УДК 691.618.54
doi: 10.33622/0869-7019.2024.09.41-51

Прочность и деформативность кладки стен из стеклокирпичей: отечественный и зарубежный опыт

Аркадий Вульфович ГРАНОВСКИЙ[1], кандидат технических наук, доцент, granovskiyav@mgsu.ru

Евгений Юльевич ЦЫКАНОВСКИЙ[2], кандидат технических наук, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, генеральный директор, tsykanovsky@mail.ru

Владимир Анатольевич КАКУША[1], зав. лабораторией, kakushava@mgsu.ru

Максим Владимирович КУДРЯВЦЕВ[1], инженер, преподаватель, k.m.v.29.12.96@yandex.ru

[1] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

[2] ДИАТ-ПРОЕКТ, 123298 Москва, 3-я Хорошевская ул., 18, корп. 1, оф. 311

Аннотация. *Проанализирована область применения стеклокирпичей для каменной кладки несущих и самонесущих стеновых ограждающих и фасадных конструкций в зданиях и сооружениях различного назначения. Приведены примеры реализованных и запроектированных объектов общественных зданий (в основном за рубежом) с наружными стенами в виде кладки из стеклокирпичей. Рассмотрены факторы, влияющие на прочность кладки из стеклокирпичей, а также дана оценка применимости существующих теорий прочности при оценке надежности конструкций из стекла. Проанализированы результаты экспериментальных исследований фрагментов кладки из стеклокирпичей, выполненной на растворных смесях и клеях при различных видах ее напряженного состояния. Исследования проведены специалистами Чешского технического и Делфтского технологического университетов. Также представлены результаты испытаний фрагментов кладки стен из стеклокирпичей марки Vetropieno bricks на осевое растяжение, сжатие и срез, осуществленных специалистами Московского государственного строительного университета и фирмы «ДИАТ-ПРОЕКТ». Даны рекомендации по применению кладки из стеклокирпичей в несущих стеновых конструкциях.*

Ключевые слова: *конструкции стен из стеклокирпичей, теории разрушения, экспериментальные исследования, прочность кладки стен из стеклокирпичей, виды силовых воздействий*

Для цитирования: *Грановский А. В., Цыкановский Е. Ю., Какуша В. А., Кудрявцев М. В.* Прочность и деформативность кладки стен из стеклокирпичей: отечественный и зарубежный опыт // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 9. С. 41–51. doi: 10.33622/0869-7019.2024.09.41-51

STRENGTH AND DEFORMABILITY OF MASONRY WALLS MADE OF GLASS BRICKS: DOMESTIC AND FOREIGN EXPERIENCE

Arkadiy V. GRANOVSKIY[1], granovskiyav@mgsu.ru, **Evgeniy Yu. TSYKANOVSKY**[2], tsykanovsky@mail.ru

Vladimir A. KAKUSHA[1], kakushava@mgsu.ru, **Maksim V. KUDRYAVTSEV**[1], k.m.v.29.12.96@yandex.ru

[1] National Research Moscow State Civil Engineering University, Yaroslavskoye shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

[2] DIAT-PROJECT, 3-ya Khoroshevskaya ul., 18, korp. 1, of. 311, Moscow 123298, Russian Federation

Abstract. *The scope of application of glass bricks for masonry of load-bearing and self-supporting wall enclosing and facade structures in buildings and structures for various purposes is analyzed. Examples of implemented and projected projects of public buildings (mainly abroad) with the use of exterior walls in the form of masonry made of glass bricks are given. It has been established that currently in Russia there are no Standards for the design of load-bearing and enclosing structures made of glass bricks, while in Europe such standards have been developed. The factors influencing the strength of glass brick masonry are considered, as well as an assessment of the applicability of existing strength theories in assessing the reliability of glass structures. The results of experimental studies of fragments of glass brick masonry on various compositions of mortar mixtures and adhesives under various types of its stress state, performed by specialists from the Czech Technical and Delft Technological Universities, are analyzed. The results of experimental studies of fragments of masonry walls made of glass bricks of the brand "Vetropieno bricks" under axial tension and shear on cement mortar are analyzed and compared with data from foreign tests. Recommendations on the use of glass brick masonry in load-bearing wall structures are given.*

Keywords: *constructions of walls made of glass bricks, theories of destruction, experimental studies, strength characteristics of masonry walls made of glass bricks, types of force influences*

For citation: Granovskiy A. V., Tsykanovsky E. Yu., Kakusha V. A., Kudryavtsev M. V. Strength and Deformability of Masonry Walls Made of Glass Bricks: Domestic and Foreign Experience. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2024, no. 9, pp. 41–51. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2024.09.41-51

© ГРАНОВСКИЙ А. В., ЦЫКАНОВСКИЙ Е. Ю., КАКУША В. А., КУДРЯВЦЕВ М. В., 2024

Введение

Стекло, один из древнейших строительных материалов, использовалось как для заполнения оконных проемов, так и в качестве несущих и ограждающих элементов в зданиях различного назначения. В дополнение к плоскому стеклу [1—4] и пустотелым блокам из стекла [5, 6] за рубежом появились стеновые конструкции из цельного стеклянного кирпича [7—9]. Однако проведенный авторами данной статьи анализ работ по теоретическим и экспериментальным исследованиям стеновых конструкций из стеклокирпичей показал, что если в части архитектурного воплощения идеи зданий из таких материалов сделан значительный шаг, то практическая реализация замыслов архитекторов сдерживается недостатком (а в отдельных случаях отсутствием) знаний о свойствах элементов кладки (стеклокирпичей и раствора) с учетом характера воздействия и применяемых клеевых или специальных строительных растворов.

Архитектурные проекты и реализованные сооружения из стекла [1, 2], в том числе из стеклокирпичей *(рис. 1—3)*, свидетельствуют о значительном интересе общества к использованию стекла в архитектуре зданий. В России в настоящее время с участием одного из авторов статьи разработан и реализуется проект здания с наружными несущими стенами из стеклоблоков *(рис. 4)* по адресу: Москва, ул. 2-я Хуторская.

Стеклокирпич стал более широко использоваться в странах Запада как в качестве несущих и ограждающих стеновых конструкций, так и в виде лицевого слоя навесных фасадных систем. В связи с этим трудно согласиться как с мнением автора статьи [9], что «... со смертью пионеров стеклянной архитектуры Мис ван дер Роэ и Ле Карбюзье в странах Запада намечается охлаждение к стеклу», так и высказыванием английского архитектора Мишеля Г. Корби [9], который отнес «архитектуру стеклянных небоскребов к менталитету отсталых восточных стран».

