



Московский Государственный Строительный Университет
Институт Строительства и Архитектуры

ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ СО СВЕТОПРОЗРАЧНЫМИ ФАСАДАМИ И КРОВЛЯМИ

Теоретические основы проектирования
светопрозрачных конструкций

Под общей редакцией И.В. Борискиной

Инженерно-информационный
Центр Оконных Систем
Санкт-Петербург
2012

Рецензент:

Кунин Ю.С. — МГСУ, к.т.н., профессор, зав. кафедрой «Испытание сооружений», научный руководитель лаборатории «Обследование и реконструкция зданий и сооружений» (ОРЗС), Заслуженный строитель РФ.

Здания и сооружения со светопрозрачными фасадами и кровлями. Теоретические основы проектирования светопрозрачных конструкций. — С-Петербург, Инженерно-информационный Центр Оконных Систем, 2012 — 400 стр. с илл.

В книге рассмотрены и систематизированы инженерные задачи, принципиально важные для проектирования здания, имеющего значительные площади фасадного или кровельного остекления, как единой конструктивной системы, обеспечивающей архитектурную эстетику, комфортность и безопасность для человека, экологический и энергетический аспект городской среды. Проанализирована история развития «стеклянной» архитектуры и эволюция конструктивных решений, начиная от эпохи Интернационального стиля до современности. Дано описание базовых конструктивных принципов проектирования современных зданий со светопрозрачными фасадами и кровлями, а также отдельных образующих элементов светопрозрачной обложки — профильных систем, стеклопакетов, солнцезащитных устройств. Приведён комплексный анализ специфических нагрузок и воздействий, а также их сочетаний, необходимых для рассмотрения при проектировании зданий и сооружений со светопрозрачными фасадами и кровлями. Проанализировано формирование напряжённого состояния стеклянных пластин в герметичных стеклопакетах, предшествующего разрушению стекла в процессе эксплуатации. Особенный акцент сделан на описании физико-химических свойств стекла и технологических особенностях его производства, способных оказать влияние на вероятность разрушения стеклянных пластин. В рамках европейской концепции «зелёного здания» рассмотрены инновационные архитектурно-конструктивные принципы проектирования современных «стеклянных зданий», основные инженерные идеи, направленные на повышение их общей конструктивной надёжности и комфортности микроклимата.

The book is written with the aim to make some systematized view for the engineering tasks, have to be solved while construction of a building with a light transparent facade or a roof. In the modern understanding it must be constructed as a united constructive system, characterized by high quality of architectural design, security and comfort for the inhabitant, energy efficiency and a friendship to the environment both for the nature and for the town planning. It's a review of "a glass architecture" history and structural evolution from the beginning of International style architectural ideas till now days. The main structural components for light transparent envelopes — profile systems, IGUs and sun protection elements, are described. A systematized theoretical review of special loads, which must be considered while constructing a building with a light transparent envelope is made. It's also made the stress analysis for the glass plates in the isolated glass units, prefer glass breakage during exploitation period. A subject of special attention is glass production technologies, which have the influence for glass breakage. From the view of the modern European "green building" conception, analysed some innovative architectural and construction principles of a "glass building" for future.

Компетентный партнёр в вопросах возведения фасадов, светопрозрачных крыш, окон, дверей, систем для «умного дома», использования солнечной энергии

Schüco — немецкая компания, европейский лидер в области научно-технического прогресса в строительстве, в разработке и поставке систем для изготовления конструкций из алюминия, стали и пластика для любой части ограждающих конструкций и оболочки здания в целом. Используя отлично зарекомендовавшие себя системы, Schüco предлагает окна и двери с повышенной теплоизоляцией, стоечно-ригельные, модульные, поэлементные и энергосберегающие фасады с фотоэлементами, балконы и перила, внутренние перегородки, зимние сады и светопрозрачные крыши, огнестойкие, взломостойкие и пуленепробиваемые конструкции, системы солнцезащиты и преобразования солнечной энергии. Благодаря системным решениям, полностью соответствующим требованиям рынка, фирма Schüco дает возможность строить новые и модернизировать старые здания, устанавливает критерии качества и современного дизайна, обеспечивает легкость переработки и монтажа.

Наряду с поставками оборудования, профилей, фурнитуры и комплектующих, компания Schüco предлагает своим клиентам поэтапное развитие производства, непрерывное расширение ассортимента услуг и продукции, продуманные концепции сбыта и маркетинга, рекламную и техническую поддержку, отлаженную схему поставок и надежную логистику, а также предлагает специализированные программные продукты для проектирования, конструирования, расчета и монтажа. Schüco предоставляет консультативные услуги для архитекторов, проектантов и строителей, проводит семинары для клиентов по новым разработкам и программному обеспечению. Узнаваемость бренда Schüco среди конечных потребителей и системный подход при оптимальном разнообразии продукции обеспечивают фирмам-переработчикам решающее преимущество и конкурентоспособность.

Системное мышление означает для Schüco предлагать решения, ориентированные на конкретного заказчика, на специфику объекта, предоставляющие архитекторам и инженерам-проектировщикам простор для творчества. Разработки Schüco для всех областей строительства отличаются конструктивной надежностью, высоким качеством и соответствуют самым строгим техническим стандартам.



Центральное бюро Schüco KG
г. Билефельд, Германия

Особое внимание фирма уделяет качеству продукции. На всех ее предприятиях четко функционирует система управления качеством, сертифицированная по стандарту DIN ISO 9001. Обеспечение контроля качества осуществляет собственный Технологический центр в Билефельде (Германия), один из крупнейших в мире, специализирующийся на испытаниях окон, дверей, фасадов и солнечных батарей. Здесь проводится внутренний контроль соответствия новых разработок действующим нормам, и проверяются характеристики, долговечность и безопасность всей продукции Schüco. На специальных стендах Schüco проходят испытания фасадных элементов при экстремальных нагрузках и климато-физических воздействиях, включая имитацию ураганного ветра и землетрясения. Подтвержденная испытаниями в Технологическом центре Schüco системная безопасность позволяет архитекторам и проектировщикам создавать новые проекты, а также находить надежные конструктивные решения.

