

УДК 624.012.6

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4\(31\)-5-19](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4(31)-5-19)

РОССИЙСКИЙ И МИРОВОЙ ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПЫТАНИЙ СТЕКЛА ДЛЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

И.И. ВЕДЯКОВ, д-р техн. наук
Д.В. КОНИН, канд. техн. наук
А.А. ЕГОРОВА, канд. техн. наук
И.В. РТИЩЕВА[✉]

*Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций (ЦНИИСК) им. В.А. Кучеренко
АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 1, г. Москва, 109428, Российская Федерация*

В настоящей статье выполнен обзор и анализ научно-технической, нормативной, методической российской и зарубежной литературы, затрагивающей вопрос применения стекла в качестве материала для несущих конструкций зданий и сооружений. В связи с отсутствием стандартов на проектирование стеклянных конструкций каждый случай их использования требует экспериментальных исследований обычно одного-двух образцов, которых недостаточно для определения четкой закономерности работы материала. Соединения стеклянных конструкций изучаются крайне редко, соответственно, количество испытаний минимальное, что также не позволяет говорить об однозначной работе материала и его расчетных физико-механических характеристиках. В статье рассмотрены и оценены результаты испытаний конструкций из стекла различных авторов, у каждого из которых своя методика. Частные значения предельных напряжений и модуля деформации имеют широкий диапазон. Большое влияние на характеристики стекла, в том числе и многослойного, оказывают технология и процесс изготовления, исходные материалы. В настоящей статье определена необходимость разработки нормативных технических и методических документов, правил проектирования и испытания стеклянных конструкций, их соединений. Требуется четкая классификация несущих стеклянных конструкций по различным признакам.

Ключевые слова: термоупрочненное стекло, многослойное стекло, стеклянная конструкция, прочность, специальные технические условия, небоскреб, светопрозрачный фасад, колонна, балка

Для цитирования: Ведяков И.И., Конин Д.В., Егорова А.А., Ртищева И.В. Российский и мировой опыт исследований и испытаний стекла для несущих конструкций зданий и сооружений // Вестник НИЦ «Строительство». 2021. Т. 31. № 4. С. 5–19. doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4\(31\)-5-19](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4(31)-5-19)

Вклад авторов

Ведяков И.И. – общее руководство работой, редактирование чернового варианта статьи. Конин Д.В. – анализ экспериментальных данных, внедрение результатов в нормативную документацию, подготовка черновой версии статьи, ее окончательная редакция. Егорова А.А. – подбор и перевод иностранных источников, подробное описание, подготовка черновой версии статьи. Ртищева И.В. – обработка и анализ экспериментальных данных, подбор, перевод и анализ иностранных источников, подбор графического материала, подготовка черновой версии статьи и ее окончательная редакция.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

DOMESTIC AND INTERNATIONAL BEST PRACTICE IN RESEARCH AND TESTING GLASS FOR LOAD-BEARING STRUCTURES OF BUILDINGS

I.I. VEDYAKOV, Dr. Sci. (Engineering)
D.V. KONIN, Cand. Sci. (Engineering)
A.A. EGOROVA, Cand. Sci. (Engineering)
I.V. RTISHCHEVA[✉]

Research Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation

The present work provides an overview and analysis of scientific, technical, regulatory, and methodical Russian and foreign literature regarding using glass as a material for load-bearing structures of buildings. In the absence of design standards, an experimental study of usually one or two samples is necessary each time glass structure is used; however, this is insufficient to determine the distinct pattern of material performance. Since jointing the glass structures has been rarely studied, the number of tests is minimal, thus preventing establishing the unambiguous material operation and its calculated physical and mechanical characteristics. The article considers and evaluates the test results of glass structures obtained by various methods. The particular values of ultimate stresses and deformation modulus lie in a wide range. The technology, manufacturing process, and starting materials have a significant influence on the characteristics of glass, including multilayer glass. This article stresses the need for developing regulatory technical and methodical documents, the design and testing standards for glass structures and their jointing. It is necessary to classify load-bearing glass structures by various criteria.

Keywords: heat-strengthened glass, laminated glass, glass structure, strength, special specification, skyscraper, curtain wall, column, beam

For citation: Vedyakov I.I., Konin D.V., Egorova A.A., Rtishcheva I.V. Domestic and international best practice in research and testing glass for load-bearing structures of buildings. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2021. Vol. 31. No. 4. P. 5–19 (In Russ.). doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4\(31\)-5-19](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4(31)-5-19)

Author contribution statements

I.I. Vedyakov: general project supervision, draft editing. D.V. Konin: experimental data analysis, implementing results to codes and standards, draft preparation, final editing. A.A. Egorova: selecting and translating foreign literature sources, literature overview, draft preparation. I.V. Rtishcheva: experimental data processing and analysis; selecting, translating and analysing foreign literature sources, selecting graphical material, draft preparation, final editing.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

1. Введение

Стекло в качестве несущих конструкций используется в гражданском строительстве сравнительно недавно и активно применяется лишь последние 20–30 лет. В основном его используют как материал ограждающих конструкций. Однако с развитием строительной отрасли и потребности в уникальных зданиях и сооружениях стекло применяют в таких элементах, как полы пешеходных переходов и мостов, смотровых площадок, колонны, стойки фахверков, балок и облицовочных панелей, где используется не только светопрозрачная функция стекла, но и его несущая способность (рис. 1–4) [20, 21], накопился материал исследований. Поэтому необходимо развивать методы испытаний и расчетов конструкций из стекла для эффективного и безопасного его использования.

В настоящее время отсутствует нормативная база для несущих конструкций из стекла не только в России, но и за рубежом.