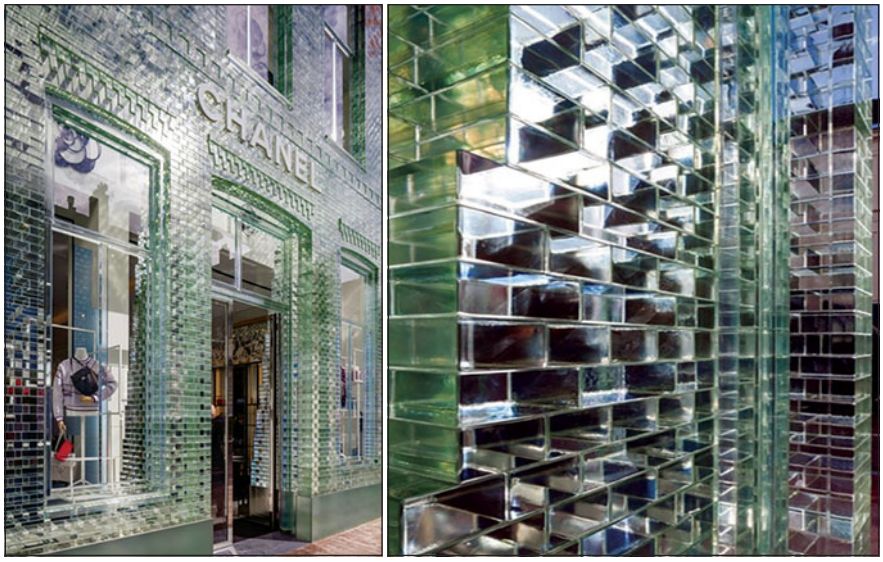


Рис. 1. ***Фасад из стеклянного кирпича в Амстердаме (https: / / www.architetturaecosostenibile.it / materiali / vetro / crystal-houses-vetro-amsterdam-804)***

Рис. 2. ***Здание Университета искусств, музея и библиотеки (Япония) (https: / / fr.homenal.com / les-plus-belles-bibliotheques-au-monde /)***

Несмотря на архитектурную привлекательность стеновых конструкций из стеклокирпичей, основными сдерживающими факторами их применения в строительстве являются отсутствие экспериментальных исследований таких конструкций и, как следствие этого, нормативных документов по их проектированию, а также высокая стоимость стеклокирпичей.

Цель настоящей работы — показать необходимость проведения экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния конструкций из стекла при различных видах силовых воздействий, с учетом таких факторов, как химический состав стекла, специфика изготовления и технология его произ-

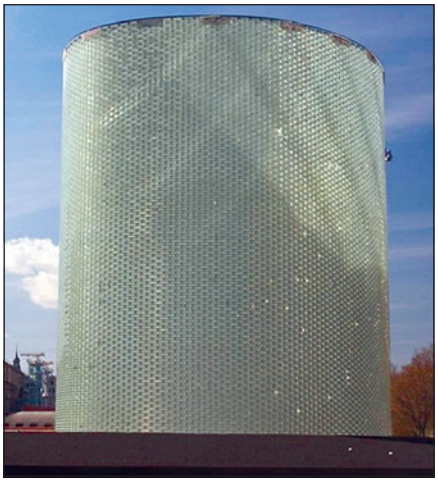


Рис. 3. *«Лес памяти» — мемориал жертвам террористической атаки в Мадриде 11 марта 2004 г. (Испания) (https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Madrid_-_Puerta_de_Atocha_-_Monumento_11-M_-_20070324a.jpg)*

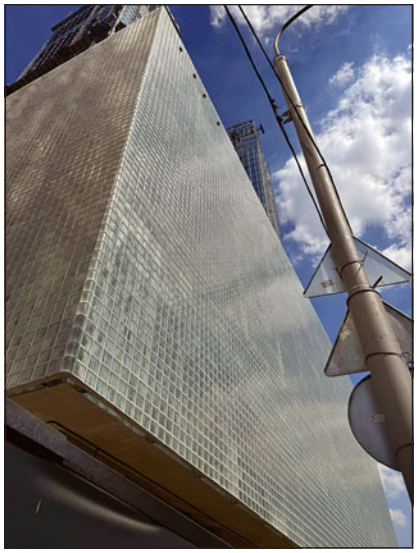


Рис. 4. *Здание с наружными самонесущими стенами из стеклоблоков в Москве*

водства на конкретном предприятии, что позволит более корректно оценивать несущую способность несущих и ограждающих конструкций из стеклокирпичей.

Реальные проекты

Начиная с конца XX в., стеклокирпичи стали широко применяться в наружных стенах зданий в качестве фасадного строительного материала. На *рис. 1* показаны общий вид и фрагмент участка наружной стены здания в г. Амстердаме. В качестве связующего материала здесь использовался прозрачный клей высокой жесткости, отверждаемый УФ-излучением, с толщиной слоя до 0,3 мм.

Экспериментальные исследования кладки стен из стеклокирпичей [10—14] показали, что желаемые монолитные структурные характеристики системы стеклянной кладки, а также однородный визуальный результат достигаются только при нанесении клея слоем толщиной 0,2—0,3 мм [12]. Практически нулевая толщина клея в сочетании с требованиями обеспечения прозрачности стен привели, как отмечается в [12—14], к «возникновению многочисленных инженерных проблем». Как показали исследования [10,11], применение более толстого растворного слоя негативно повлияло на прочность сцепления клея с основанием из стекла.

Следует отметить, что при проектировании конструкций и сооружений из стекла зарубежные проектировщики столкнулись с проблемой назначения расчетных характеристик стекла с учетом влияния различных факторов, в том числе влияния растворного (клеевого) шва. В отличие от теоретической прочности прочность реального стекла не является физически обоснованным параметром. Она зависит от химического состава и технологии производства стекла, техники изготовления образцов и их размеров, физико-химических свойств окружающей среды и температуры испытания, скорости и длительности нагружения.