В Россию компания пришла в 1997 году всерьез и надолго. И это не было спонтанным решением. Компания Schüco высоко оценивает потенциал российского рынка, его широкие возможности для внедрения новых, перспективных технологий. Именно поэтому филиал фирмы в Москве создан как полноценная структура, включающая в себя два офиса, склады и учебный центр. Реализуя свою региональную концепцию, фирма открыла представительства в Санкт-Петербурге, Екатеринбурге, Нижнем Новгороде, Ростове-на-Дону, Самаре, Новосибирске, Хабаровске и других городах. Специалисты фирмы помогают организовать подготовку специалистов, осуществить поставку оборудования и его ввод в эксплуатацию, наладить производство продукции и контроль качества.

Все это позволяет фирме уверенно смотреть в будущее, строить долгосрочные планы, привлекая все новых клиентов на широких просторах России.

В дополнение к технологической компетентности есть один фактор, который, главным образом, отличает решения Schüco: готовность взять на себя ответственность, предоставляя ответы на самые насущные проблемы нашего времени — прогрессивное изменение климата и истощение энергетических запасов. Теплоизоляция, автоматизация зданий, эффективные решения преобразования солнечной энергии помогают уменьшить энергопотребление зданий, одновременно производя экологически чистую энергию. Каждое предприятие имеет свою идеологию. Для Schüco это защита природных ресурсов нашей планеты и сохранение жизни на ней. Эта стратегия нашла четкое отражение в концепции Energy³: Экономия энергии — Получение энергии — Использование энергии, которая единым лейтмотивом проходит через все разновидности продукции Schüco.



Технологический центр Schüco KG
г. Билефельд, Германия



AGCFLATGLASSEUROPE — европейский лидер в производстве полированного стекла

В 1961 г. в рамках консолидации сектора стекольного производства произошло слияние двух крупнейших производителей листового стекла: компании «Стекло и зеркала» (GlaverS.A.) и «Союза бельгийских механизированных производителей стекла» (Univerbel S.A.). Так родилась компания Glaverbel. В 1963 г. Glaverbel расширила свою деятельность до Нидерландов, построив завод по производству армированного стекла в г. Тиле. В 1965 г. Glaverbel открывает первый на европейском континенте завод по производству флоат-стекла в местечке Мустье (Бельгия). В 1972 г. Французская Группа BSN (Danone) приобретает Glaverbel и интегрирует компанию в свое подразделение по производству листового стекла. В последствии компанию Glaverbel приобретает японский концерн Asahi, основанный в 1907 году (AsahiGlassCo., Ltd). Получив широкую автономию управления, Glaverbel развивает свою деятельность в Восточной Европе через осуществление инвестиций, создание партнерств и поглощение других компаний. В 1997 г. Glaverbel становится первым западным производителем стекла, осуществившим инвестиции в России путем покупки акций компании, которая сегодня известна как AGCBorGlassworks (ОАО «Эй Джи Си БСЗ»).

В 1998 г. Glaverbel приобретает европейский бизнес по производству листового стекла компании PPGGlassIndustries, сосредоточенный главным образом во Франции и Италии. И, наконец, Glaverbel закрепляет свои лидирующие позиции в России благодаря возведению в 2004 г. в Клину (Московская область) производственного комплекса (производство флоат-стекла, зеркал и стекла с покрытиями). Это первый завод, построенный в России «с нуля» западной стекольной компанией.

В 2007 г. AGC принимает решение о переходе всех своих подразделений на единое название — Glaverbel становится AGCFlatGlassEurope.

AGCGlassEurope работает в четырех отраслях: полированное стекло, автомобильное стекло, производство дисплеев различного назначения, а также имеет ряд химических предприятий. Базирующаяся в Брюсселе компания AGCGlass объединяет в себе все виды деятельности AGC по производству и переработке листового стекла, главным образом для нужд строительного сектора. Компания насчитывает 36 заводов по производству флоат-стекла, расположенных в Европе, Северной Америке и Азии.

Сегодня компания AGC в России предлагает продукты мирового качества, произведенные в Европе и на территории Российской Федерации. Слоган компании «Glassunlimited — Стекло без границ» отражает обширные возможности и перспективы партнерства. AGC в России это:

- Компания AGCGlassRussia, управляющая предприятиями Группы на территории России, — двумя заводами и сетью дистрибуционных центров, в Москве Санкт-Петербурге, Нижнем Новгороде, Новосибирске, Иркутске, Екатеринбурге, Ростове-на-Дону и Казани. Основное направление AGCFlatGlassRussia — реализация архитектурного и интерьерного стекла, консультационная поддержка и техническое сопровождение крупных архитектурных проектов.

- Стекольный завод AGCFlatGlassKlin, в г. Клин Московской обл., оснащенный 2-мя линиями по производству флоат-стекла, линией по нанесению низкоэмиссионного магнетронного покрытия, оборудованием для производства зеркал и многослойного стекла.

- Эй Джи Си Борский стекольный завод AGCBorGlassworks в Нижегородской области, оснащенный 2-мя современными флоат-линиями общей производительностью более 1 100 тонн листового стекла в день и оборудованием, позволяющим ежегодно производить более 1 400 000 комплектов многослойного автомобильного стекла

Миссия компании AGC: «Видим будущее вместе — Сделаем мир ярче», объединяет ведущие ценности: инновации и мастерство исполнения, разнообразие, защита окружающей среды, честность. На основе богатого многолетнего опыта, накопленный в течение многих лет, специалисты компании предоставляют полнотехническую поддержку проектов, начиная от стадии дизайн-проекта и выбора цветовой палитры, до комплексного технического расчета с применением современных вычислительных комплексов.



Башня на набережной,
г. Москва



Стекольный завод AGC Flat Glass Klin, п. Спас-Заулок

Предисловие

На протяжении тысячелетий человечество создавало знаковые архитектурные сооружения, отражающие мировоззрение и идеологию общества на определённом этапе развития. От древнейшей истории до современности они являются символом единства высокой архитектурной эстетики и профессионализма строительного инженера.