Рис. 1. Фото стеклянной крыши над столовой
Технического университета, г. Дрезден, Германия
Fig. 1. Photo of a glass roof over a dining hall in the
Technical University, Dresden, Germany



Рис. 2. Фото здания народного банка
в Ганновере
Fig. 2. Photo of the People's Bank building,
Hanover



Рис. 3. Фото входной группы в магазин Apple в Шанхае,
Китай
Fig. 3. Photo of an entrance lobby of the Apple store,
Shanghai, China



Рис. 4. Фахверковые стойки Лахта центра в Санкт-
Петербурге под фасадную систему на момент монтажа
Fig. 4. Half-timbered frames of Lakhta Center for facade
system during construction, St. Petersburg

В рамках настоящей статьи авторами представлены источники российской и зарубежной научно-технической литературы, научных статей, рассматривающих работу стекла (не только листового) [19, 22]. Ее актуальность заключается в возможности обобщить опыт применения стеклянных конструкций, определить нормируемые показатели и методики расчетов конструкций для дальнейшей разработки строительных норм. На данный момент, применяя в здании несущие конструкции из стекла, опираются только на натурные испытания для каждого уникального случая.

2. Краткий обзор российской и зарубежной нормативной литературы

В строительной нормативной документации России (ГОСТ 30826-2014 и ГОСТ Р 54171-2010 «Стекло многослойное. Технические условия», ГОСТ 30698-2014 «Стекло закаленное. Технические условия», ГОСТ 33087-2014 «Стекло термоупрочненное. Технические условия», ГОСТ 33002-2014 «Стекло и изделия из него. Методы определения механических свойств. Испытания на характер разрушения», СП 363.1325800.2017 «Покрытия светопрозрачные и фонари зданий и сооружений. Правила проектирования») и других стран [11–13] дана исчерпывающая информация о механических свойствах листового, термоупрочненного и закаленного стекла, в том числе моллированного и многослойного. Широко представлены требования по проектированию стеклянных ограждающих конструкций. Определена классификация светопрозрачных конструкций и видов стекла (ГОСТы, СП [11]). Отражены вопросы расчета вертикальных, горизонтальных и наклонных листовых стекол (СП [11–13]), требования по эксплуатации, технической и пожарной безопасности, надежности хранения и транспортирования (ГОСТы). Определены правила приемки готовых изделий, например ГОСТ Р 54171-2010, устанавливает испытательный контроль на каждую партию в пределах одной смены. Нормированы способности различных видов стекол пропускать тепловые, световые, звуковые волны, есть рекомендации, повышающие эффективность пропускных свойств [11]. Даны требования к испытаниям под воздействием разнонаправленных или влиянием эксплуатационных нагрузок для стекла, используемого в ограждающих конструкциях (ГОСТы). Действующие стандарты по проектированию ограждающих конструкций из стекла содержат, безусловно, важную, необходимую информацию, которую следует использовать для дальнейшего изучения стекла в качестве материала несущих конструкций, но в этих документах отсутствуют указания по расчету и проектированию стержней из стекла на изгиб, внецентренное сжатие, нет основных показателей механических свойств материалов и рекомендаций по их исследованию.

В настоящее время не существует международно признанных стандартов, таких как европейские нормы Eurocode или американские ANSI, по проектированию стеклянных несущих конструкций. Специалисты в разных строительных институтах занимаются частным изучением и проведением испытаний подобных элементов для единичного применения в уникальных зданиях

В настоящее время не существует международно признанных стандартов, таких как европейские нормы Eurocode или американские ANSI, по проектированию стеклянных несущих конструкций. Специалисты в разных строительных институтах занимаются частным изучением и проведением испытаний подобных элементов для единичного применения в уникальных зданиях

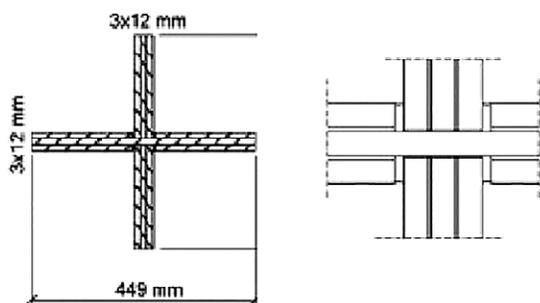


Рис. 5. Сечение крестообразных стеклянных колонн [1]
Fig. 5. Cross-section of cross-shaped glass columns [1]

и сооружениях, а также для индивидуальных проектов. Поэтому назрела острая необходимость создать нормативы для несущих конструкций из стекла.

В мировой практике подавляющее большинство несущих конструкций из стекла выполнены из двух или нескольких листов стекла, соединенных между собой. Всего проанализировано более пятидесяти отечественных и иностранных источников, рассматривающих стеклянные конструкции в качестве несущих элементов, однако наиболее интересны с практической точки зрения те материалы, которые приведены в настоящем обзоре.

3. Анализ российской и зарубежной нормативно-технической литературы, методических баз, исследовательских работ, устанавливающих требования по проектированию несущих конструкций из многослойного стекла

В нашей статье в основном рассматривается многослойное термоупрочненное стекло, так как именно его применение целесообразно для изготовления несущих конструкций.

В статье [1] описан опыт применения крестообразных стеклянных колонн (рис. 5, 6), на которые опирается крыша части здания и входная группа (рис. 10, 11) с несущим каркасом из многослойного стекла в здании г. Нордборга, Дания. Колонны 5,5 м высотой – из многослойного стекла. Основание – металлический башмак. Их подвергли мягкому и твердому механическому воздействию, которое обычно применяется при испытаниях на безопасность стекла, при осевой нагрузке 190 кН (рис. 7–9), после догрузили до потери несущей способности – 575 кН, которая оказалась достаточной, даже если колонна серьезно повреждена.



