

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2023, Том 15, № 6 / 2023, Vol. 15, Iss. 6 <https://esj.today/issue-6-2023.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/07SAVN623.pdf>

2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Сугоняко, И. С. К уточнению механизма физико-химической эрозии лицевого слоя кладки наружных стен жилых домов массового периода строительства в условиях длительной эксплуатации / Сугоняко И. С., Самофеев Н. С. // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 6. — URL: <https://esj.today/PDF/07SAVN623.pdf>

**For citation:**

Sugonyako I.S., Samofeev N.S. Towards clarification of the mechanism of physico-chemical erosion of the facing layer of masonry of external walls of residential buildings of the mass construction period under conditions of long-term operation. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15(6): 07SAVN623. Available at: <https://esj.today/PDF/07SAVN623.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

УДК 666.9.019.3:691.316:692.232.12

**Сугоняко Илья Сергеевич**

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа, Россия  
Институт нефтегазового инжиниринга и цифровых технологий  
E-mail: [Volvita@inbox.ru](mailto:Volvita@inbox.ru)

**Самофеев Никита Святославович**

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа, Россия  
Уфимская высшая школа экономики и управления  
Доцент  
Кандидат технических наук  
E-mail: [volvita@inbox.ru](mailto:volvita@inbox.ru)

## **К уточнению механизма физико-химической эрозии лицевого слоя кладки наружных стен жилых домов массового периода строительства в условиях длительной эксплуатации**

**Аннотация.** В послевоенный период активное развитие получила силикатная отрасль промышленности строительных материалов. С использованием силикатного кирпича возведено более миллиарда квадратных метров комфортного жилья для жителей нашей страны, большое количество социальных объектов, а также различные фонды производственных объектов.

В городах Республики Башкортостан возведен достаточно приличный жилой фонд по старым массовым сериям с использованием силикатного кирпича — порядка 20 млн м<sup>2</sup>, из них только в столице — г. Уфе более 6.

Очевидно, что атмосфера крупных городов более агрессивна по сравнению сельской местностью и материалы каменной кладки наружных стен испытывают целый комплекс физико-химических воздействий от внешней среды. В связи с чем возникает необходимость уточнения модели механизма деструкции элементов кладки наружных стен на основе силикатных материалов, протекающей в естественных условиях длительной эксплуатации.

В работе показаны основные связи работоспособности лицевого слоя силикатной кладки от развития необратимых неравномерных деформаций от усадки и набухания в период замачивания и осушения в летний период в комплексе с замораживания-оттаивания в осенне-весенний период, приводящих к физической эрозии слоев материалов.

Авторами уточняется роль химической коррозии и карбонизации, протекающих в микроструктуре силикатных материалов в условиях действия углекислого газа (и связанной с поровой влагой углекислоты). Показывается влияние роли массопереноса в поровом пространстве поверхностного слоя силикатного кирпича, приводящих в совокупности к образованию высолов на переувлажненных областях кладки стен и их связи с деструктивными процессами при физической эрозии.

Для повышения работоспособности лицевого слоя кладки наружных стен домов массовой постройки, эксплуатирующихся в длительных естественных условиях крупных городов, характерных для средней полосы России, необходимы в первую очередь, комплексные меры по их гидрозащите, ограничивающей попадание влаги в структуру материалов.

**Ключевые слова:** физическая эрозия; карбонизация; силикатный кирпич; наружные стены жилых домов; длительная эксплуатация; механизм деструкции; микроструктура силикатных материалов; углекислотная коррозия

### Актуальность

Активизация жилищного строительства в период восстановления жилого фонда страны в послевоенный период была неразрывно связана с необходимостью применения таких строительных материалов и технологий, которые бы обеспечили одновременно и высокие темпы создания продукции и надежные капитальные объекты с высокими потребительскими свойствами.

Активное использование керамического кирпича скрывалось длительным сроком изготовления керамических изделий, что не позволяло решать поставленную задачу создания большого объема капитальных строений в этот период, в связи с чем, для компенсации этого технологического фактора активное развитие получила отрасль силикатных материалов автоклавного твердения [1]. Это способствовало развитию научно-технических знаний в области производства силикатных строительных материалов.

Жилой фонд страны насчитывает порядка полутора млрд м<sup>2</sup> жилого фонда, построенного в период СССР (с середины 1940-х г. — до 1980-х гг.) по массовым сериям из силикатного кирпича.<sup>1</sup> В том числе в Республике Башкортостан — около 20 млн м<sup>2</sup>, где на столицу — г. Уфа приходится более 6.