Динамика развития промышленности и социально-культурных традиций XX столетия привели к созданию нового типа респектабельных зданий со зрительно невесомыми, частично или полностью прозрачными фасадными оболочками и кровлями из стекла, отражающих жизненный принцип свободы, технического прогресса и гармоничного сосуществования человека с природой. Новый тип общественных отношений, разрушивший идею обособленности личности в пределах замкнутого пространства, положил начало так называемой «стеклянной архитектуры», — одной из самых дискуссионных проблем современности, как непосредственно для населения крупных городов, так и для профессионального архитектурно-строительного сообщества.

Несмотря на то, что современное строительство «стеклянных» зданий и сооружений не остановилось в развитии, находясь в постоянном поступательном поиске новых, более совершенных, конструкций, технологий и архитектурных концепций, существует ещё достаточно много проблем, порождающих многочисленные разногласия среди профессионалов во всём мире. Анализируя этот опыт, мы можем увидеть значительный временной этап, отделяющий современное здание такого типа от некоторого устоявшегося конструктивного совершенства и эталона, в достаточной степени присущего отработанным и опробованным временем традиционным зданиям с незначительной долей наружного остекления.

Переход от относительно простой конструктивной идеи окна, обеспечивавшего доступ света и воздуха в жилище, к полностью остеклённым фасадам и кровлям обозначил качественно иной уровень требований к светопрозрачным конструкциям и соответственно, — новое теоретическое направление в инженерно-строительной науке. Возникла необходимость некоторого нового видения методов расчёта и проектирования лёгких пространственных наружных оболочек зданий, принципиально отличающихся от применявшихся ранее для ограждающих конструкций. В дополнение к традиционным для окон подходам на базе закономерностей строительной физики (теплофизики, светотехники и строительной акустики), возникла необходимость учёта деформаций и прогибов стержневых элементов профильной системы и листового стекла, традиционно изучаемых в разделах теории упругости и сопромата. На качественно другой уровень вышла проблема построения безопасной и надёжной конструктивной схемы здания с учётом возможного хрупкого разрушения стекла

на стадии эксплуатации, часто трудно прогнозируемого и непредсказуемого во временном аспекте. Значительно расширилась рамки задачи, связанной с обеспечением комфортности микроклимата в здании на протяжении круглогодичного эксплуатационного периода.

В предлагаемой Вашему вниманию книге сделана попытка обобщить и систематизировать инженерные задачи, принципиально важные для проектирования здания, имеющего значительные площади фасадного или кровельного остекления, как единой конструктивной системы, обеспечивающей архитектурную эстетику, комфортность и безопасность для человека, экологический и энергетический аспект городской среды.

Пространственные светопрозрачные оболочки — навесные светопрозрачные фасады и большепролётные кровельные покрытия, рассмотрены с позиции выбора конструктивной схемы на основе анализа специфических нагрузок, воздействий и их сочетаний, характерных для зданий подобного типа и не учитываемых при проектировании традиционных сооружений.

Понимая необычайно широкий спектр архитектурных, конструктивных и технологических возможностей современных профильных систем и стеклопакетов, мы ограничились наиболее общими принципами, заложенными в основе их конструирования, а также базовыми предпосылками и характеристиками, используемыми в современных методах расчётов, и отражённых в соответствующих европейских нормативных документах.

По структуре, стилю изложения и постановке задачи эта книга является, прежде всего, исследовательской монографией. В её основу положен опыт экспертных обследований, проведённых авторами в различные годы на объектах г.Москвы, результаты научных работ, выполненных в Московском Государственном Строительном Университете, а также технологический опыт концернов SCHÜCO KG и AGC Flat Glass Europe (Asahi Glass Corp.), выступивших в качестве генеральных спонсоров издания.

Хотя настоящая работа в определённом смысле развивает научные концепции и идеи написанного ранее учебника «Проектирование современных оконных систем гражданских зданий», читателю не следует рассматривать её в качестве второго тома указанной книги. В отличие от учебника, впервые опубликованного в 2000 году с целью формирования у будущего инженера-строителя первоначальных знаний о светопрозрачных конструкциях, в данном случае мы предполагали более высокий уровень профессиональной квалификации читателя, непосредственно осуществляющего практическую деятельность в области проектирования зданий и сооружений. Предполагаем, что книга может также быть успешно использована в программах обучения строительных кадров высшей квалификации, а также специалистами компаний, занимающихся изготовлением и монтажом светопрозрачных конструкций.

Над книгой работал авторский коллектив специалистов в следующем составе:

Борискина Ирина Васильевна — к.т.н., зав. сектором «Светопрозрачные конструкции» лаборатории ОРЗС кафедры «Испытания сооружений» МГСУ

Плотников Александр Александрович — к.т.н., профессор кафедры «Архитектура гражданских и промышленных зданий» МГСУ

Захаров Аркадий Васильевич — к.т.н., профессор кафедры «Проектирование зданий» МГСУ

Щуров Анатолий Николаевич — к.ф.-м.н., лауреат Государственной премии СССР, доцент кафедры «Оптические приборы для научных исследований» МВТУ им. Н.Э. Баумана

Константинов Александр Петрович — инж., ассистент кафедры «Архитектура гражданских и промышленных зданий» МГСУ

Стратий Павел Васильевич — инж., ассистент кафедры «Архитектура гражданских и промышленных зданий» МГСУ

Дербина Светлана Николаевна — инж., аспирант кафедры «Испытания сооружений» МГСУ

Киселёва Ирина Игоревна — инж., руководитель отдела продукт-менеджмента металлоконструкций ЗАО «ШУКО Интернационал Москва»

