК, пенобетона и ЦСП он составляет 32 мм (12 мм ЦСП + 20 мм пенобетона).

Стена из пенобетона и ЛМК выполнена в несъемной опалубке из водостойкой ЦСП толщиной 12 мм. Этот плотный (до 1000 кг/м³) листовая материал с наружной и внутренней стороны стены не имеет трещин, что обеспечивает защиту от свободного проникновения атмосферных осадков внутрь стены. Трещины с наружной и внутренней стороны отсутствуют.

На фрагменте конструкции стены с ЛМК в пенобетоне D300 и ЦСП исследовался процесс высыхания пенобетона. Определялась влажность пенобетона по ГОСТ в изъятых из фрагмента образцах.

Влажность пенобетона в течение 3-х месяцев с начала заливки достигла 40 %, через 6 месяцев – 15 %. Далее пенобетон в стене здания в процессе его эксплуатации высыхает в течение 1-1,5 лет и достигает равновесной влажности 5-8 %. В дальнейшем она может снизиться до 4 %.

Из приведенных выше условий эксплуатации ЛМК в пенобетоне с ЦСП при низкой влажности и в щелочной среде следует, что пенобетон и ЦСП являются дополнительной защитой ЛМК от коррозии.

У ЛМК цинковое покрытие классом 275 имеет толщину 20 мкм (ГОСТ Р 52246-2004). При средней величине его коррозии 0,25 мкм/год долговечность ЛМК, исходя только из стойкости антикоррозионной цинковой защиты с учетом отсутствия трещин, будет не менее 80 лет. Поскольку низкоуглеродистая сталь, применяемая для изготовления ЛМК, в щелочной пенобетонной среде обладает хорошей коррозионной устойчивостью, это дополнительно увеличивает срок эксплуатации таких конструкций [8]. Срок службы жилых и общественных зданий определен ГОСТ Р 54257-2010 не менее 50 лет.

В дополнение отметим, что сцепление горячеоцинкованных стальных элементов с бетоном на 5 – 10 % выше, чем неоцинкованных. Следовательно, можно считать, что оцинкованное покрытие не снижает сцепление стальных профилей с пенобетоном.

Из всех видов антикоррозионной защиты железа (меднение, хромирование, никелирование, полуда, эмалирование, хонингование и пр.) оцинковка для пенобетона является наилучшей, т.к. обеспечивает: механическую защиту от оксидантов, высокую адгезию к пенобетону, катодную защиту железа благодаря избыточным электронам цинка, хорошее сцепление цинка с железом.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Теплоаккумулирующие свойства стен здания из ЛМК и пенобетона определяются теплоаккумулирующими свойствами пенобетона. Они характеризуют количество аккумулированного тепла и отношение времени остывания материала t , сек, к аккумулированному им теплу Q , Дж/м²·°С. Чем меньше величина этого отношения, тем быстрее теряет тепло рассматриваемый материал. На рисунке 2 приведены сравнительные показатели, характеризующие теплоаккумулирующие свойства материала.

Из приведенного сравнения следует, что у пенобетона и дерева время остывания стены примерно одинаково и лучше чем у полнотелого кирпича в 4,8 раза, пустотелого в 3 раза. Однако для нагревания пенобетонной стены расходуется тепла меньше, чем стены из дерева примерно в 2 раза.

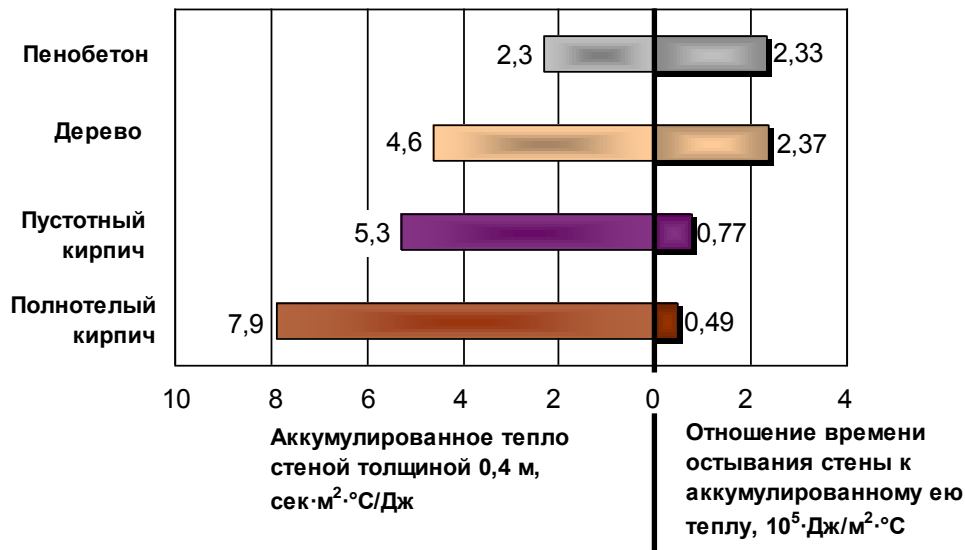


Рисунок 2 – Сравнительные показатели теплоаккумулирующих свойств кирпича, дерева, пенобетона