Рис. 6. Крестообразные стеклянные колонны в интерьере [1]

Fig. 6. Cross-shaped glass columns in the interior [1]



Механические воздействия на модель колонны при осевой нагрузке
Mechanical stimuli applied to column model under axial load

Рис. 7. Мягкое воздействие [1]

Fig. 7. Mild mechanical stimulus [1]

Рис. 8. Твердое механическое воздействие [1]

Fig. 8. Solid mechanical stimulus [1]



Рис. 9. Догрузка осевой нагрузкой поврежденной колонны [1]

Fig. 9. Additional axial loading of a damaged column [1]



Рис. 10. Пристроенная входная группа из стекла [1]
Fig. 10. Glass entrance lobby addition [1]

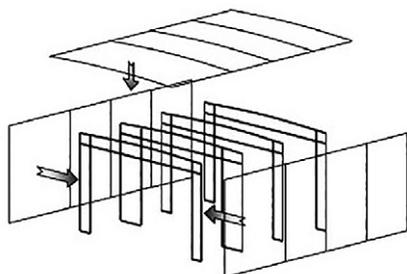


Рис. 11. Схема стеклянных конструкций входной группы [1]
Fig. 11. Scheme of glass structures of an entrance group [1]

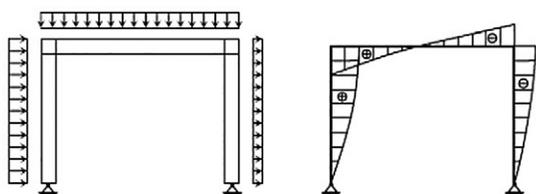


Рис. 12. Расчетная схема рамы [1]
Fig. 12. Design scheme of a frame [1]

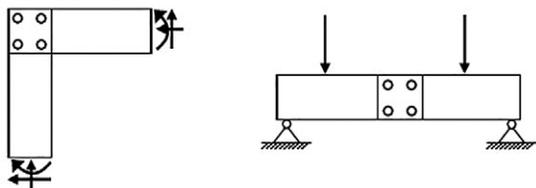


Рис. 13. Схема приложения нагрузки при испытании на изгиб [1]
Fig. 13. Load application diagram for bending test [1]

Стеклянные рамы входной группы здания (рис. 10, 11) несут стеклянные покрытия и ограждения, воспринимают нагрузку от ветра и снега (рис. 12). Рамы составлены из многослойных стеклянных балок и колонн. Основания колонн – стальные башмаки. Жесткое соединение балок со стойками обеспечивается болтовым соединением. Проведены два испытания балки с четырьмя отверстиями на изгиб, имитирующие усилия, возникающие в углах рамы (рис. 13, 14).

Результаты испытаний подтвердили надежность конструкции, но двух испытаний, очевидно, недостаточно в качестве основы для статистической оценки прочности соединения.

В статье [2] рассказывают об испытаниях колонны квадратного коробчатого сечения. Модель выполнена из листов термополированного монолитного стекла (рис. 15). Первые трещины появились при значении силы 75 кН, предельная нагрузка составила 168 кН. Во всех случаях первые трещины проявлялись над стальным башмаком из-за бокового растяжения, но колонна все еще была в состоянии нести нагрузку.

В статье не раскрыта тема расчета, но она дает определенную статистическую информацию о работе материала.



Рис. 14. Фото испытания балки с четырьмя отверстиями [1]
Fig. 14. Photo of a tested beam with four holes [1]

В статье [3] обобщается опыт коллег, проводивших испытания разных несущих конструкций из многослойного стекла. Изучены прочностные характеристики стекла, выполнен сравнительный анализ несущей способности колонн из различных материалов, раскрыта тема экономической эффективности конструкций.

На основе анализа сделаны выводы: стекло обладает хорошей прочностью при сжатии, стойкостью к коррозии и возможностью комбинирования его с другими материалами для создания несущих конструкций; прочностные характеристики будут соответствовать теоретическим, если материал будет однородным, без геометрических неточностей и повреждений. Создание такой структуры весьма трудоемкий процесс, что является главным недостатком его применения в строительстве. Данных по испытаниям в работе не приводится.

Статья [4] является обобщением диссертации М. Портер [5] и постулирует необходимость учета начальных трещин в стекле при расчетах на прочность. В этих работах предположено, что «прочностные характеристики могут быть определены при рассмотрении микротрещин, которые всегда присутствуют на поверхности материала», и предложено оценить прочностные характеристики стекла по коэффициенту интенсивности напряжений на вершине трещины.

В работе приводятся неполные данные по испытанию коробчатой стеклянной балки пролетом 1,5 м с болтовым стыком в середине пролета. Результаты относятся к монолитному (однослойному) стеклу. Вывод работы заключается в том, что необходимо проведение серии опытов для определения «вероятностных составляющих работы материала».

Диссертация М. Портер [5] рассматривает однослойное монолитное стекло. В работе приведены аналитические и численные исследования работы стекла под действием статических нагрузок. Предложено ввести в расчет положения механики разрушения по трещинам как для линейно-упругого материала. Метод расчета, названный автором «расчет по размеру трещины», заключается в определении предельного (максимального) размера (длины) трещины, для которого при стабильных напряжениях вокруг нее длина не увеличивается с течением времени. В работе приведены способы решения различных задач методом «расчета по размеру трещины». Автор ссылается на экспериментальные данные других исследователей (1958, 1970–1974, 1993, 1997 гг.).