Глава 1 написана *И.В. Борискиной*. **Глава 2:** раздел 2.1. — *И.В. Борискиной и И.И. Киселёвой*; раздел 2.2. — *И.В. Борискиной и А.П. Константиновым*. **Глава 3:** раздел 3.1. — *П.В. Стратием и И.В. Борискиной*; разделы 3.2 и 3.3 — *И.В. Борискиной и И.И. Киселёвой*. **Глава 4:** Раздел 4.1 — *И.В. Борискиной, А.А. Плотниковым, А.Н.Щуровым*; Раздел 4.2 — *А.В. Захаровым и И.В. Борискиной*; Раздел 4.3 — *А.А. Плотниковым, П.В. Стратием и И.В. Борискиной*; Раздел 4.4 — *И.В. Борискиной и А.А. Плотниковым*; Раздел 4.5 — *А.П. Константиновым, А.А. Плотниковым и И.В. Борискиной*; Раздел 4.6 — *И.В. Борискиной и И.И. Киселёвой*; Раздел 4.7 — *И.В. Борискиной и А.А. Плотниковым*; **Глава 5** — *И.В. Борискиной, А.А. Плотниковым и Дербиной С.Н.*

Авторский коллектив выражает благодарность генеральным спонсорам — предприятиям SCHÜCO KG и AGC Flat Glass Europe (Asahi Glass Corp.); а также глубокую личную признательность за помощь в подготовке издания — сотрудникам ЗАО «ШУКО Интернационал Москва»: техническому директору Томасу Эшенбаху, продукт-менеджеру Ивановой Е.С.; сотрудникам российского подразделения AGC Flat Glass Europe: директору по маркетингу Варгановой М.Ю., менеджеру по продукту фасадное остекление Егорову М.В.

Будем также благодарны за отзывы и критические замечания, e-mail: ira-boriskina@mail.ru; orzs@mail.ru



Светопрзрачные ограждающие конструкции в архитектуре современных зданий и сооружений. Развитие архитектуры, конструкций и технологий

- 1.1. Функциональный и эстетический аспект использования стекла в архитектуре. Исторические и философские основы формирования Интернационального стиля.
- 1.2. Развитие архитектуры, конструкций и технологий

This chapter is devoted to the history of glass construction from the beginning of International style architectural ideas to now days. It illustrates some theoretical principles of "glass architecture" and the development of structural engineering of light transparent structures primarily for the period after world war II. It's also shown an evolution of glass in building significance — the transition from the minimum required functional use for lighting to a new philosophy of open spaces, creating a new aesthetics and architectural sense.

1.1. Функциональный и эстетический аспект использования стекла в архитектуре. Исторические и философские основы формирования Интернационального стиля

Стекло и его конструкционные свойства известны человечеству с древнейших времён. Однако только в XX столетии человек по-настоящему рассмотрел в стекле не только предмет эстетики, но и исключительный по своим свойствам строительный материал, обладающий особой архитектурной выразительностью и символизирующий развитие технического прогресса и процветание.

На протяжении последнего столетия в истории человечества, ни один другой строительный материал не вызывал столько разнообразных обсуждений и споров по поводу целесообразности применения в архитектуре различных зданий и сооружений. Эти споры не имеют окончательного завершения и сегодня; при этом архитектурное и конструктивное развитие систем современного строительного остекления является самым динамичным из всего многообразия ограждающих конструкций.

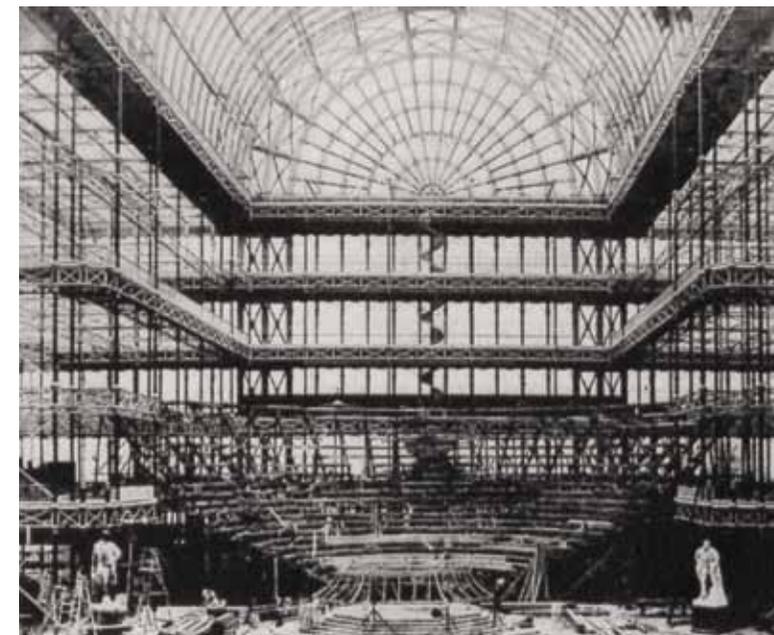
Общепризнанной точкой отсчёта новых возможностей строительного стекла считается возведение центрального павильона Всемирной выставки в Лондоне 1851 г., — Кристал-Паласа, или так называемого Хрустального Дворца, построенного по проекту инженера, специализировавшегося на строительстве теплиц, — Джона Пэкстона (рис. 1.1).

Главное здание Всемирной выставки заняло в Гайд-парке — центре выставочной территории — громадную площадь — 71 800 м². Длина центрального пролёта составляла более полукилометра — 563 м, ширина — 124 м. В разрезе здание представляло собой усеченную пирамиду с центральным продольным нефом высотой 19,5 м и с поперечным нефом, возвышавшимися над всем зданием. Центральный зал имел высоту 33 м. Объем здания членился тремя ступенями, образовавшими боковые нефы меньшей высоты.

Конструкция здания была основана на применении стальных колонн общим числом 3300 шт., стальных рам со стеклянным за-

полнением и ферм покрытия. Важнейшей особенностью конструкции было применение исходного размера — модуля в 24 фута (7,3 м): именно этим расстоянием были разделены между собой несущие столбы. В основу конструктивной системы была положена

Рис 1.1.1.
Хрустальный дворец — павильон Всемирной выставки в Лондоне, 1851 г. Инженер Джон Пэкстон.
Общий вид, фрагменты и интерьер.