Авторами уже предпринималась попытка проанализировать основные факторы физико-химической природы, действующие на ограждающие стеновые конструкции жилых домов на основе силикатного кирпича в долгосрочном периоде эксплуатации [2; 4], характерные для условий крупного промышленного города (г. Уфа). К которым были отнесены: климатические (факторы внешней среды, качество эксплуатации) и силовые воздействия в комплексе с физико-химической коррозией и следами эрозии материалов конструкций лицевых элементов кладки.

Очевидно, что силикатный кирпич и кладочный раствор в силу особенностей их работы в кладке наружной стены будет подвергаться целому комплексу воздействий со стороны внешней среды, таких как замачивание, осушение, температурные изменения, химическому

<sup>1</sup> Статистический сборник: «Капитальное строительство СССР» // Госкомстат СССР. — М.: Финансы и статистика, 1988. — 246 с.

действию различных кислот и газов, растворенных в дождевой воде, абразивному действию ветра и песка и пр.

Также было установлено [4], что атмосферостойкость силикатного кирпича и кладочного раствора в лицевом слое кладки наружных стен жилых домов во многом зависит от структуры и микроструктуры гидросиликатных фаз и пор для силикатного материала и цементного камня.

Известно [5], что основные свойства силикатного кирпича обеспечиваются содержанием гидросиликатных фаз различной основности: высокоосновные обеспечивают атмосферостойкость и морозоустойчивость, а низкоосновные — формируют прочностные (марочные) характеристики и влияют на его долговечность [6].

В связи с тем, что фазовый состав силикатного материала со временем претерпевает изменения [2], было установлено, что деградация основности связана с наличием жидкой фазы и выкристаллизацией карбоната кальция ( $\text{CaCO}_3$ ) из жидкой фазы в поровом пространстве, приводящей к изменению твердой фазы в структуре силикатного материала [3].

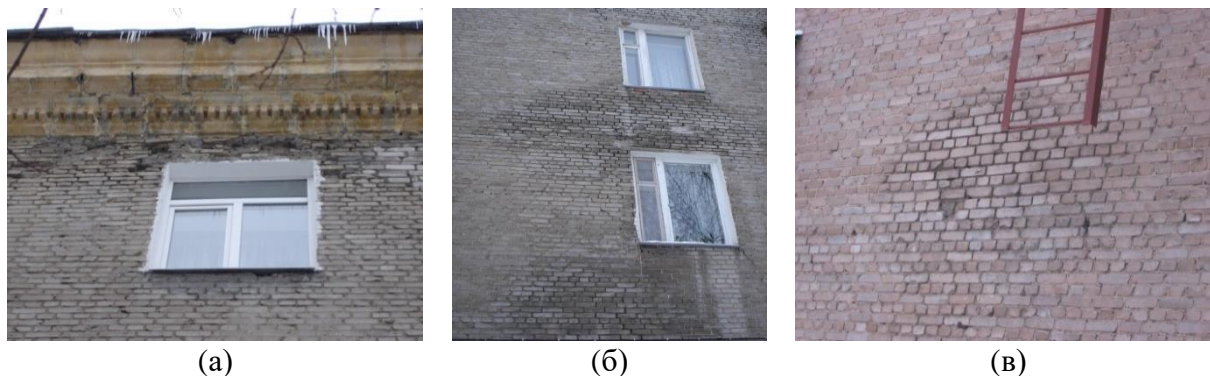
Однако вопрос формирования механизма деструкции силикатного материала в естественных природно-климатических условиях эксплуатации и его особенностей в условиях действия комплекса факторов внешнего воздействия на периодах длительного срока службы изучен не до конца.

С целью уточнения механизма деструкции была сформулирована модель физико-механических изменений структуры элементов кладки с учетом комплекса действия факторов внешней среды в условиях естественной эксплуатации, влияния пор и физико-химических процессов карбонизации.

### Моделирование процессов физической деструкции

Общие процессы механизма деструкции силикатного кирпича и кладочного раствора при физической коррозии и эрозии в естественных условиях эксплуатации можно разделить на два последовательных цикла [7]: попеременное замачивание и осушение (как правило, летний или теплые периоды года), второй — замораживание-оттаивание (холодные периоды года, осенне-весенний годовой цикл).