Исторически сложилось, что в Европе существует множество различных национальных стандартов [7], касающихся проектирования стеклянных конструкций. Как отмечается в [7], «некоторые из них противоречивы, неполны, устарели или не соответствуют Европейским нормам проектирования EN 1990 (2010)». Такая ситуация создала условия, при которых конструкции из структурного стекла могли быть реализованы только при наличии специальных разрешений. Процесс проектирования особо крупных объектов в этом случае неэффективен, требует специальных согласований и относительно рискован. По мнению зарубежных специалистов, такая ситуация препятствовала техническому прогрессу и экономическому развитию стекольного сектора в строительной отрасли. Была создана специальная Комиссия по разработке нового Еврокода по проектированию стеклянных конструкций CEN/TS 19-100 [7], в которую вошли специалисты ведущих исследовательских центров восьми стран.

Высокий научный уровень членов комиссии привел (в рамках реализации этой стратегии) к необходимости ввести два новых предельных состояния применительно к расчету конструкций из стекла: «предельное состояние разрушения (FLS)» и «предельное состояние после разрушения (PFLS)». Объем статьи не позволяет дать оценку этому интересному научному предложению. К сожалению, требования разработанного стандарта не применяются в Российской Федерации.

В сложившейся ситуации на основании Технического регламента о безопасности зданий и сооружений соответствие проектных значений и характеристик конструкций требованиям безопасности должны быть обоснованы одним или несколькими способами, в частности «результатами исследований либо расчетами и (или) испытаниями, выполненными по сертифицированным или апробированным иным способом методикам». Введенный в действие 15 мая 2023 г.

СП 521.1325800.2023 «Конструкции из многослойного стекла. Правила проектирования» устанавливает методы расчета несущих стеклянных конструкций по аналогии с конструкциями из иных материалов, что при наличии особых свойств у стекла не всегда обоснованно. При этом в качестве расчетных сопротивлений приводятся значения, зависящие только от типа стекла (флоат, термоупрочненное, закаленное). Свод правил не учитывает указанных выше важных факторов, а также имеет спорные рекомендации по назначению модуля упругости многослойных стеклянных элементов.

Физико-механические характеристики кладки из стеклокирпичей

Постепенное расширение области применения конструкций из стеклокирпичей не только в качестве архитектурных элементов зданий, но и конструкций, воспринимающих различные по характеру и величине силовые воздействия, потребовало выявить потенциал прочностных, деформативных и других физико-механических характеристик стеклокирпичей и кладки из них.

Прочность стекла, как и прочность любого другого твердого тела, зависит от вида деформации. На практике стеклоизделие может подвергаться растяжению, сжатию, кручению и их комбинациям. В подавляющем большинстве случаев стекло разрушается от разрывных напряжений при изгибе. Как отмечается в [15], прочность идеально бездефектного твердого тела определяется силами связи между правильно расположенными атомами. Для таких материалов (а к ним относится и стекло) А. А. Гриффит ввел понятие «теоретическая прочность» [16], т. е. «это критическое напряжение, которое необходимо квазистатически (медленно) приложить к идеально упругому телу, чтобы вызвать его необратимую диссоциацию [15]».

Точные расчеты теоретической прочности стекла, как и других идеально упругих твердых материалов, требуют знания структуры тела и потенциала межатомного взаимодействия [17]. Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований в этой области позволяет констатировать, что для таких материалов, как силикатное стекло, определить эти параметры с учетом современного уровня развития науки не представляется возможным. Согласно [15], теоретическая прочность стекла, как и прочность реального стекла, не является физически обоснованным параметром. Она зависит от химического состава и технологии производства стекла, техники изготовления образцов и их размеров, физико-механических свойств окружающей среды и температуры испытаний, а также скорости и длительности нагружения образцов.

В работе [15] дан анализ влияния названных факторов на прочностные характеристики стекла. В настоящее время в России отсутствуют исследования кладки несущих стен из стеклокирпичей с учетом этих факторов, оказывающих влияние на прочность и деформативность кладки из стеклокирпичей.

Для объяснения зависимости прочности стекла от различных факторов исследователи используют классическую механику разрушения, энергетическую теорию А. А. Гриффита, линейную механику разрушения и кинетическую теорию разрушения С. Н. Журкова [17,18]. Однако, как утверждает проф. А. П. Фалин [19], «вполне сложившихся, хорошо объясняющих все возможные факты теорий прочности до сих пор не существует».

Проанализируем возможности применения указанных теорий при оценке надежности конструкций из стекла.

1. *Классическая механика разрушения,* включающая в себя теорию максимальных нормальных напряжений (теория Г. Галилея), теорию максимальных относительных линейных деформаций (теория Э. Мариотти), теорию Ш. Кулона и энергетическую теорию Э. Бельтрами, непригодна для описания поведения такого материала, как стекло, поскольку рассматривает его в качестве идеально упругого тела, не отражает возможность появления и развития в нем трещин и перехода материала в пластическое состояние, не позволяет описать работу стекла (кладки) при объемном напряженном состоянии и плохо согласуется с результатами эксперимента.

2. *Энергетическая теория разрушения А. А. Гриффита* [16] является распространенной моделью, объясняющей прочностные характеристики стекол и демонстрирующей важную роль поверхностных микродефектов. В связи с этим Гриффитом установлено, что прочность поверхностных слоев стекла значительно меньше прочности внутренних слоев. Исходя из предположения, что рост трещины происходит тогда, когда величина напряжения у ее вершины достигает теоретической прочности ($\sigma_c = P_т$), а приложенное в этот момент к образцу номинальное напряжение соответствует пределу его прочности ($\sigma_m = P$), для плоской деформации Гриффит получил следующую формулу

$$P = \{2E_\gamma / [\pi_c (1 - \mu)^2]\}^{1/2},$$

где E – модуль Юнга; γ – свободная поверхностная энергия; μ – коэффициент Пуассона; c – глубина трещины, а в более общем случае – линейный параметр, характеризующий дефектность поверхности. Для плоского напряженного состояния $(1 - \mu)^2 = 1$.

Введением в анализ априорного существования трещин в стек-

ле Гриффит попытался объяснить причину снижения теоретической прочности до реально наблюдаемых значений. Механизм разрушения стекла при использовании модели Гриффита включает две последовательные стадии [20]: рост наиболее опасной трещины и возникновение и одновременный рост большого числа вторичных трещин. Однако уравнения теории Гриффита не учитывают физических характеристик, влияющих на прочность тел, таких как время действия нагрузки и температуры (термодинамическая теория С. Н. Журкова [18] позволяет учесть эти факторы, что необходимо при расчете конструкций из стекла). Кроме того, развитие трещин связано с наличием концентраторов напряжений. В модели Гриффита данный фактор не учитывается. По этим двум причинам, по нашему мнению, теория Гриффита не нашла широкого практического применения. Она справедлива для идеально хрупкого разрушения, когда материал деформируется упруго вплоть до разрушения, т. е. учесть пластические деформации в зоне вершины трещины (о которых упоминается в модели Гриффита) невозможно. Константа в приведенной формуле представляет собой поверхностную энергию материала, которую очень трудно определить.