Диссертация П.Р. Кромптон [6] рассматривает однослойное монолитное стекло. Автор считает, что к стеклу практически неприменима теория расчета по предельным состояниям, так как она подразумевает учет развития пластических деформаций, которых нет в хрупком материале – стекле. На свойства стекла оказывают влияние начальные трещины, которые

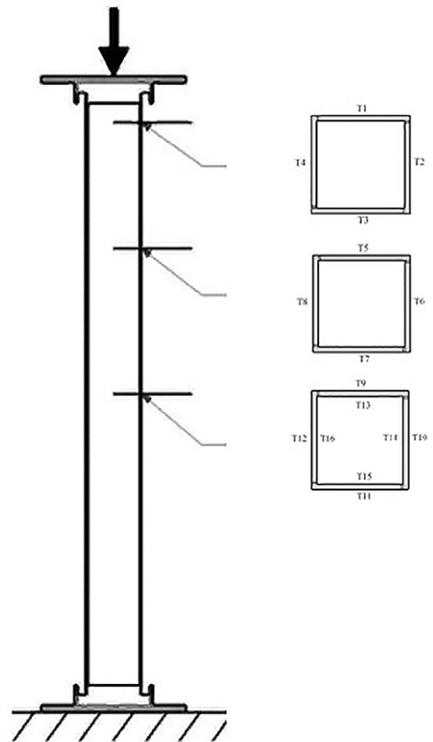


Рис. 15. Схема нагружения колонны и ее сечения [2]

Fig. 15. Loading diagram of a column and its section [2]

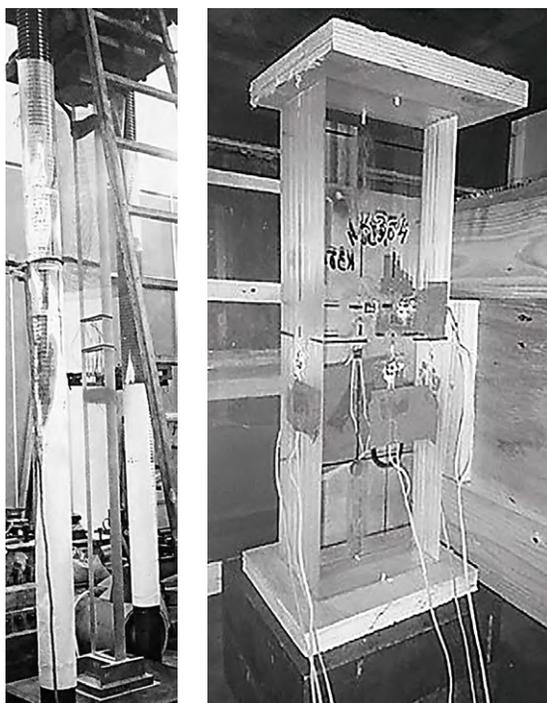


Рис. 16. Испытание колонны (слева) [7]

Fig. 16. Column test (left) [7]

Рис. 17. Испытание призмы (справа) [7]

Fig. 17. Prism test (right) [7]

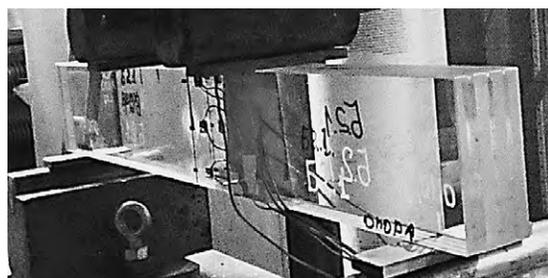


Рис. 18. Испытание балки [7]

Fig. 18. Beam test [7]

сложно идентифицировать ввиду их малого размера. Вследствие неопределенности свойств стеклянных конструкций нужно существенно резервировать прочность, в том числе с учетом возможных аварийных воздействий. Также приводится способ расчета стеклянной конструкции по допускаемым напряжениям. Данная работа содержит достаточно полные данные по результатам экспериментов со стеклянными балками, обобщенных автором.

В статье [7] освещены результаты испытаний колонн, призм и балок (рис. 16–18) из термоупрочненного многослойного стекла прямоугольного сечения. Всего испытано 18 основных образцов и около пяти дополнительных, в пробных испытаниях. Целью работы было получить расчетные сопротивления на сжатие и изгиб, определить модуль деформации и несущую способность конструкций. В статье приведены результаты испытаний по двум ступеням разрушения конструкций: 1-я ступень – начальное разрушение (появление первой трещины); 2-я ступень – окончательное полное разрушение.

В работе учтены особенности многослойного стекла: в составе сечения два материала с абсолютно разными физико-механическими характеристиками и свойствами – стекло и полимерные клеевые прослойки. Поэтому в различных направлениях сечения одного элемента физико-механические характеристики значительно отличаются между собой – это является важным выводом, ранее нигде не обсуждаемым.

По результатам испытаний доказано, что показатели прочностных свойств стекла зависят от вида приложенной нагрузки и изменяются в широких пределах, заметно ниже соответствующих нормативных значений по ГОСТ 33087-2014. Большое влияние на прочностные характеристики многослойного стекла оказывает соединительный полимерный материал, технология изготовления конструкций и стекла в частности. Применение значения расчетного сопротивления стекла по ГОСТ 33087-2014 при расчетах и проектировании стеклянных многослойных конструкций не допускается. Проблемы при изготовлении материала и действительных прочностных характеристиках стекла подробно рассмотрены в серии исследований российских ученых из Самары [15–18].