Деструктивное действие в конструкции наружной стены в первую очередь концентрируется в поверхностном (до 15 мм) и приповерхностном слоях (до 50 мм) кладки. Многолетний характер деструкции этих слоев показан на рисунках 1, 3.

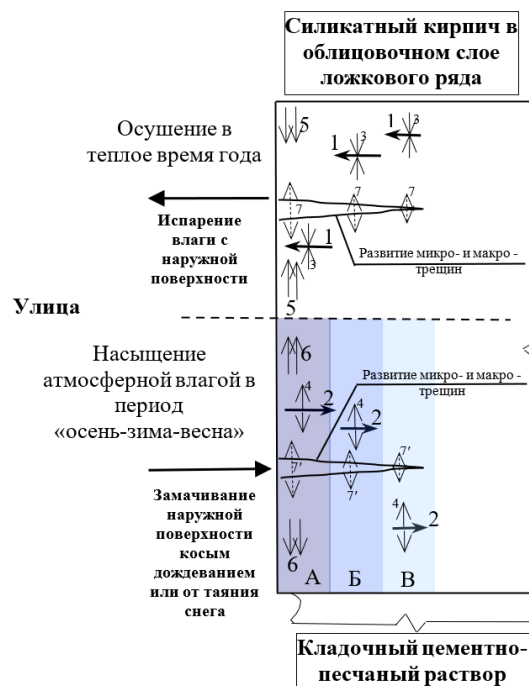


**Рисунок 1.** Примеры выветривания раствора и шелушения поверхности силикатного кирпича в конструкции наружной стены жилого здания: (а) дворовой фасад жилого дома 1942 г. строительства; (б) торец жилого дома 1953 г.; (в) торец жилого дома 1975 г. (подготовлено авторами)

В силу естественности природно-климатических воздействий, невозможно математически или с высокой степенью достоверности описать модель выпадения осадков, солнечной активности, ветра, снега, температурных изменений на 80-летнем периоде эксплуатации домов из силикатного кирпича в крупном городе, авторами сформулирована модель с позиции сопротивления материалов на действия факторов внешней среды.

Общий принцип первого цикла физической коррозии и эрозии поверхностных участков материалов кладки представляет (рис. 2) собой попеременное увлажнение и высушивание наружного поверхностного слоя кирпича и раствора [8].

В связи, с чем возникают неравномерные в объеме деформации от усадки и набухания в силу действия механизмов сорбционного и десорбционного характера [9], сопряженные с силами капиллярного стягивания, приводящих к внутренним локальным напряжениям и структурным повреждениям материалов. Это объясняет требования к влагостойкости материалов, зависящих от количества циклов увлажнения-усадки и их амплитуды [7].



Пояснения к рисунку: 1 — направление миграции десорбционной влаги к наружной (теплой) поверхности; 2 — направление миграции адсорбционной влаги вглубь материала; 3 — напряжения, возникающие в структуре от усадки материала; 4 — напряжения, возникающие в материале от «набухания» влагой; 5 — деформации в объеме материала вследствие усадки; 6 — деформации в объеме материала возникающие вследствие «набухания» от избытка влаги; 7 — деформации в объеме материала, возникающие вследствие сопротивления жестких связей структуры материала усадке; 7' — деформации в объеме материала, возникающие от «набухания» массива выше сорбционной влажности и гидростатического давления льда в поровом пространстве материала; А, Б, В — слои интенсивности глубины промерзания материала в зимнее время года (А — более интенсивный, В — менее)

**Рисунок 2.** Моделирование механизма физической коррозии и эрозии в структуре силикатного материала (подготовлено авторами)

На силу действия этого фактора определенным образом влияет пористость материалов, влажность атмосферного воздуха, количество и интенсивность осадков, количество солнечных дней в году, а также ветер.

В осенне-весенний периоды года к процессам усадки и набухания подключаются процессы замораживания и оттаивания приповерхностных и поверхностных слоев каменной кладки, в первых более активно.

При попеременных температурных переходах через  $0^{\circ}\text{C}$  влажная среда поверхностного слоя кирпича и кладочного раствора претерпевает фазовое изменение с увеличением объема (до 9 %). Твердая фаза испытывает давление ото льда и гидростатическое давление не замерзшей воды, но захваченной льдом, не давая ей перейти в резервные поры [7].