В статье [21] отмечается, что у неорганических стекол при температуре 20 °С наблюдаются неупругие остаточные деформации в случае, если механическое внешнее напряжение превышает некоторый порог, который для силикатных стекол совпадает с микротвердостью по Виккерсу (по [21] — это эффект пластичности стекол). Маккензи [22] показал, что пластичность стекол проявляется как при одноосном, так и всестороннем сжатии. Им было установлено, что если при внешнем воздействии напряжение в стекле превышает предел текучести, то в нем происходит пластическая деформация, которая при 20 °С сохраняется сколь угодно долго. Однако, как отмечается в [21], «природа эффекта пластичности стекол остается до конца не решенной проблемой».

3. *Линейная механика разрушения (ЛМР)* применима только к ситуациям хрупкого разрушения. При этом реакция тела с трещиной на нагрузку демонстрирует линейно-упругое поведение вплоть до момента хрупкого нестабильного разрушения [22]. Объем локализованного пластического сечения у вершины трещины весьма небольшой и не оказывает заметного влияния на общий линейный характер зависимости «нагрузка—деформация». Следует отметить, что ЛМР не приспособлена к определению нагрузок трещинообразования и допускает так же, как и нелинейная механика разрушения, неограниченную прочность элементов конструкций и оснований с трещинами в сложнонапряженном состоянии и, что особенно существенно, ЛМР требует для своего применения наличия исходных макротрещин.

4. *Кинетическая теория прочности С. Н. Журкова* [22] рассматривает разрушение как термодинамический процесс постепенного накопления нарушений сплошности (повреждаемости), в котором решающую роль играют «тепловые флуктуации». Эта теория разрушения учитывает строение материала и наличие тепловых колебаний атомов. Рост трещин представляется как процесс последовательного разрыва связей в вершине трещин, однако эта теория, исключая понятие предела прочности, вводит понятие долговечности материала (что особенно важно для конструкций из стекла), которое детерминировано кинетикой пополнения разорванных связей.

На основе использования термодинамического подхода к оценке долговечности материала под нагрузкой (при испытаниях на разрыв) С. Н. Журков предложил следующие зависимости для оценки напряженного состояния стекла:

$$t = \tau_0 e_p[(\omega_0 - \gamma\sigma)/kT],$$

откуда напряжение при разрыве составит

$$\tau_p = (1/\gamma)(U_0 - kT\ln(t/\tau_0)),$$

а максимальное разрывное напряжение при $T = 0$ К

$$\sigma_{раз} = U_0/\gamma.$$

Недостатком этой теории, с нашей точки зрения, является то, что рассматриваются только трещины нормального отрыва. Однако разрушение твердых тел сопровождается не только развитием трещин нормального отрыва, но и наличием сдвиговых трещин, природа появления которых связана с другим характером воздействия.

Одной из проблем проектирования кладки из стеклокирпичей является определение модуля упругости и прочностных параметров кладки при различных видах ее напряженного состояния. Все эти параметры могут быть установлены только из эксперимента. Результаты исследований прочности стеклокирпичей [10—14] показали большой разброс значений. В настоящее время отсутствуют нормы по оценке прочности кладки из стеклокирпичей на различные виды силовых воздействий (сжатие, изгиб, срез и т. д.). В отличие от «теоретической прочности» (термин, введенный Гриффитом) реальная прочность стекла не является физически обоснованным параметром. Она зависит от химического состава и технологии производства стекла, техники изготовления образцов и их размеров, температуры испытания, а также

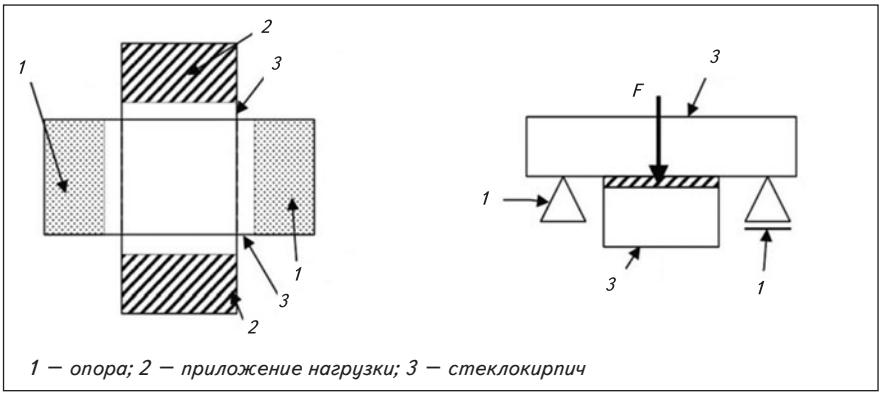


Рис. 5. ***Схема испытаний на осевое растяжение по европейской методике [11]***

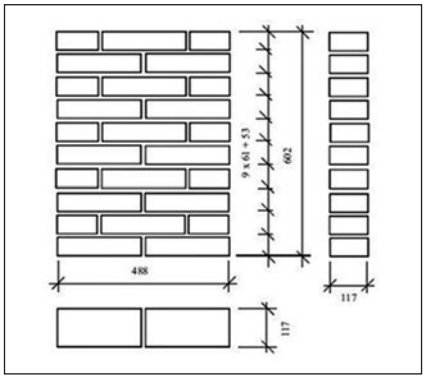


Рис. 6. ***Схема фрагмента кладки стены для испытаний на сжатие [11]***

скорости и длительности нагружения. В связи с этим на данном этапе создания конструкций из стекла и стеклокирпичей в паспорте завода-производителя должны быть указаны их прочностные характеристики при сжатии. Контрольные испытания стеклокирпичей показали, что предел прочности при сжатии составляет не менее 15 МПа.