В статье [8] представлена методика расчета конструкций из многослойного термоупрочненного стекла на основании проведенных испытаний натуральных образцов на центральное сжатие, сжатие с изгибом и чистый изгиб. Испытания, результаты которых применены для разработки методов расчета, описаны в статье [7].

По результатам испытаний и анализа составлена частная методика расчета для фахверковых колонн из термоупрочненного многослойного стекла, включающая определение геометрических характеристик сечения, расчет сжато-изгибаемых элементов, устойчивости и коэффициентов продольного изгиба для центрально-сжатых элементов. Особенности расчетов являются использование различных модулей упругости в направлениях главных осей сечения: вдоль слоев сечения многослойного стекла модуль практически соответствует нормативным значениям по ГОСТ 33087-2014, поперек слоев – в два раза ниже, а также пониженное значение расчетного сопротивления относительно экспериментальных данных, низкий коэффициент продольного изгиба. Рассматриваемая методика была разработана для определенных конструкций, с конкретным составом сечения и характеристиками материала, и была подтверждена результатами численного моделирования. Результаты этой работы необходимо развить и дополнить для более широкого применения.

Ценность исследования заключается в выполнении сравнительного анализа результатов эксперимента, численного моделирования и расчета. Это дает возможность оценить надежность примененной методики расчета.

Научно-исследовательская работа [9] содержит результаты испытаний двух стеклянных балок, которые предполагалось применить в качестве прогонов покрытия атриума. Испытания проводили на натуральных образцах длиной 5,4 м. Стеклянная балка состоит из двух вертикальных пакетов триплекс. Расстояние между пакетами в свету составляет 21 мм. Сечение балки ослаблено двенадцатью отверстиями $\varnothing 26$ мм.

Образец № 1 моделировал несущую конструкцию в предположении отсутствия жесткого диска покрытия. Фото испытательного стенда представлено на рис. 19. Образец № 2 (рис. 20) моделировал конструкцию, при которой нагрузка передается строго вертикально.



Рис. 19. Испытательный стенд с установленным образцом № 1 [9]

Fig. 19. Test setup with installed sample 1 [9]



1 – траверса, передающая нагрузку на балку; 2 – фиксирующая вертикальная направляющая;
3 – фиксирующие пространственные рамы
1 – transverse transmitting load to a beam; 2 – retaining vertical guide; 3 – retaining space frames

Рис. 20. Испытательный стенд с установленным образцом № 2 [9]

Fig. 20. Test setup with installed sample 2 [9]

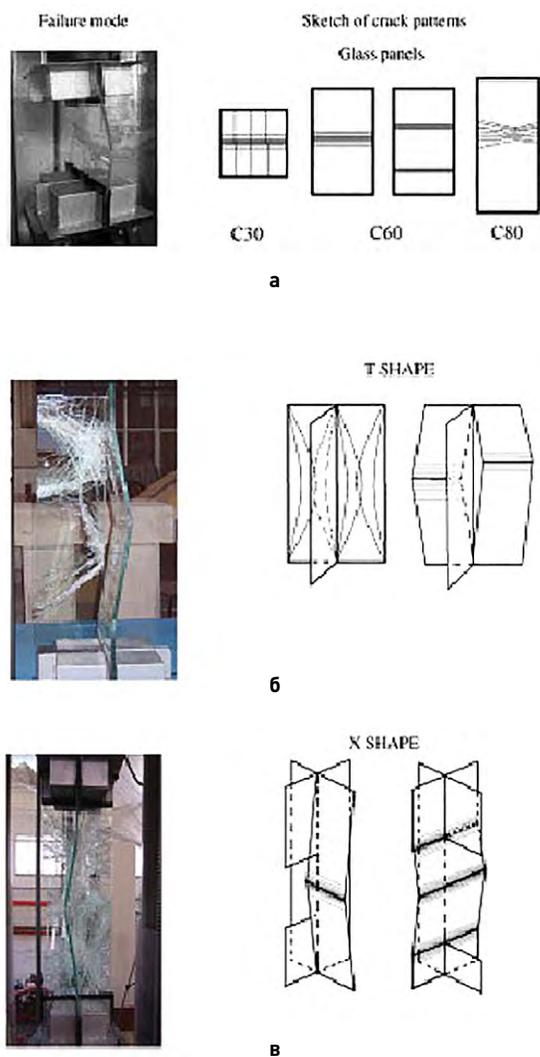


Рис. 21. Испытания на сжатие колонн: а – лист; б – форма Т; в – форма Х [10]
Fig. 21. Column compression tests: а – sheet; б – T-shape; в – X-shape [10]

Первое предельное состояние (по прочности и устойчивости) – в элементах образца № 1 – было достигнуто при значениях нагрузки, соответствующих проектной. Второе предельное состояние – превышение горизонтальных перемещений более чем на 10 мм – было достигнуто при нагрузке ниже проектной. То есть несущая способность стеклянной балки при заданных условиях не обеспечена, ее не использовали в качестве несущего элемента. Данная работа еще раз подтверждает необходимость испытаний каждой применяемой конструкции из стекла и потребность создания нормативной документации и методики испытаний.

В исследовании [10] представлены результаты испытаний на сжатие стеклянных элементов (рис. 21). Две различные серии из двенадцати колонн с двумя различными уровнями соединения были изготовлены путем сборки многослойных стеклянных панелей. Образцы имеют разную форму поперечного сечения и разную высоту. Кроме того, испытания на сжатие проводились на отдельных панелях с различной гибкостью для изучения поведения стекла при изгибе. Испытания на изгиб (рис. 22, 23) проводились на многослойных и однослойных образцах. Целью данной работы явился экспериментальный анализ устойчивости образцов из многослойного стекла и оценки способов соединения панелей. Экспериментальные результаты сравнивались с существующей аналитической моделью, доступной в литературе.