Особенностью описанного механизма является то, что он реализуется многократными повторными воздействиями с необратимым накоплением повреждений в совокупности циклов «намокания-замораживания-оттаивания» на длительном периоде эксплуатации в естественных условиях среды. И проявляется полной деструкцией микроструктуры, в первую очередь, поверхностного слоя (рис. 3), как в материале кирпича, так и цементного раствора в кладке наружной стены и характеризуется для неё общим снижением прочности, эстетичности, атмосферостойкости и деградацией работоспособности лицевого слоя, снижением площади эффективного сечения.



**Рисунок 3.** Физическая коррозия и эрозия кладки наружных стен жилых домов: (а) жилой дом 1942 г. (глубина до 8–10 мм); (б) жилой дом 1965 г. (глубина до 3–4 мм) (подготовлено авторами)

### Влияние химической коррозии, карбонизации и пор

Как уже было показано ранее в структуре материалов действует комплекс химических реакций [2; 3; 9], включающий карбонизацию (в силу специфичности минералогического состава силикатного кирпича и кладочного раствора) и химических реакций коррозии от агрессивных газовых и жидких сред атмосферы (особенно в крупных городах (от выхлопа транспорта, выбросов промышленных предприятий, парникового эффекта и пр.)). В целом, способность восприятия таких воздействий строительными материалами обуславливает их химическая стойкость.

Наиболее существенное влияние на карбонизационные процессы в условиях естественной эксплуатации оказывает углекислый газ, в определенной мере присутствующий в атмосфере городов (при этом в сельской местности его содержание в атмосфере может достигать до  $600 \text{ мг/м}^3$ , а в условиях крупных городов может повышаться до 10–15 раз).

Влияние минералогического состава силикатного кирпича и кладочного раствора, использовавшихся в кладке наружных стен при массовом серийном строительстве было показано в работах [2; 3 10], где было установлено, микроструктура кирпича и раствора представлена полиминеральным составом. Для «зрелых» кирпичей за показатели морозостойкости, атмосферостойкости отвечают высокоосновные гидросиликаты кальция (аввиллит, фошагит, гиллербрандит), а за показатели прочности, долговечности — низкоосновные (тоберморитовая группа, ксонотлиты, реже гиролит) и кальцит ( $\text{CaCO}_3$ ).

Для кладочного раствора на длительном цикле эксплуатации (более 80 лет) микроструктура имеет схожий рисунок [10], но в связи с использованием портландцемента и извести в вяжущем, добавляются гидроалюминат и несквегонит.

Также было установлено, что общая картина изменения состояния микроструктуры этих материалов со временем претерпевает сложные переходы высокоосновных в низкоосновные гидросиликаты кальция, а низкоосновные в кальцит, при этом происходит объемное уменьшение твердой фазы в поверхностном слое (в силу карбонизации низкоосновных фаз), объемное увеличение твердой фазы в приповерхностном слое (в силу перекристаллизации высокоосновных фаз и кольматационного заполнения порового пространства) с незначительным увеличением его прочности. Что, в целом, приводит к снижению основности и прочности материалов кладки в долгосрочном цикле эксплуатации [9], микроструктура становится более дефектна, с понижением её стойкости к агрессивным средам [11].

В значительной мере на скорость карбонизации [9; 11] материалов кладки наружных стен оказывает действие углекислого газа, проникающего в систему порового пространства через поверхность материалов естественным образом и, растворяясь в поровой влаге (при выравнивании концентрации) образующего углекислоту.

Наиболее опасным этот процесс является для деструктурированного поверхностного слоя пористых материалов. Ввиду того, что пористая структура поверхностного слоя материалов [9; 13] в связи с перекристаллизационными процессами со временем меняется (с размера пор от 100 нм до 100 000 нм) в сторону увеличения, то и растет объем диффузии углекислого газа [9; 14].

Эти наблюдения для полностью деструктурированного поверхностного слоя можно пояснить механизмом коррозии II вида (по Москвину) [12]. Предположительно, в данном случае содержащаяся в дождевой воде, а также при перенасыщении  $\text{CO}_2$  воздуха кольматирующей поры влагой, углекислота ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), проникая в структуру разуплотненного силикатного материала (где, в силу развития внутренних напряжений от воздействий попеременного замачивания-осушения и замораживания-оттаивания, наступила деструкция материала), при определенных условиях (температурно-влажностном режиме и концентрации  $\text{CO}_2$  на поверхности и в порах материала) образует более растворимый, по отношению к кальциту гидрокарбонат кальция ( $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ), который, диффундируя к наружной поверхности кладки, вымывается дождевой водой, снижая относительное содержание кальцита в этой зоне кирпича с его полной деструкцией.