В работах [22, 23] исследовано влияние длительности приложения нагрузки на прочность и напряженно-деформированное состояние стеклянных конструкций. Авторами установлена интересная закономерность: чем длительнее действие нагрузки, тем ниже значение напряжения в момент разрушения стекла. Этот эффект авторы назвали «статической усталостью стекла». В практических расчетах кладки из стеклокирпичей возникает необходимость определения максимальной расчетной нагрузки, при которой стекло как элемент кладки свободно от «статической усталости». В настоящее время ответ на этот вопрос затруднен из-за отсутствия экспериментальных исследований длительной прочности кладки стен из стеклокирпичей (применительно к кладке из керамических кирпичей такие исследования проведены проф. С. В. Поляковым и его учениками [24, 25]), данных о коэффициенте безопасности (надежности) для конструкций из стекла и в целом из-за малого объема исследований в этой области.

Одним из важных факторов, влияющих на прочность кладки из стеклокирпичей и, в отдельных случаях, ограничивающих применение стекла в качестве элементов кладки, является его низкая огнестойкость. В работах [26, 27] на основе экспериментальных исследований стеклянных конструкций установлено, что закаленное стекло более устойчиво к воздействию огня. Однако при длительном воздействии огня (временной фактор не указан) и температуре выше 400...500 °С имеет место снижение уровня предварительного напряжения закаленного стекла и, как следствие этого, после пожара возникает необходимость замены стеклокирпичей. За рубежом эта проблема решается за счет применения вспучивающихся (при высокой температуре) покрытий.

В зарубежной практике комплексные исследования кладки из стеклокирпичей при различных видах ее напряженного состояния (осевое растяжение, срез и сжатие) впервые выполнены специалистами Чешского технического университета [10, 11]. Авторы исследовали влияние следующих составов растворов на прочность кладки: 1) цементного (Vetromalta); 2) цементного с латексной добавкой (Vetromalta + Latex Admixture); 3) цементной смеси с адгезионной добавкой (Nivoplan + Planicrete) и 4) клеевого раствора (Flexkleber Weiss). Для кладки опытных образцов использовались стеклокирпичи марки Vetropieno bricks компании Vitrablok. В процессе испытаний варьировались такие характеристики кладки, как толщина растворного шва (от 1 до 16 мм) и качество обработки опорной поверхности стеклокирпичей. Прочность раствора при сжатии варьировалась в интервале от 18,6 до 37,4 МПа. По результатам испытаний фрагментов кладки на «осевое растяжение — нормальное сцепление» (схема испытаний по европейской методике приведена на *рис. 5*) было установлено следующее: для состава 2 нормальное сцепление составило от 0,32 (3 мм) до 0,087 (6 мм) МПа; для состава 3 — 0,409 МПа (10 мм); для клея — 0,26 МПа (1 мм).

По результатам испытаний фрагментов кладки на срез в зависимости от состава раствора и качества обработки опорной поверхности кирпича авторами были получены значения касательного сцепления (в скобках указана толщина шва): для состава 1 — 0,44 (11 мм) МПа; для состава 2 — 0,13 (7 мм) и 0,36 (5 мм) МПа; для состава 3 — 0,093 (13

мм) и 1,05 (3 мм) МПа; для клеевого состава – 0,009 (11 мм) и 0,79 (1 мм) МПа.

В соответствии с программой исследований, приведенных в работах [10, 11], были изготовлены и проведены испытания двух экспериментальных образцов фрагментов стен размером 488×602×117 мм (схема испытаний на *рис. 6*). Для кладки опытных образцов использовался состав 2 раствора. По результатам испытаний было установлено, что появление первой трещины имело место при нагрузке на образцы 800 кН. При этом напряжение в кладке составило 15 МПа, однако появление трещин не привело к разрушению образцов. При нагрузках соответственно 1410 и 1596 кН нагружение образцов было прекращено, но появление новых трещин не привело к разрушению образцов. По результатам исследований для практики проектирования было рекомендовано принимать толщину растворного шва из растворной смеси на цементном вяжущем в кладке в пределах 3–7 мм, а также предложены составы растворных кладочных смесей для кладки стен и колонн из стеклокирпичей. Далее здесь дано сравнение результатов испытаний фрагментов кладки на осевое растяжение и срез, представленных в статьях [10, 11], с данными испытаний авторов.

Специалистами Делфтского технологического университета выполнены экспериментальные исследования по отработке технологии кладки из стеклокирпичей и эффективности применения клеевых составов. Авторы в работах [12–14] представили инженерные этапы испытаний конструкций из стеклокирпичей, а также способы их изготовления и экспериментальные исследования. В качестве связующего материала в кладке из стеклянных кирпичей предложено использовать прозрачный клей высокой жесткости, отвержденный ультрафиолетовым излучением. Для исследований, по результатам анализа, выбран клеевой состав марки DeloPhotobond 4468 (бесцветный однокомпонентный акрилат компании Delo). Установлено, что из-за текучести клея и его вязкости толщина клеевого шва не должна превышать 0,2 мм. Однако следует отметить, что практически нулевая толщина клеевого шва в сочетании с требованиями прозрачности кладки и соблюдения условий равномерного распределения напряжений по длине и ширине стеклокирпичей ведет к необходимости решения многочисленных инженерных проблем. Это требования и к качеству поверхности стеклокирпичей, и к их геометрии (допуски не более 1 мм), и к однородности клеевого раствора.

Экспериментальные исследования

В условиях отсутствия нормативно установленных методик исследований и расчета конструктивных элементов зданий из стекла и стеклокирпичей, только эксперимент может позволить определить реальные прочностные и деформативные характеристики конструкций. Специалистами НИУ МГСУ при участии ООО «ДИАТ-ПРОЕКТ» были проведены экспериментальные исследования прочности кладки стен из стеклокирпичей, смонтированных на растворной смеси Quick-mix FM-R. Программа исследований включала в себя следующие этапы:

- *этап 1* – экспериментальное определение модуля упругости и расчетных характеристик прочности элементов кладки стен (стеклокирпича и растворной смеси);
- *этап 2* – экспериментальное определение фрагментов кладки, смонтированных на растворной смеси Quick-mix FM-R, при сдвиге (касательное сцепление) и осевом растяжении (нормальное сцепление).

Для выполнения работ на этих этапах были использованы следующие материалы: стеклокирпичи марки Vetropieno bricks размером 240×117×53 мм (производитель Bilinska 782/42 419 01 Duchkov, Czech Republic); растворная смесь Quick-mix FM-R.

При проведении испытаний образцов кладки (стеклокирпичей и растворных кубиков размером 7,07×7,07×7,07 мм) и фрагментов кладки из стеклокирпичей был применен испытательный комплекс MTS. В качестве контрольно-измерительных приборов на экспериментальных образцах использовались датчики линейных перемещений и тензорезисторы на основе тонких пленок TML FLA с базой 20 мм.