стандартная клетка: стеклянная плита размером в 122 x 25 см. Три плиты этого размера заключались в одну железную раму, и из этих совершенно одинаковых рам и было составлено все заполнение. В то же время длина рамы соответствовала расстоянию между несущими колоннами: исходный модуль был выдержан, таким образом, во всей композиции.

Кристал-Палас стал поистине великолепным вместилищем для выставочных экспонатов — предельно светлым и предельно легким. В прозрачной галерее, протянувшейся более чем на полкилометра, разместились самые разнообразные экспонаты, отражавшие как производственные успехи нарождающегося промышленного капитала, так и продукты ручного труда — ремесленной традиции «доброй старой Англии».

Сооружение Хрустального дворца вызвало неоднозначную реакцию, как среди многочисленных посетителей выставки, так и среди профессиональных архитекторов. Несмотря на то, что Хрустальный дворец стал, безусловно, знаковым сооружением, этот первый опыт Пэкстона вряд ли можно классифицировать как первый системный шаг в развитии нового архитектурного направления. Возведение Кристал-Паласа скорее чётко обозначило распад единого ранее зодчества на искусство и инженеррию. Идея сооружения, призванного символизировать прогресс новой техники, исходила не от архитектора. Эта идея реализовалась вне какого бы то ни было архитектурного стиля, вне какой-либо признанной архитектурной системы.

Вряд ли Пэкстон, посылая на конкурс свой проект, ставил перед собой архитектурные задачи, выходящие за рамки чисто технической проверки тех материалов и конструкций, с которыми он имел дело в своей специальной прикладной области — строительстве оранжерей. В связи с этим интересно отметить, что **яркий эстетический эффект в сооружении Хрустального Дворца был достигнут неосознанно, и был получен исключительно за счёт прозрачных наружных стен и кровли выставочного павильона.**

Очевидно, что работа Пэкстона открыла новые технические возможности для развития архитектурного творчества, однако, при этом она не стала началом реального переосмысления со сто-

роны профессиональных архитекторов, имевших академическое художественное образование.

В конце XIX — начале XX вв., светопрозрачные строительные конструкции развивались исключительно как элемент инженерного искусства. По этой причине за пределами исследовательских работ в области архитектуры строительного остекления остались, например, такие знаковые сооружения г. Москвы как здание Верхних торговых рядов (ныне здание ГУМа) и гостиница «Метрополь», имевшие большепролётные светопрозрачные покрытия, возведённые по проекту выдающегося русского инженера В.Г. Шухова.

Здание Верхних торговых рядов — одного из самых крупных пассажей в Европе, построенное в 1889—1893 гг. (рис. 1.1.2), по проекту архитектора А.Н. Померанцева и инженеров В.Г. Шухова и А.Ф. Лолейта, имело площадь торговых помещений более 25 200 м². Светопрозрачное покрытие каждой из трёх основных галерей пассажа выполнено в виде металлической арки с затяжкой с пролетом 14 м (на 5,5 м меньше пролёта центрального нефа Хрустального дворца). На покрытие каждой галереи потребовалось больше 20 000 м² стекла^[7].

Здание гостиницы «Метрополь» (рис. 1.1.3), возведённое несколько позднее Верхних торговых рядов, — в 1898—1903 гг. может быть рассмотрено как одно из первых современных гражданских зданий, где светопрозрачные конструкции были использованы в качестве неотъемлемого элемента архитектурного стиля.

Рис 1.1.2.
Светопрозрачное
покрытие здания
ГУМа в Москве.
Инж. В.Г. Шухов,
1889–1893 гг.

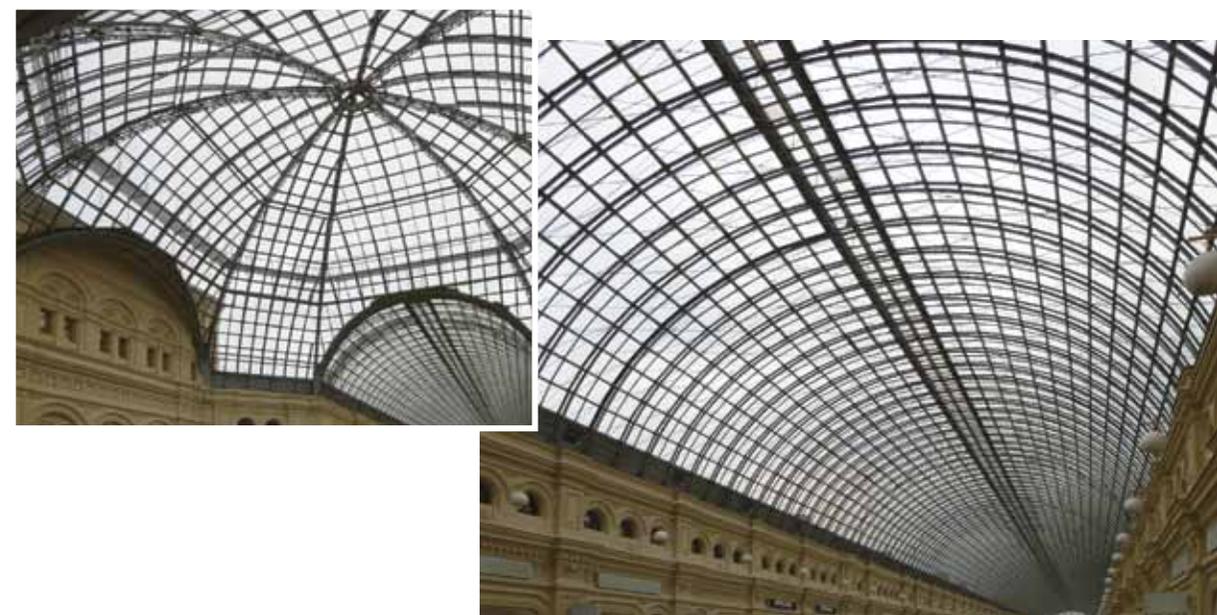




Рис 1.1.3.
Гостиница
«Метрополь»
в Москве. Арх.
В.Ф. Валькотт,
инж. В.Г. Шухов,
1898–1903 гг.