Визуализация возможной схемы протекания процессов массопереноса при углекислотной коррозии показана на рисунке 4.

Учитывая достаточно высокую жесткость (высокое содержание ионов гидрокарбоната) природных атмосферных вод в г. Уфе (по данным [15] жесткость может составлять до 30,6 мг-экв/л), данные по выбросам  $\text{CO}_2$  в атмосферу города<sup>2</sup>, где указано, что наибольшее количество выбросов происходит в весенний период (март — апрель), а также увеличивающуюся относительную влажность конструкций и воздуха в этом периоде года за счет таяния снега, дождей, конденсата, нулевых перепадов температур.

Указанные выше процессы проявляются наиболее интенсивно в переходный зимне-весенний период года. Это объясняется повышенным содержанием влаги в деструктурированном слое, необходимой для образования углекислоты, на поверхности стенового материала.

<sup>2</sup> Государственные доклады о состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан / Режим доступа: <https://ecology.bashkortostan.ru>. (Дата обращения 01.11.2023).



Одним из результатов этих процессов в поверхностном слое облицовочного силикатного кирпича, судя по нашим наблюдениям, является образование высолов. Они представляют собой белые пятна солей кальцита, возникающие вокруг областей кладки наружных стен, которые подверглись переувлажнению (рис. 5 а-г).

Образование высолов можно объяснить тем, что в процессе солнечного нагревания наружной поверхности (в силу действия градиента влаги), бикарбонат кальция, не удаленный атмосферными осадками, разлагается на труднорастворимый кальцит и воду. Этот процесс способствует образованию видимых высолов, которые становятся заметными вокруг переувлажненных областей силикатной кладки. Таким образом, очевидно, что переувлажнение поверхности стеновых материалов в переходный зимне-весенний период года играет важную роль в процессе образования высолов и деструкции поверхностного слоя облицовочного силикатного кирпича и кладочного раствора.

### Выводы и обсуждение

Описанные выше процессы деструкции характерны не только для силикатного кирпича, но и для других силикатных материалов автоклавного твердения, кладочных растворов, используемых в наружных стеновых конструкциях и, безусловно, без специальных мер защиты от атмосферных воздействий, достаточно сложно будет обеспечить заданные параметры их долговечности и атмосферостойкости.

Описанные механизмы деструкции слоев кладки наружных стен в условиях естественной эксплуатации, характерной для крупных городов средней полосы нашей страны, имеют достаточно сложный характер, сочетают целый комплекс воздействий факторов внешней среды и возможность сопротивления им материалов.

В наибольшей степени факторы долговечности силикатного кирпича и кладочного раствора на длительном цикле непрерывной работы складываются из сопротивляемости попеременным циклам замачивания-осушения, замораживания-оттаивания, химической стойкости газовым средам, к карбонизационным процессам в микроструктуре материалов и состояния порового пространства.

Без принятия соответствующих мероприятий по гидроизоляционной защите кладки наружных стен от атмосферных воздействий напряжения в структуре материалов будут накапливаться, и процессы деструкции будут более интенсивные.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Хвостенков, С.И. Развитие производства силикатного кирпича в России / С.И. Хвостенков // Строительные материалы. — 2007. — № 10. — С. 1–4.
2. Статистический сборник: «Капитальное строительство СССР» // Госкомстат СССР. — М.: Финансы и статистика, 1988. — 246 с.
3. Бабков, В.В. Физико-химические процессы, происходящие в структуре силикатного кирпича в цикле эксплуатации наружных стен зданий / В.В. Бабков, А.И. Габитов, Н.С. Самофеев // Башкирский химический журнал. — 2011. — Т. 18, № 2. — С. 180–184.
4. Структурные и физико-химические изменения в силикатном кирпиче на интервале 70-ти летней эксплуатации / А.И. Бедов, В.В. Бабков, А.И. Габитов, Н.С. Самофеев // Вестник МГСУ. — 2011. — № 5. — С. 261.