По результатам испытания в работе сделаны следующие выводы: прочность панелей на изгиб строго зависит от их гибкости; уровень соединения сильно влияет на структурное поведение элемента, что также справедливо для стандартных температурно-влажностных условий (этот факт подчеркнул важность процесса изготовления многослойного стекла); ограничение коэффициента пластичности в стеклянных колоннах не позволило избежать квазихрупкого разрушения (локальное изгибание произошло в результате малой толщины панелей, составляющих колонны); принятием формы «Т» или «Х» поперечного сечения потеря устойчивости и выпучивание были уменьшены, но произошло отслоение в месте крепления стекла

торцом, как следствие – потеря устойчивости отдельными элементами и разрушение конструкции.

Документ [14] представляет собой научно-технический отчет, составленный международной группой специалистов Евросоюза по заказу Еврокомиссии и соответствующего комитета по стандартам. Целью отчета было обобщение имеющихся знаний и практики проектирования несущих и ограждающих конструкций из стекла и создания «прототипа» Еврокода по проектированию конструкций из стекла. Отчет представлен на 208 страницах, имеет девять глав и список литературы из 275 источников.

В главе 1 предложена структура планируемого к изданию Еврокода по проектированию стеклянных конструкций. В главе 2 приведены основные положения по свойствам стеклянных материалов. Подчеркивается первостепенная важность правильного назначения коэффициентов условий работы стеклянных элементов ввиду отсутствия пластической работы и существенного разброса численных значений свойств стекла. Предложены схемы испытаний образцов из стекла на изгиб и сдвиг при статических нагрузках. Оценена возможность развития «ползучести» и релаксации напряжений при приложении динамической нагрузки по периодическому закону. Приведены примеры испытаний по работе стекла на сдвиг в целях определения «вязкоупругих» характеристик материала. В главе 3 приведены виды используемых стекол и виды их поставки (обработка кромки и поверхности), способы ламинирования поверхности и получения составных многослойных стекол. Описаны эффекты от термической гибки стекла, при которых меняются прочностные характеристики материала, что должно быть учтено при проектировании и расчетах.

В главе 4 описаны общие принципы проектирования стеклянных конструкций. Представлено описание способов определения расчетного сопротивления стекла в различных нормах (в том числе ранее рассмотренных в рамках настоящей работы).

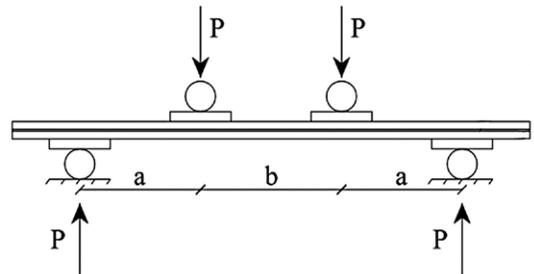
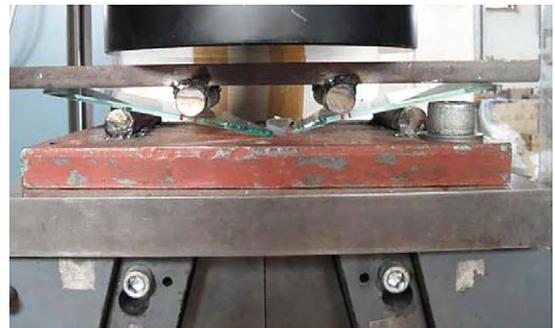
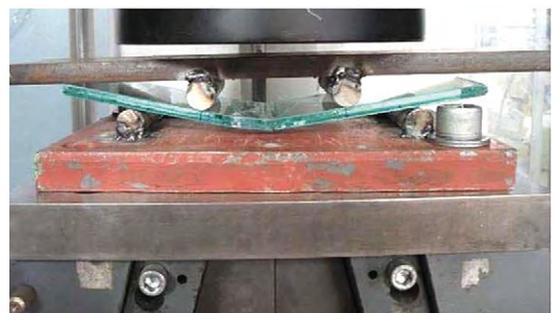


Рис. 22. Схема нагружения для испытания на изгиб [10]
Fig. 22. Loading diagram for bending test [10]



(а)



(б)

Рис. 23. Испытания на изгиб: а – однослойной панели;
б – двухслойной панели [10]

Fig. 23. Bending tests: а – single-layer panel;
б – double-layer panel [10]

В главе 5 приведены общие принципы расчета пластинчатых элементов. Показано, что расчет пластин следует вести по соответствующим формулам строительной механики с учетом опирания и их размеров. Даны соответствующие формулы для определения напряжений и деформаций в общем виде для монолитного стекла на изгиб, а также для многослойного стекла на изгиб и сжатие с изгибом. В последнем случае даны формулы, учитывающие податливость соединений слоев стекла при работе на сдвиг. Рекомендован метод конечных элементов с заданием всех необходимых деформационных характеристик материалов.

В главе 6 приведены принципы проектирования ограждающих конструкций из стекла с применением монолитных стекол и стеклопакетов (светопрозрачных фасадов, окон, перил). Приведены способы расчета креплений стекол к основным несущим конструкциям на болтах и шпонках.

В главе 7 приведены правила проектирования и расчета основных несущих конструкций из стекла: стеклянных панелей, работающих на сдвиг, балок, колонн. Каждый элемент рассмотрен в варианте монолитного и многослойного стекла. В последнем случае всегда должна быть учтена податливость соединения стекол между собой. Учитываются также способы опирания стеклянных конструкций и взаимного защемления элементов. В главе 8 представлены основные требования к соединениям несущих конструкций из стекла как со стальными элементами, так и между собой при их совместной работе.