Стеклокristалл покрытия над главным залом завершает объём здания, в котором доминируют стилизованные плоские фронтоны, заполненные поэтическими образами майолик М.А. Врубеля и А.Я. Головина. Законченность архитектурной композиции выразительно подчёркивается элементами фасадного остекления в виде выступающих стеклянных эркеров.

Инновационные технические решения строительных инженеров оставались в стороне от архитектурно-художественного творчества и градостроительных концепций вплоть до начала XX столетия, когда идеологи архитектурных течений обратились к Хрустальному дворцу как к прообразу новой архитектуры.

Вплоть до этого времени стекло в архитектуре продолжало рассматриваться в качестве «подсобного», утилитарного материала, а применение светопрозрачных конструкций развивалось в сфере торговых зданий и промышленной архитектуры, которую архитектурная критика конца XIX — начала XX вв. не относила к области художественного творчества.

В качестве современников здания ГУМа могут быть названы такие европейские торговые сооружения как Галерея Виктора Эммануила II в Милане (1861 г.), спроектированная Джузеппе Менчони; Галерея Умберто в Неаполе (1887 г.), спроектированная Эрнесто Мауро; крытые дворы универмага Бон Марше, возведённые в 1876 г. по проекту архитектора А.А. Буало и инженера Густава Эйффеля.

Рис. 1.1.4.

Первые производственные здания с полностью остеклёнными наружными стенами.

Ленточные окна в наружных стенах цехов первыми стали применять английские строители в последней четверти XIX века. А к первым промышленным зданиям с полностью остеклёнными наружными стенами относятся турбинный завод АЕГ (арх. П. Беренс) и обувная фабрика Адольфа Майера Фагуса (арх. В. Гропиус), построенные в 1909 и 1910 годах в Германии (рис. 1.1.4).



а) Турбинный завод АЕГ, Берлин, Арх. П. Беренс. 1908–1909 г.



б) обувная фабрика Адольфа Майера Фагуса в Альфельде (Германия). Арх. В. Гропиус. 1910 г.

В середине XIX в. искусственное освещение ещё не достигло достаточного технического уровня. Соответственно, как в торговых, так и в промышленных зданиях этого времени применение остеклённых стен и кровель было продиктовано очевидной необходимостью, связанной с обеспечением максимально возможного естественного освещения. **На уровне развития технических возможностей того времени, светопрозрачные конструкции большой площади фактически являлись единственным решением, позволяющим обеспечить как эффективный технологический процесс на производстве, так и показать большую массу товаров — особенно в многопрофильных универсальных магазинах.**

В историческом контексте примечательно, что своему переходу в новое качество — от материала утилитарного, использовавшегося для закрывания светопроёмов, к материалу формообразующему, играющему одну из главных ролей в формировании стиля, строительное остекление обязано двум диаметрально противоположным вещам — становлению промышленного и финансового капитализма в Америке и Октябрьской социалистической революции в России. Проявлением первого стали «стеклянные» небоскрёбы, символизирующие концентрацию деловой активности, могущество и достижения технического прогресса. Революция в России провозгласила принципы классового равенства и новый образ зданий «для народа» — доступного жилья, административных и культурно-зрелищных комплексов. Остекление в архитектуре советского конструктивизма 20-х годов символизирует стремление к свободе, свету, раскрепощённости.

Таким образом, именно 20-е годы прошедшего столетия положили начало системному осмыслению роли светопрозрачных конструкций в архитектуре и стали периодом зарождения так называемого Интернационального стиля, объединившего оба исторических процесса идеями индустриализации и развития новых строительных технологий.

Формирование теоретических основ использования стекла в архитектурной композиции по общему признанию связывается с именами двух главных идеологов этого направления. Французского

архитектора Шарля Эдуара Жаннере, родившегося в Швейцарии и более известного под художественным псевдонимом Ле Корбюзье (принятом в 1920 году), и немецкого архитектора Миса Ван дер Роэ — родоначальника «стеклянных» небоскрёбов.

С начала 20-х годов идея окна, трансформируемого в ленточное остекление, занимает центральное место в творчестве Ле Корбюзье. С завидной настойчивостью он отстаивает новое видение этой конструкции в архитектуре перед заказчиками, коллегами и критиками.

В 1923 году на берегу Женевского озера в Корсо под Вевеем он выстраивает небольшой дом для родителей (рис. 1.1.5), вынужденных продать свою виллу в Ла Шо-де-Фоне. Несмотря на скромные размеры, этот дом знаменует важную веху в размышлениях архитектора по поводу соотношения пространства внутренних помещений и окружающего пейзажа.

В своей книге о творчестве Ле Корбюзье Жан Луи Коэн отмечает:^[9] «Белое оштукатуренное бунгало в форме простого прямоугольного параллелепипеда смотрит в сторону озера «единственным окном длиной в одиннадцать метров», которое «соединяет и освещает», «приносит в дом всю роскошь великолепного расположения».

Рис. 1.1.5.

Вилла «Ле Лак», 1923–1925, Рут-де-Лаво, Корсо (Вевей), Швейцария. Арх. Ле Корбюзье.



В 1924 году Ле Корбюзье получил от промышленника Анри Фруже заказ на проектирование посёлка для рабочих на земельном участке в Пессаке, где архитектор реализует принцип массового производства строительных элементов за счёт разработки ленточных окон, основанных на модульных элементах (рис. 1.1.6).

Несмотря на то, что книги Ле Корбюзье, в которых он сформулировал своё видение новых конструктивных концепций, стали одними из наиболее заметных теоретических трудов, оказавших влияние на архитектуру XX столетия, в реальной жизни его идеи долгое время не были приняты.

Так после Второй мировой войны многие жители посёлка Пессак частично закладывали ленточные окна, чтобы получить квадратные оконные проёмы. По этому поводу Корбюзье заметил: «Жизнь права, а архитектор — нет»^[9]. Их желания парадоксальным образом совпадали с убеждениями известного архитектора

Рис. 1.1.6.