ПОЖАРОСТОЙКОСТЬ

Пенобетон и ЦСП (СМЛ) являются негоряемыми строительными материалами (НГ), в соответствии ГОСТ 31359, ГОСТ 30244, обладающими низкой теплопроводностью. Это замедляет скорость нагревания ЛМК и потерю прочности пенобетона.

В стенах и перекрытиях ЛМК, выполняющие несущие функции, окружены пенобетоном и снаружи также защищены слоем пенобетона толщиной 20 мм и ЦСП (СМЛ). Испытания по ГОСТ 30247.0-94 и ГОСТ 30247.1-94 на огнестойкость фрагментов стен и перекрытий показали:

- стена несущая толщиной 215 мм, собранная из стального профиля С150х45х1,6 с заполнением пенобетоном D300 в несъемной опалубке из СМЛ толщиной 12,5 мм под равномерно-распределенной нагрузкой 5,88 т/п.м, имеет предел огнестойкости REI 120.
- перекрытие толщиной 328 мм из фермы высотой 250 мм с поясом из профилей С150х45х12х1,6 с заполнением пенобетоном D300 в несъемной опалубке из СМЛ 12,5 мм под равномерно-распределенной нагрузкой 400 кг/м² обладает пределом огнестойкости REI 90. Полученные результаты пределов огнестойкости стен и перекрытий позволяют отнести их к классу пожарной опасности – КО (огнестойкие).

СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ

Здания из ЛМК, имеющие в качестве несущей системы легкие стальные тонкостенные конструкции, способны, как показали расчеты, выдерживать сейсмические нагрузки до 9 баллов по шкале Рихтера. Это объясняется поглощением энергии стальным каркасом здания, в котором для достижения этих свойств применяются еще дополнительные связи, а пенобетон увеличивает их распорность, т.е. устойчивость стенок профилей (общую и местную).

ЭКОЛОГИЧНОСТЬ

Неавтоклавный пенобетон, в который заключен ЛМК, представляет собой пористый каменный материал на минеральных вяжущих.

Несмотря на то, что пенобетон - высокопористый материал (пористость может достигать до 90 %), он не является гигроскопичным. Равновесная влажность пенобетонных стен, по данным многочисленных исследований, находится в пределах 4-5 % по массе, а тот же показатель стен из

сосны и ели 15-20 % (согласно СП 23-101) – в 4 раза выше. При увлажнении пенобетон, в отличие от древесины, быстро высыхает и не коробится. В противоположность кирпичу, пенобетон не «сосет» воду, поскольку капилляры прерываются сферическими порами. Пористость обеспечивает его высокую морозостойкость, т.к. вода, превращаясь в лед и увеличиваясь в объеме, имеет с избытком место для расширения без угрозы разрыва материала. Морозостойкость даже незащищенного пенобетона может во много раз превысить морозостойкость красного, а тем более силикатного кирпича.

Важным свойством стен из пенобетона, характеризующего его как экологичный материал, является высокая паропроницаемость. Это свойство позволяет, как говорят, «дышать» стенам, обеспечивая свободный проход пара и газов (CO , CO_2 , CH_4) из помещений через стену (без ее увлажнения) и обратное поступление (извне) атмосферных отрицательно заряженных аэроионов – дыхательной компоненты воздуха («свежий воздух»).

Например, стена, имеющая толщину, обеспечивающую минимальное нормативное сопротивление теплопередаче $R_{\min} = 1,94 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$, характеризуется паронепроницаемостью (рисунок 3):

- из пенобетона D300 и 2-х слоев ЦСП – $0,98 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мг}$;
- из сосны и ели – $5,3 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мг}$;
- из кирпича (в зависимости от пустотности) на цементном растворе $6,4 \div 13,1 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мг}$.

Если же в кирпичной кладке имеется теплоизолирующая прослойка из пенополистирола или минеральной ваты в полимерной пленке, то паропроницаемость («дыхание») будет еще хуже.