На этапе 1 были определены значения модуля упругости и коэффициента Пуассона стекла по методике ГОСТ 24452. В качестве призмы использовался стеклокирпич высотой 240 мм и сечением 117×53 мм. На *рис. 7* показан общий вид опытного образца в прессе до начала испытаний. Вертикальные и поперечные деформации стекла на каждом этапе нагружения определялись с помощью тензодатчиков. На *рис. 8* приведен график зависимости продольных и поперечных деформаций стеклянной призмы от уровня напряжений в сечении образца. По результатам испытаний получены следующие характеристики стекла: модуль упругости $E = 71751$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}25$, напряжение в стекле в момент разрушения $\sigma = 16{,}4$ МПа. Как показали испытания растворных кубов на сжатие, растворная смесь соответствовала марке М250. Предел прочности стеклокирпича при сжатии определяли по методике

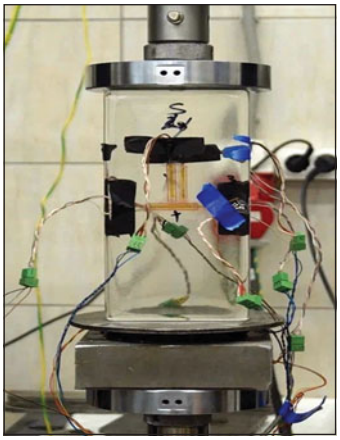
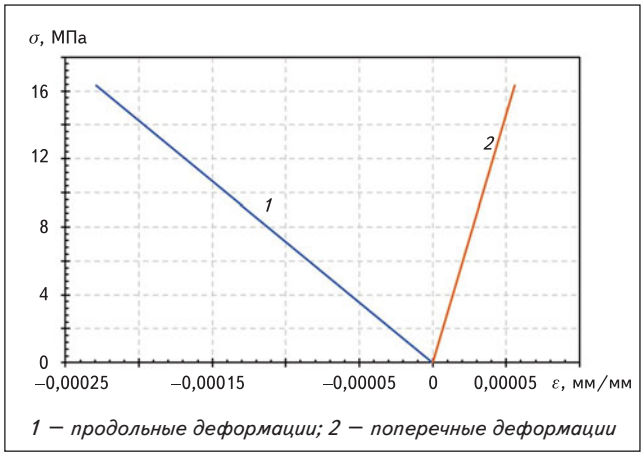


Рис. 7. *Опытный образец призмы из стеклокирпича*



1 – продольные деформации; 2 – поперечные деформации

Рис. 8. *Графики зависимости* $\sigma = f(\varepsilon)$

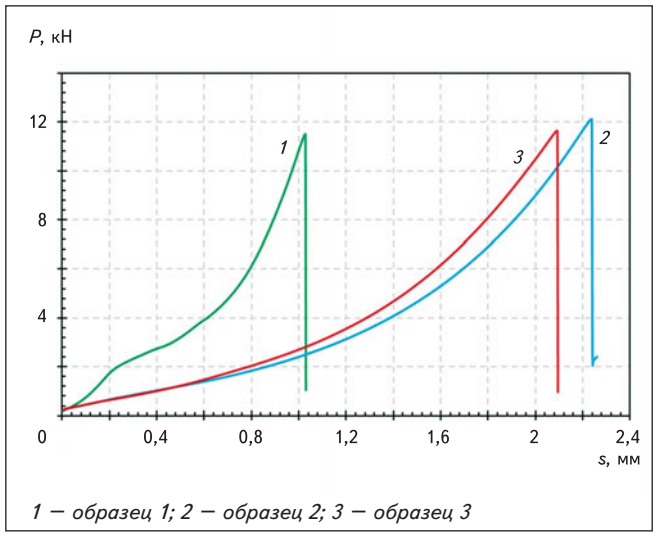
Рис. 10. *Опытный образец при испытании на срез*

Рис. 9. *Опытный образец при испытании на сжатие*

ГОСТ Р 58527 *(рис. 9)*. По прочности при сжатии стеклокирпич соответствовал марке М200 (коэффициент вариации 25 %).

Специалистами Технического центра «Вакер Хеми Рус» (Россия) были проведены экспериментальные исследования прочности при изгибе и сжатии балочек из растворной смеси QuickMix размером 40×40×160 мм после 0; 75; 100 и 150 циклов «замораживания–оттаивания». Прочность при изгибе составила соответственно 3,67; 3,30; 3,96 и 3,53 МПа, при сжатии – 21,73; 16,89; 18,29 и 19,59 МПа.

На этапе 2 были экспериментально установлены прочностные характеристики кладки при осевом растяжении (нормальное сцепление) и срезе (касательное сцепление). Экспе-

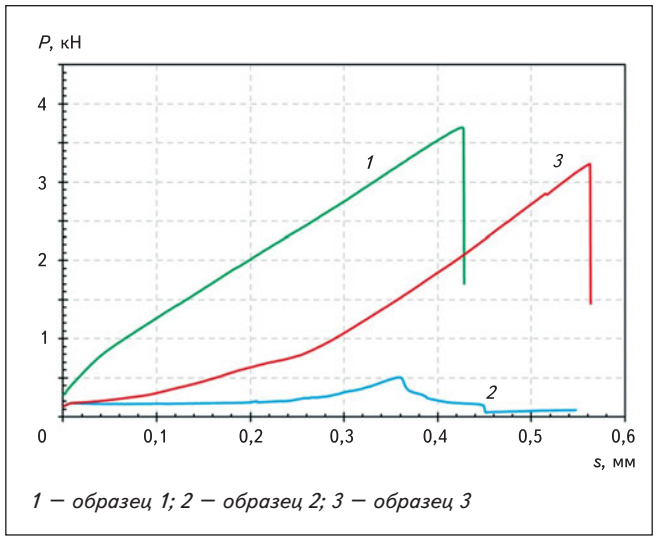


1 – образец 1; 2 – образец 2; 3 – образец 3

Рис. 11. *Графики зависимости «нагрузка P – перемещение s» при срезе*

Рис. 12. *Элемент кладки при испытании на осевое растяжение*

Рис. 13. *Графики зависимости «нагрузка P – перемещение s» при осевом растяжении*



1 – образец 1; 2 – образец 2; 3 – образец 3

риментальные исследования фрагментов кладки из стеклокирпичей осуществлялись на растворной смеси QuickMix с учетом моделирования указанных видов ее напряженного состояния.