Жилой дом
в посёлке Пес-
сак, Франция.
1924–1926. Арх.
Ле-Корбюзье.



Перре, с которым Ле Корбюзье по поводу ленточного окна спорил до 1925 года. Перре считал, что «окно — это личность», соответственно оно должно «стоять как человек и иметь вертикальный проём»^[9].

Окончательное право на жизнь ленточное остекление приобретает только в проектах больших вилл в элитарных парижских предместьях, заказы на которые Ле Корбюзье начал получать с 1926 года. Наибольшую известность из этих сооружений получили вилла семьи Стайн-де Монзи в Гарше (ныне эта местность относится к Воскрессону) (рис. 1.1.7) и вилла владельца страховой компании Пьера Савой в Пуасси (рис. 1.1.8).

Рис 1.1.7.

Вилла Стайн —
де Монзи в Гар-
ше (Франция).
1926–1928 гг.,
арх. Ле Корбу-
зье.



Рис 1.1.8.

Вилла Савойе
(Франция). 1926–
1928 гг., арх. Ле
Корбюзье.

Примечательно, что первое крупное сооружение по проекту Ле Корбюзье, в котором были реализованы принципы «открытой архитектуры» — свободных пространств, единства внутренней среды и окружающего ландшафта, было возведено в конце 30-х годов в обновляемой послереволюционной Москве. Композиция здания Центросоюза (ныне здание Госкомстата) на Мясницкой улице (рис. 1.1.9), возведённого в соавторстве с архитектором Н.Колли, была проста, логична и состояла из трёх корпусов-параллелепипедов — главного и двух боковых. В основу конструктивной системы был положен каркас, образуемый несущими колоннами. Здание имело свободную планировку, плоскую крышу и сплошное ленточное остекление главного фасада, обрамлённое по контуру розовым армянским туфом.

Рис 1.1.9.

Здание Центросоюза в Москве. Арх. Ле Корбюзье. 1929–1936 гг.



Рис. 1.1.10.

Фарнsworth Хаус, США, штат Иллинойс, 1946–1951 гг., арх. Мис Ван дер Роэ



Несмотря на то, что остекление играет одну из ключевых ролей в творчестве Ле Корбюзье, оконные конструкции здесь всё-таки остаются в пределах разумного; они не играют главной, доминирующей роли — не подавляют функциональную целесообразность здания в целом.

Эта фактически неощутимая грань разумного, функционального применения стекла полностью ломается в работах выдающегося немецкого архитектора Миса Ван дер Роэ. Именно ему — идеологу новой, неизвестной ранее архитектуры, принадлежит идея создания абсолютной формы, свободной от исторического контекста и прихотей моды, и выражающей мистическую идею единения человека с природой. В философии Миса эта идея обретает законченное и, можно сказать, пиковое содержание.

Апофеозом этой идеи стал знаменитый Фарнsworth Хаус — «стеклянный дом», возведённый по проекту Миса Ван дер Роэ в одном из живописных уголков Америки на берегу Фокс-ривер, штат Иллинойс, в 1951 году, и по праву вошедший в число знаковых объектов современной архитектуры (рис. 1.1.10).

Дом был построен в заливаемом лугу на берегу Фокс-ривер и имел полностью остеклённые стены по всему периметру.

Несущий металлический каркас дома был образован широкополочными прокатными профилями — двутаврами колонн и швеллерами горизонтальных несущих балок. Профили несущего каркаса были тщательно отполированы и выкрашены в белый цвет, — таким образом, обитатели дома через стеклянные стены могли наблюдать луг и растущие вокруг деревья, заключённые в белую рамку.

Несмотря на то, что как профессиональными критиками, так и непосредственно заказчиком — доктором Эдит Фарнворс, дом был, в конце концов, признан совершенно непригодным для жилья, имеет смысл описать впечатление, оставшееся у гостей дома во время своего кратковременного в нём пребывания.

«Летом большая комната плывёт над зелёным лугом, её видимые границы, простираются до экрана из крон лиственных деревьев, окружающих дом, а высоко стоящее солнце, отражаясь от известкового туфа на крытой террасе, заливают потолок ярким светом. В солнечные дни, ярко освещённые белые стальные профили несущих конструкций, становятся строже и отчётливее; в пасмурные дни их архитектурная выразительность подчёркивается диффузным светом: они хорошо просматриваются даже из самых дальних уголков луга. Лето — это, кроме того, сезон гроз: нахождение за стеклянными стенами во время грозы, когда вокруг проливной дождь с крупным градом, раскаты грома и отблески молний, — оставляет неизгладимое впечатление от агрессивного облика природы.

Осенью зелёные краски сменяются золотыми, с тем, чтобы быть сменёнными зимним очарованием, когда прерия, наконец, становится белой на многие недели, снег освещается лучами низкого солнца, а голые деревья позволяют смотреть вдаль через замёрзшую реку Фокс. Днём скользящие лучи солнца отражаются от снежной равнины; падая на фасад дома и проникая внутрь него, проецируют картины природы на экранах из занавесей и штор, создают эффект мягкого освещения внутреннего пространства. Ночью блестящий снег отражает в дом лунный свет, мистически стирая границу между внешним миром и внутренним миром, созданным человеком»^[39].

«Неописуемое ощущение — процесс пробуждения и перехода к бодрствованию, когда занимается и насыщается светом заря.

Восходящее солнце освещает траву, деревья и реку вдали; оно захватывает весь ваш взгляд. Ты одновременно находишься внутри природы и вне её, поглощённый ею и от неё отделённый. Всё вместе — незабываемо»^[39].

Таким образом, если сосредоточиться на чисто психологическом воздействии архитектуры, то Фарнворте Хаус вобрал в себя ту высшую его степень — от состояния кратковременного стресса до глубоко комфортного ощущения, которые реализуются на уровне подсознания, и не могут быть созданы никаким другим строительным материалом наружных ограждений, кроме стекла. В дальнейшем этот мощный психо-физический фактор был использован многими архитекторами в большей или меньшей степени на различных объектах, часто полуосознанно, а в ряде случаев — целенаправленно в качестве главного средства архитектурной выразительности.