Рассмотренный документ представляет собой законченную научную работу, материалы и положения которой целесообразно использовать при составлении свода правил по проектированию конструкций из стекла.

4. Обобщение полученных данных

Бесспорно, что расчет конструкций из многослойного стекла не должен отличаться от расчетов других известных материалов (сталь, дерево, алюминий), однако имеет ряд отличительных черт в части нормирования прочностных и деформационных характеристик. Одна из основных особенностей стекла как однослойного (монолитного), так и многослойного – хрупкое разрушение материала при ударных нагрузках или значительных статических нагрузках. Стекло является типичным хрупким материалом. Максимальное удлинение при разрушении стекла составляет всего около 0,1 %. В отличие от алюминиевых и стальных конструкций и даже железобетонных, внезапному разрушению стеклянных конструкций не предшествует накопление деформаций или трещин, которые могли бы свидетельствовать о перегрузке несущей системы.

На данный момент конструкции из многослойного стекла применяются в уникальных зданиях и сооружениях и используются в качестве: полов пешеходных переходов и мостиков, смотровых площадок, колонн, фахверковых стоек и балок. При проектировании несущих конструкций зданий из стекла предусматриваются испытания прототипа элемента, в количестве одного-двух экземпляров, редко – до пяти штук. Малочисленные эксперименты рассчитаны для единичного решения конкретной задачи. Этого недостаточно для формирования статистических данных, которые позволят использовать полученные результаты для широкого применения. При рассмотрении однотипных исследований разных авторов невозможно объединить их результаты, потому что исходные

данные различные, включая экспериментальные прототипы и модели. Вследствие малого количества моделей, участвующих в одном эксперименте, сложно оценить величину влияния внешних факторов на результаты исследований, уменьшить его или исключить. Для формирования нормативной документации и разработки точной и универсальной методики расчета стеклянных конструкций необходимо проведение более масштабных испытаний.

Требуются свод правил и руководство по проектированию стеклянных конструкций, а также стандарты на проведение испытаний, включающие методы испытания на растяжение, сжатие, изгиб, скалывание, местное смятие; правила оценки прочности, жесткости, трещиностойкости; методы определения прочности по контрольным образцам и другие возможные стандарты, необходимость в которых определяется в процессе изучения материала. Работа по научно-техническому обоснованию данного свода правил проводится авторами настоящей статьи и другими специалистами института. В 2019 г. проведены испытания монолитных однослойных балок на изгиб и сжатие с определением напряженно-деформированного состояния. Результаты испытаний согласуются с ранее полученными в лабораториях ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко при испытаниях стеклянных элементов [7–9]. Частные значения предельных напряжений имеют большой диапазон – от 39 до 141 МПа, вычисленный модуль деформации также имеет существенный разброс. Данная ситуация является характерной для элементов из стекла, что еще раз подтверждает необходимость изучения рассматриваемого материала.

5. Основные выводы и заключительные положения

1. В настоящей статье рассмотрены и проанализированы отечественные и зарубежные нормативно-технические, методические и научно-технические документы в части испытаний, расчетов и проектирования конструкций из многослойного стекла.

2. На сегодня в России и за рубежом отсутствуют нормы (своды правил, «коды» или руководства) по проектированию несущих конструкций из стекла, что является сдерживающим фактором более широкого применения светопрозрачных изделий. При проектировании стеклянных конструкций необходимо проводить серию исследований и испытаний для подтверждения работоспособности новой конструкции. Поэтому требуются общие правила по проектированию и расчету стеклянных конструкций как несущих элементов, в том числе из многослойного стекла.

3. Отсутствует стандартный подход к формированию эксперимента с конструкциями из стекла. Необходимы правила на проведение испытаний стеклянных конструкций для исследования различных видов напряженно-деформированного состояния.

4. Представленный анализ литературы позволил оценить возможности развития и применения стекла в качестве материала несущих конструкций, определить методы их испытаний и расчета. Максимальную практическую пользу предоставляет научно-технический отчет [14], который является прототипом Еврокода и охватывает практически весь спектр вопросов изучения стекла. Не менее интересны работы ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко [7, 8], поскольку содержат наиболее многочисленные эксперименты по нескольким видам испытаний, а также методики расчета.