5. Бабков, В.В. Силикатный кирпич в наружных стенах зданий: анализ состояния, прогноз долговечности и способы ее повышения / В.В. Бабков, Н.С. Самофеев, А.Е. Чуйкин // Инженерно-строительный журнал. — 2011. — № 8(26). — С. 35–40.
6. Хавкин, Л.М. Технология силикатного кирпича / Л.М. Хавкин. — М.: Стройиздат., 1982. — 384 с.
7. Стольников, В.В. О теоретических основах сопротивляемости цементного камня и бетонов чередующимися циклами замораживания и оттаивания / В.В. Стольников. — Л.: Энергия, 1970. — 66 с.
8. Александровский, С.В. Долговечность наружных ограждающих конструкций / С.В. Александровский. — М.: РААСН, 2004. — 332 с.
9. Ананьев, А.А. Долговечность лицевого кирпича и камня в наружных стенах зданий / А.А. Ананьев, В.В. Козлов, Г.Я. Дуденкова, А.И. Ананьев // Строительные материалы. — 2007. — № 2. — С. 56–58.
10. Бабков, В.В. Структурообразование и разрушение цементных бетонов / В.В. Бабков, В.Н. Мохов, С.М. Капитонов, П.Г. Комохов. — Уфа: ГУП «Уфимский полиграфкомбинат», 2002. — 376 с.
11. Бабков, В.В. Твердение и деструкция цементного камня при длительных условиях / В.В. Бабков, Р.Р. Сахибгареев, А.Е. Чуйкин и др. // Нефтегазовое дело. — Уфа: УГНТУ, 2005. — № 3. — С. 275–281.
12. Силаенков, Е.С. Долговечность изделий из ячеистых бетонов / Е.С. Силаенков. — М.: Стройиздат, 1986. — 176 с.
13. Москвин, В.М. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин, Ф.М. Иванов, С.Н. Алексеев, Е.А. Гузеев. — М.: Стройиздат, 1980. — 536 с.
14. Штарк, И. Долговечность бетона / И. Штарк, Б. Вихт. — К.: Оранта, 2004. — 301 с.
15. Алексеев, С.Н. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С.Н. Алексеев, Ф.М. Иванов, С. Модры, П. Шиссль. — М.: Стройиздат, 1990. — 320 с.
16. Абдрахманов, Р.Ф. Гидрогеоэкология г. Уфы. / Р.Ф. Абдрахманов, В.И. Мартин // Экологический вестник. — Уфа. 2009. — № 5. — С. 45–56.

**Sugonyako Ilya Sergeevich**

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation  
Institute of Oil and Gas Engineering and Digital Technologies  
E-mail: Volvita@inbox.ru

**Samofeev Nikita Svyatoslavovich**

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation  
Ufa Higher School of Economics and Management  
E-mail: volvita@inbox.ru

## **Towards clarification of the mechanism of physico-chemical erosion of the facing layer of masonry of external walls of residential buildings of the mass construction period under conditions of long-term operation**

**Abstract.** In the post-war period, the silicate industry of building materials received active development. More than a billion square meters of comfortable housing for the residents of our country, a large number of social facilities, as well as various production facilities have been built using sand-lime brick.

In the cities of the Republic of Bashkortostan, a fairly decent housing stock has been built using old mass series using sand-lime bricks — about 20 million m<sup>2</sup>, of which more than 6 are in the capital city of Ufa alone.

It is obvious that the atmosphere of large cities is more aggressive compared to rural areas and the masonry materials of external walls experience a whole range of physical and chemical influences from the external environment. In connection with this, there is a need to clarify the model of the mechanism of destruction of masonry elements of external walls based on silicate materials, which occurs under natural conditions of long-term operation.

The work shows the main connections between the performance of the front layer of silicate masonry and the development of irreversible uneven deformations from shrinkage and swelling during the period of soaking and drying in the summer in combination with freezing-thawing in the autumn-spring period, leading to physical erosion of layers of materials.

The authors clarify the role of chemical corrosion and carbonization occurring in the microstructure of silicate materials under the action of carbon dioxide (and carbon dioxide associated with pore moisture). The influence of the role of mass transfer in the pore space of the surface layer of sand-lime brick, which together leads to the formation of efflorescence in waterlogged areas of masonry walls and their connection with destructive processes during physical erosion, is shown.

To increase the performance of the facing layer of masonry of the external walls of mass-built houses operating in long-term natural conditions of large cities, characteristic of central Russia, it is necessary, first of all, to take comprehensive measures to protect them from waterproofing, limiting the penetration of moisture into the structure of the materials.

**Keywords:** physical erosion; carbonization; silicate brick; external walls of residential buildings; long-term operation; mechanism of destruction; microstructure of silicate materials; carbon dioxide corrosion