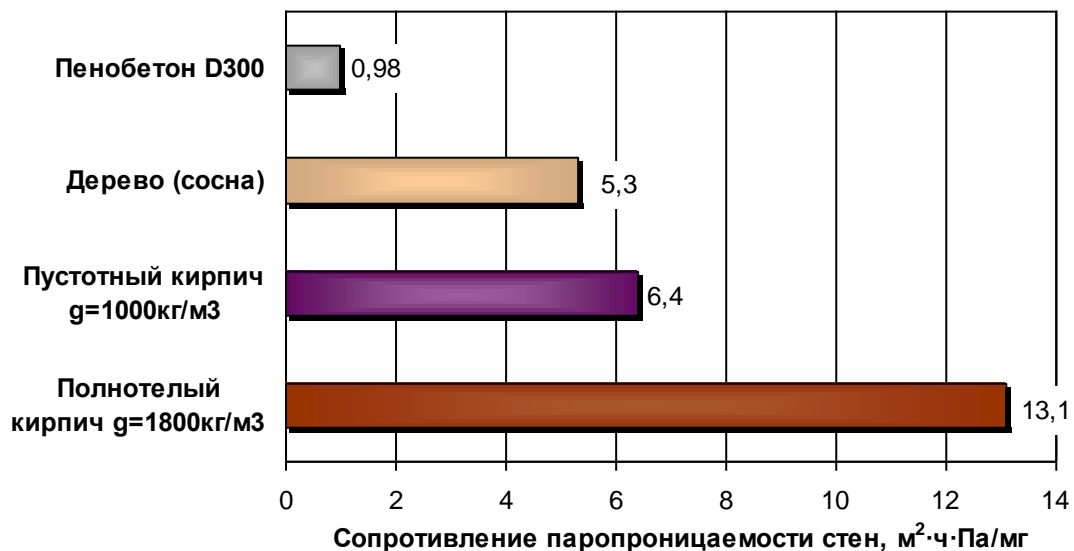


Рисунок 3 – Сравнительные показатели сопротивления паропроницанию стен из пенобетона, дерева, кирпича, имеющих сопротивление теплопередаче $R_{\min}=1,94 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$

По радиоактивности пенобетон относится к I классу (низкий уровень) с приведенным излучением $A_{\text{эфф}}=54 \text{ Бк}/\text{кг}$. Его соседи – дерево, гипс, асбестоцемент. На рисунке 4 приведены сравнительные показатели по радиоактивности других строительных материалов.

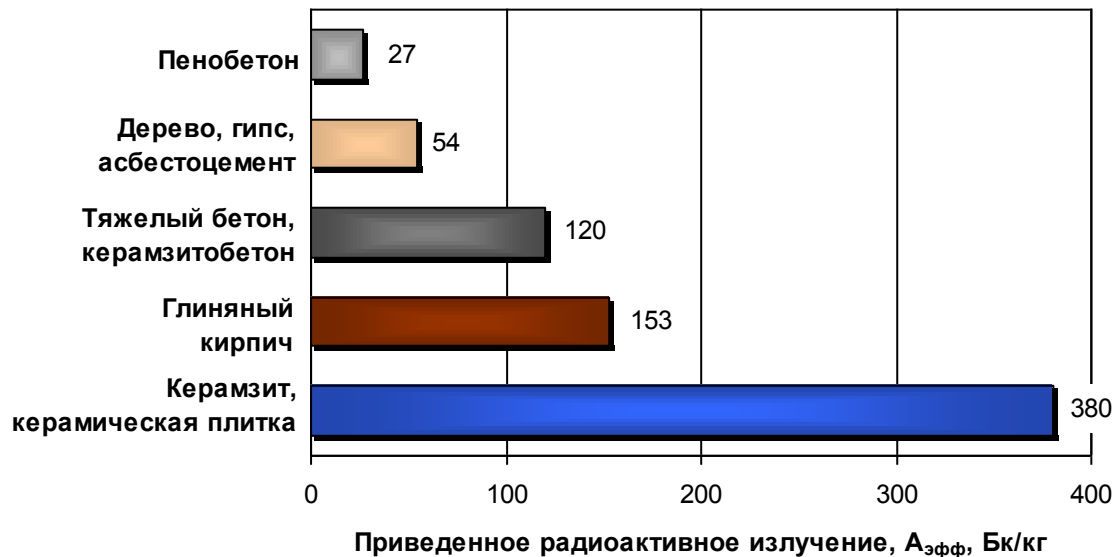


Рисунок 4 – Сравнительный уровень радиоактивности строительных материалов

ЭКОНОМИЧНОСТЬ

Возведение домов из ЛМК, в отличие от обычного строительства из кирпича, газобетонных блоков, деревянного бруса, скорее относится к машиностроительному конструированию и максимально индустриализирует строительный процесс, делает его легко управляемым.