Список литературы

1. *Petersen R.* Structural use of glass: Cruciform columns and glass portals with bolted connections subjected to bending / R. Petersen, A. Bagger // *Glass performance days.* – 2009. – P. 371–375.
2. *Kalamar R.* Load Bearing Innovative Construction from Glass / R. Kalamar, M. Eliasova // 2nd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies. (Riga, 30 sep – 2 oct. 2015 y.). – Riga, 2015. – P. 1–7.
3. Стекло как материал несущих колонн / И.С. Птухина, М.А. Дроздецкая, М.М. Числова [и др.] // *Инновации в науке.* – 2017. – № 6 (67). – С. 74–78.
4. *Демьяненко М.А.* Основы проектирования несущих конструкций из стекла / М.А. Демьяненко, П.В. Стратий // *Системные технологии.* – 2018. – № 1 (26). – С. 168–172. Porter, M. Aspects of Structural Design with glass [Electronic Resource]: Ph.D. theses / Mark Porter. – Oxford, 2001. – Mode of access: <http://surl.li/atplv>
5. *Crompton P.R.* Assessment of Design Procedures for Structural Glass Beams [Electronic Resource]: Master's thesis / Peter Robert Crompton. – Oxford, 1999. – Mode of access: <https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:f6fa362e-cdf6-48cb-bbe4-f526d8af899a>
6. Экспериментальные исследования конструкций из многослойного стекла на сжатие, сжатие с изгибом и чистый изгиб / А.А. Бубис, И.И. Ведяков, А.М. Кахновский [и др.] // *Промышленное и Гражданское Строительство.* – 2019. – № 1. – С. 22–30.
7. *Травуш В.И.* Расчеты несущих конструкций из многослойного стекла на прочность и устойчивость / В.И. Травуш, Д.В. Конин, И.В. Ртищева // *Строительство и реконструкция.* – 2018. – № 5. – С. 53–63.
8. Проведение испытаний стеклянной балки покрытия восточного крыла здания бывшего Главного штаба (Государственный Эрмитаж), расположенного по адресу: г. Санкт-Петербург, Дворцовая площадь, д. 6 – 8, с выдачей заключения о ее несущей способности: научно-исследовательская работа / И.И. Ведяков, М.Р. Урицкий, М.И. Фарфель, Л.С. Сошникова. – Москва, 2009.
9. *Campione, G.* Laminated Glass Members in Compression: Experiments and Modeling / M. Di Paola, G. Minafò // *Journal of Structural Engineering.* – 2014. – Vol. 140, no. 2. – P. 1–9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000827](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000827)
10. BS 6262-1:2017 Glazing for buildings. Glazing for buildings – Part 1: General methodology for the selection of glazing. STANDARD by BSI Group. London, 2017
11. BS 6262-2:2005 Glazing for buildings Part 2: Code of practice for energy, light and sound. STANDARD by BSI Group. London, 2005
12. BS 6262-3:2005 Glazing for buildings – Part 3: Code of practice for fire, security and wind loading. STANDARD by BSI Group. London, 2005
13. BS 6262-4:2018 Glazing for buildings. Code of practice for safety related to human impact. STANDARD by BSI Group. London, 2018
14. BS 6262-6:2005 Glazing for buildings Part 6: Code of practice for special applications. STANDARD by BSI Group. London, 2005
15. BS 6262-7:2017 Glazing for buildings Part 7: Code of practice for the provision of information. STANDARD by BSI Group. London, 2017
16. Code of practice for Design and installation of sloping and vertical patent glazing: BS 5516:1991 / British Standards Institution (BSI). – London, 1991. – 70 p.
17. Standard Practice for Determining Load Resistance of Glass in Buildings: ASTM E 1300-04. – ASTM International, 2004 – 58 p. <https://doi.org/10.1520/e1300-04>
18. Guidance for European Structural Design of Glass Components: Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes / eds.: M. Feldmann, R. Kasper, B. Abeln [et al.]. – European Union, Luxembourg, 2014. – 196 p.
19. *Зубков В.А.* Прочность листового стекла / В.А. Зубков, Н.В. Кондратьева. – Самара: СамЛюксПринт, 2013. – 152 с.
20. *Зубков В.А.* Основные причины разрушения стекла в светопрозрачных конструкциях зданий и сооружений / В.А. Зубков, Н.В. Кондратьева // *Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: материалы V международной научно-практической конференции, 17 октября 2014 года.* – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 50–56.
21. *Зубков В.А.* Научная гипотеза о строении силикатного стекла / В.А. Зубков // *Традиции и инновации в строительстве и архитектуре.* Строительство: сб. ст. – Самара: Самарский государственный архитектурно-строительный университет, 2015. – С.10–14.
22. *Зубков В.А.* Причины разрушения стекла / В.А. Зубков // *Традиции и инновации в строительстве и архитектуре.* Строительство: сб. ст. – Самара: Самарский государственный архитектурно-строительный университет, 2015. – С. 44–47.

- 20.** *Kamarudin M.K.* Structural performance of single and bundled Glass columns / M.K. Kamarudin, P. Disney, G.A.R. Parke // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2016. – Vol. 11, no. 3. – P. 1593–1599.
- 21.** *Wurm J.* Glass structures: design and construction of self-supporting skins / J. Wurm. – Berlin: Walter de Gruyter, 2007. – 255 p.
- 22.** *Leitch K.K.* Structural Glass Technology: Systems and Applications: Doctoral dissertation / Katherine Kristen Leitch. – Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- 23.** Design and experimental testing of the bundled glass column / F. Oikonomopoulou, E. van den Broek, T. Bristogianni [et al.] // *Glass Structures and Engineering*. – 2017. – Vol. 2, no. 2. – P. 183–200.

Информация об авторах / Information about the authors

Иван Иванович Ведяков, д-р техн. наук, проф., директор ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: vedykov@gmail.com
тел.: +7 (499) 171-26-50

Ivan I. Vedyakov, Prof., Dr. Sci. (Engineering), Director, Research Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: vedykov@gmail.com
tel.: +7 (499) 171-26-50

Денис Владимирович Конин, канд. техн. наук, заведующий лабораторией высотных зданий и сооружений, АО «НИЦ «Строительство» ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, Москва
e-mail: konden@inbox.ru

Denis V. Konin, Cand. Sci. (Engineering), Head of Laboratory of High-rise Buildings and Structures, Research Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: konden@inbox.ru

Анна Андреевна Егорова, канд. техн. наук, заведующий сектором несущих конструкций ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: annacniisk@mail.ru

Anna A. Egorova, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Department of Load-bearing Structures, Research Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: annacniisk@mail.ru

Ирина Владимировна Ртищева*, инженер, научный сотрудник сектора несущих конструкций ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: rtischevaiv@ya.ru

Irina V. Rtishcheva,* Engineer, Researcher, Department of Load-bearing Structures, Research Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: rtischevaiv@ya.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author