Испытания опытных образцов на срез проводились по методике ГОСТ Р 57289 *(рис. 10)*. На *рис. 11* приведены графики зависимости «нагрузка–перемещение» для образцов при действии срезающих усилий. По результатам испытаний установлено, что нормативное значение (временное сопротивление) касательного сцепления составило $R_{sq} = 0{,}524$ МПа.

Испытания опытных образцов на осевое растяжение проводились по методике ГОСТ Р 24992 *(рис. 12)*. На *рис. 13* даны графики зависимости «нагрузка–перемещение» для образцов при растяжении. Установлено, что нормативное значение (временное сопротивление) нормального сцепления составило $R_t = 0{,}156$ МПа.

Проанализируем и сравним (*см. таблицу*) данные о прочностных характеристиках кладки из стеклокирпичей, полученные из эксперимента, с данными действующих норм и результатами испытаний специалистов Чехии [10, 11].

Как видно из *таблицы*, применение растворных смесей с адгезионными добавками, а также клеев при устройстве кладки из стеклокирпичей позволило зарубежным специалистам существенно повысить значения нормального и касательного сцепления растворной матрицы с элементами кладки из стеклокирпича, тем самым повысить прочностные параметры кладки, обеспечивающие ее монолитность. Это особенно важно в случае применения кладки стен из стеклокирпичей в сейсмоопасных регионах.

Результаты испытаний на осевое растяжение и срез

Вид воздействия	Нормативное значение сцепления раствора со стеклокирпичом, МПа / толщина шва, мм		
	СП 14.13330 (п. 6.14.6)	НИУ МГСУ	Статья [11]
Осевое растяжение (нормальное сцепление)	0,08*/0,18**	0,156/10	0,409/10
Срез (касательное сцепление)	0,16*/0,23**	0,525/10	1,05/3

* Значения расчетных характеристик по СП 15.13330.

** Значения нормативных характеристик по СП 14.13330.

Выводы

1. Существующая в России нормативная база в области проектирования несущих и ограждающих стеклянных конструкций из-за недостаточного объема исследований не позволяет корректно оценивать их несущую способность. Требуется проведение экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния конструкций из стекла при различных видах силовых воздействий.

2. Отдельные положения европейских норм в области проектирования несущих конструкций из стекла с учетом теоретических и экспериментальных исследований, выполненных российскими специалистами, могут быть использованы при разработке отечественных норм в этой области. При оценке прочностных характеристик кладки из стеклокирпичей должны быть учтены такие факторы, как химический состав стекла, специфика изготовления и технология его производства на конкретном предприятии.

3. Как показал обзор зарубежных экспериментальных исследований, для повышения монолитности кладки необходима разработка специальных растворов с адгезионными добавками, обеспечивающими повышение сцепления растворных (клеевых) смесей с гладкой поверхностью стеклокирпичей.

4. Теоретические исследования российских специалистов в области теории разрушения стекла [15, 17, 18] должны быть использованы при разработке методов расчета стеклянных конструкций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Pariafsai F. Transparent buildings: the future of all glass structures [Прозрачные здания: будущее всех стеклянных конструкций]. *1th International Conference on modern research Results in Science, Engineering Technology*. Mashhad, Razvi Khorasan, Iran. 2016, vol.1. doi: 10.13140 / RG. 2.1.2158.8724
2. *Галямичев А. В., Кирикова В. А.* Конструкции из стекла. Классификация и применение // Светопрозрачные конструкции. 2017. № 6. С. 31–38.
2. Galyamichev A. V., Kirikova V. A. Glass structures. Classification and application. *Svetoprozrachnye konstrukcii*, 2017, no. 6, pp. 31–38. (In Russ.).
3. *Кондратьева Н. В.* Использование стекла в современном строительстве как конструкционного материала // Градостроительство, реконструкция и инженерное обеспечение устойчивого развития городов Поволжья : сб. тр. II Всерос. науч.-техн. конф. Тольятти, 2009. № 2. С. 44–50.
3. Kondrat'eva N. V. The use of glass in modern construction as a structural material. *Gradostroitel'stvo,*

rekonstrukciya i inzhenernoe obespechenie ustojchivogo razvitiya gorodov Povolzh'ya: sbornik trudov II Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii [Urban planning, reconstruction and engineering for sustainable development of Volga region cities : collection of tr. II All-Russian Scientific and Technical conf.]. Tol'yatti, 2009, no. 2, pp. 44–50. (In Russ.).