Главным преимуществом применения металлокаркасной технологии по сравнению с традиционными строительными технологиями является понижение трудоемкости и себестоимости строительства, которое достигается благодаря ряду факторов:

- снижение веса конструкций по сравнению с обычно применяемыми технологиями (монолит-бетон, монолит-кирпич, панельное строительство);
- возможность применения легких фундаментов вследствие низкого собственного веса конструкций;
- сокращение сроков строительства в 1.5 – 2 раза из-за возможности вести работы непрерывно (в частности, и во время отверждения бетона, не дожидаясь окончания этого процесса);
- перспективность экономичного строительства в сложных климатических условиях, например – в районах Крайнего Севера (благодаря уменьшению глубины фундаментов по сравнению с традиционной застройкой);
- высокая сейсмостойкость каркасных зданий (до 9 баллов сейсмической нагрузки);
- снижение затрат на строительство за счет сокращения отделочных работ на 30-35%;
- уменьшение приведенных трудозатрат на 1 кв.м возводимого жилья;
- уменьшение общего расхода материалов, необходимых для возведения жилых зданий;
- долговечность, надежность зданий;
- высокие потребительские качества и экологичность зданий.

В таблице приведены сравнительные технико-экономические характеристики каркасного строительства и наиболее широко распространенных технологий жилищного строительства, применяемых в России.

Таблица – Сравнительные характеристики стен здания

Характеристика	Строительство на металлокаркасе	Кирпичное строительство	Монолит-бетон	Панельное строительство
Средний срок строительства 6-этажного дома	4-6 месяцев	10-12 месяцев	8-10 месяцев	6-8 месяцев
Среднее соотношение стоимости строительства	1	2	1,5	1,2
Среднее соотношение стоимости отделочных работ	1	1,5	1,5	1,5
Среднее соотношение приведенных трудозатрат	1	2	1,5	1,2
Среднее соотношение энергозатрат на отопление	1	1,5	1,3	1,3
Возможность легкого фундамента	ДА	НЕТ	НЕТ	НЕТ
Возможность круглогодичного строительства	ДА (при заливке в термооболочку)	НЕТ	НЕТ	НЕТ
Возможность бюджетного строительства в сложных климатических условиях	ДА	НЕТ	НЕТ	НЕТ

Эти дополнительные свойства конструкций из ЛМК расширяют область их применения. Особенно важно, что открывается возможность строить жилые дома, офисные, общественные здания средней этажности (до 6 этажей), т.к. применение долговечного утеплителя, увеличение огне- и коррозионной стойкости ЛМК обеспечивает срок службы здания более 50 лет, что соответствует требованиям ГОСТ 54287.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.П. Вылегжанин, В.А. Пинскер «Стены в XXI веке: какими им быть?» Журнал «Еврострой», №12, 1999.
2. В.П. Вылегжанин, В.А. Пинскер «Стены здания в несъемной опалубке из теплоизоляционного бетона». Сборник докладов Международной научно-практической конференции «Ячеистые бетоны в современном строительстве», Санкт-Петербург, 2004 г.
3. Алексеев С.Н., Стругова Ю.Н. Поведение цинка в твердеющем бетоне на портландцементе//Защита металлов. Т. VII, 1971, №6, С. 421-424
4. Cook H.A. Coating treatment for reinforcing steel. Concrete 11 (1977) 1, pp. 31-33.
5. Bird C.E. The influence of minor constituents in portlandcement on the behaviour of galvanized steel in concrete. Corros. Prev. and Control, 1964, July, pp. 17-21
6. Kreysa G., Schutze M. Corrosion Handbook – Corrosive Agents and their Interaction with Materials, Volume 1-13, 2nd Edition, Wiley-VCH-Verlag Weinheim, 2009.
7. Алексеев С.Н., Иванов Ф.М., Модры С., Шисль П. – Долговечность железобетона в агрессивных средах. Москва, Стройиздат, 1990
8. Холопова Л.И. Коррозия арматуры в автоклавных ячеистых бетонах и способы ее предупреждения. Издательство литературы по строительству. Ленинград, 1965
9. СН 277-80 Инструкция по изготовлению изделий из ячеистого бетона. Москва, Стройиздат, 1981.