4. *Грановский А. В., Румянцев С. С., Какуша В. А., Кудрявцев М. В.* Стекло как материал несущих и ограждающих конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 4. С. 28–37. doi: 10.33622/0869-7019.2024.04.28-37
4. Granovskiy A. V., Rumyancev S. S., Kakusha V. A., Kudryavcev M. V. Glass as a material of load-bearing and enclosing building structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2024, no. 4, pp. 28–37. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2024.04.28-37
5. *Новиков Б. А.* Опыт применения стеклянных блоков за рубежом. М. : Госстройиздат,1957. 40 с.
5. Novikov B. A. *Opyt primeneniya steklyannyh blokov za rubezhom* [Experience of using glass blocks abroad]. Moscow, Gosstrojizdat Publ., 1957. 40 p. (In Russ.).
6. *Грановский А. В., Цыкановский Е. Ю., Какуша В. А., Кудрявцев М. В.* Стеклоблоки: реальность и конструктив, реальность и будущее // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 5. С. 27–35. doi: 10.33622/0869-7019.2024.05.27-35
6. Granovskiy A. V., Tsykanovskiy E.Yu., Kakusha V. A., Kudryavtsev M. V. Glass blocks: architecture and constructive, reality and the future. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2024, no. 5, pp. 28–37. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2024.05.27-35
7. Feldman M. et al. The new CEN / TS 19100: Design of glass structures [Проектирование стеклянных конструкций]. *Glass Structures Engineering*, 2023, no. 8(1), pp. 1–21. doi:10.1007/540940-023-00219-4
8. Kristel De Vis., Jacobs P., Gaen J., Janssens K. The use of glass bricks in architecture in the 19th and 20th Centures: a case study [Использование стеклянных кирпичей в архитектуре в XIX и XX вв.: тематическое исследование]. *Conference ICOM At.* New York, 2010, pp.194–201.
9. *Болдырев А. С.* Стеклянная архитектура: за и против // Молодой исследователь Дона. 2017. № 5(8). С. 25–29.
9. Boldyrev A. S. Glass architecture: pros and cons. *Molodoj issledovatel' Dona*, 2017, no. 5(8), pp. 25–29. (In Russ.).
10. Fila J., Eliášjvá M., Sokol Z. Mechanical properties of solid glass bricks [Механические свойства монолитных стеклянных кирпичей]. *13th International Conference «Modern Building Materials, Structures and Techniques»*. May 16–17, 2019. Vilnlus, Lithuania, pp. 47–52.
11. Fila J., Eliášjvá M., Sokol Z. Experimental investiqation of mortar mechanical properties for qlass brick masonry [Экспериментальное исследование механических свойств раствора для кладки из стеклоблока]. *Glass Structures Enqineerinq*, 2018, pp. 127–141. Available at: https://www.researchqate.net/publication/338469357 (accessed 17.08.2024).
12. Oikonomopoulon F. Overview of realized examples in architecture using structural cast glass blocks [Обзор реализованных примеров в архитектуре с использованием структурных литых стеклоблоков]. *Architecture and the Built Environment. Delft University of Technology*, 2019, no. 9(9), pp. 107–132.
13. Oikonomopoulon F., Bristogianni T. Adhesive solutions for cast glass assemblies: ground rules emerging from built case studies on adhesive selection and experimental validation [Клеевые решения для изделий из литого стекла: основные правила, вытекающие из тематических исследований по выбору клея и экспериментальной проверке]. *Glass Structures and Engineering*, 2022, no. 7, pp. 293–317.
14. Oikonomopoulou F., Bristogianni T., Veer F. A., Nijsse R. The construction of the Crystal Houses fasade: challenges and innovations [Строительство фасада Crystal Houses: проблемы и инновации]. *Glass Structures and Engineering*, 2018, no. 3, pp. 87–108.
15. *Бутаев А. М.* Прочность стекла. Ионообменное упрочнение. Махачкала, 1997. 249 с.
15. Butaev A. M. *Prochnost' stekla. Ionoobmennoe uprochnenie* [The strength of the glass. Ion exchange hardening]. Mahachkala, 1997. 249 p. (In Russ.).
16. Griffith A. A. The phenomena of rupture and flow in solids [Явления разрыва и текучести в твердых телах]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Sériés A*, 1921, vol. 221, pp. 163–198.
17. *Пух В. П.* Прочность и разрушение стекол. Л. : Наука,1973. 156 с.
17. Puh V. P. *Prochnost' i razrushenie stekol* [Glass strength and fracture]. Leningrad, Nauka Publ., 1973. 156 p. (In Russ.).
18. *Журков С. Н.* К вопросу о физической основе прочности // Физика твердого тела. 1980. Т. 22. Вып.11. С. 3344–3349.
18. Zhurkov S. N. On the question of the physical basis of strength. *Fizika tverdogo tela*,1980, vol. 22, iss.11, pp. 3344–3349. (In Russ.).
19. *Филин А. П.* Прикладная механика деформируемого твердого тела. М. : Наука, 1975. Ч. 1. 832 с.
19. Filin A. P. *Prikladnaya mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* [Applied mechanics of deformable solids]. Moscow, Nauka Publ., 1975. Ch. 1. 832 p. (In Russ.).
20. *Ковшов А. Г.* Кинетическая термофлуктационная природа разрушения поверхностей трения твердых тел при изнашивании // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2020. Т. 22. № 3. С. 37–43.
20. Kovshov A. G. Kinetic thermal fluctuation nature of the destruction of friction surfaces of solids during wear. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 37–43. (In Russ.).
21. *Сандаитов Д. С.* Эффект пластичности стекол

в модели делокализованных атомов // Вестник Бурятского государственного университета. Серия: Химия. Физика. 2021. Вып. 1. С. 5–27.

21. Sandaitov D. S. The effect of plasticity of glasses in the model of delocalized atoms. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Himiya. Fizika*, 2021, vol. 1, pp. 5–27. (In Russ.).
22. Mackenzie J. D. High-pressure effects on oxide glasses. Subsequent heat treatment [Воздействие высокого давления на оксидные стекла. Последующая термообработка]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1963, vol. 46, pp. 470–476.
23. *Литвинский Г. Г.* Аналитическая теория прочности горных пород и массивов / ДонГТУ. Донецк : Норд-Пресс, 2009. 207 с.
23. Litvinskij G. G. *Analiticheskaya teoriya prochnosti gornyh porod i massivov* [Analytical theory of the strength of rocks and massifs]. DonGTU. Doneck, Nord-Press Publ., 2009. 207 p. (In Russ.).
24. Wilson P., Vasilchenko-Malishev G. The design and construction of all glass structures [Проектирование и изготовление стеклянных конструкций*]. IASS: the International Assotiation of Spatial Structures*, 2006, pp. 118–131.
25. Dodd G. Structural glass walls, floors and roofs [Конструктивные стеклянные стены, полы и крыши]. *Structural Engineering International*, 2004, no. 14(2), pp. 88–91.
26. *Поляков С. В.* Длительное сжатие кирпичной кладки. Серия: Научное сообщение. Вып.11. М. : Госстройиздат, 1959. 183 с.
26. Polyakov S. V. Dlitel'noe szhatie kirpichnoj kladki [Prolonged compression of brickwork]. *Seriya: Nauchnoe soobshchenie*. Vyp.11. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1959. 183 p. (In Russ.).
27. *Поляков С. В.* О прочности и деформационных свойствах длительно обжатой кирпичной кладки // Исследования прочности, пластичности и ползучести строительных материалов. М. : Госстройиздат, 1955. С. 76–85.
27. Polyakov S. V. On the strength and deformation properties of long-compressed brickwork. *Issledovaniya prochnosti, plastichnosti i polzuchesti stroitel'nyh materialov* [Studies of strength, ductility and creep of building materials]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1955, pp. 76–85. (In Russ.).
28. Veer F. A., Voorden M. Using transparent intumescent coatings to increase the fire resistance of glass and glass laminates [Использование прозрачных вспучивающихся покрытий для повышения огнестойкости стекла и стеклослоистых материалов]. *Using transparent intumescent coatings to increase the fire resistance of glass and glass laminates*, 2001, pp. 392–396.
29. Bostrom L. Ageing effects of the fire resistance of building structures: Brandforsk project 322-011 [Влияние старения на огнестойкость строительных конструкций: Brandforsk project 322-011]. *Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut (SP)*, 2002, pp. 141–144.