Не удивительно, что именно в стекле и в стеклянных стенах была найдена идея «антигравитации» — создания зрительно неустойчивой формы здания. Она, как правило, ярко выражается

в наклонных наружных стенах вместо вертикальных, нарочитом сужении здания от верха к низу или в опирании здания на основание через одну точку.

Антигравитационная идея была впервые предложена в 1927 году советским архитектором Иваном Леонидовым в его знаменитом дипломном проекте здания института имени Ленина в Москве. В комплекс этого сооружения было включено стеклянное здание-шар — амфитеатр, опёртый на одну точку, и поддерживаемый внешними растяжками-вантами (рис. 1.1.11).

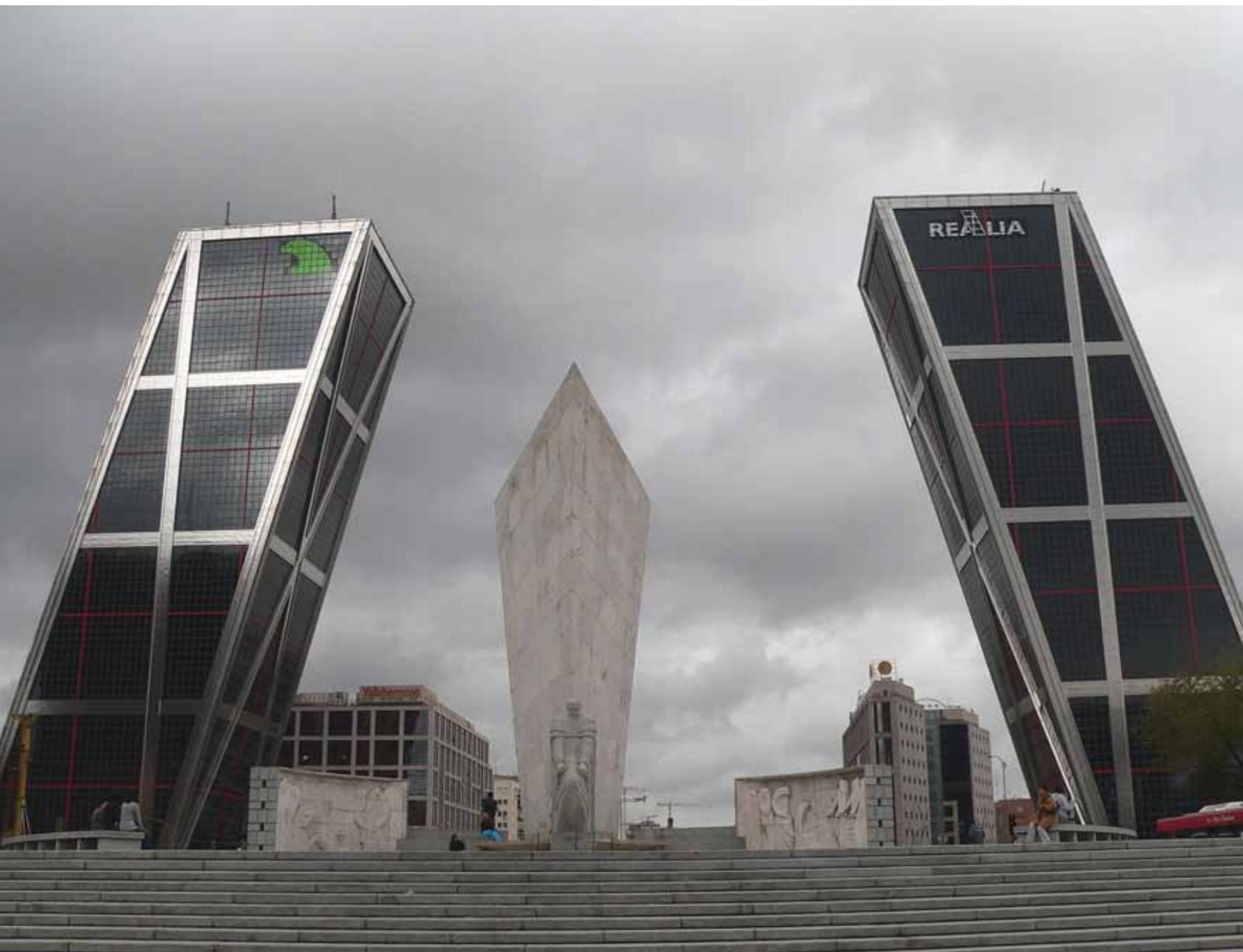


Рис. 1.1.11.
Проект здания
института библи-
отековедения
имени Ленина
в Москве на Ле-
нинских горах,
1927 г. Арх. Лео-
нидов И.И.

И безусловно, архитектурная антигравитация нашла своё воплощение в одном из наиболее впечатляющих современных сооружений — офисном комплексе «Ворота Европы» в Мадриде (рис. 1.1.12), возведённом в 1996 году по проекту знаменитого американского архитектора — Филиппа Джонсона — ученика и друга Миса Ван дер Роэ.

Рис 1.1.12.

Комплекс офисов «Ворота Европы», Мадрид, 1996 г. Арх. Ф. Джонсон, Д. Бёрджи.



Архитектурный ансамбль комплекса образован двумя одинаковыми 24-х этажными призматическими башнями со сплошным фасадным остеклением, резко наклоненными друг к другу под углом 30°. Крестообразные несущие конструкции башен не только выведены наружу, но и резко акцентированы. Именно они и обеспечивают зданиям реальную устойчивость, вопреки зрительному катастрофическому нарушению всяких представлений о гравитации.

60-е годы XX столетия отмечены реализацией идеи знаменитого американского инженера и изобретателя Ричарда Бакминстера Фуллера, посвятившего свою жизнь поиску шансов для человечества на долгосрочное и успешное выживание на планете Земля. Важнейшее и, пожалуй, ключевое место в его философии занимала идея стеклянного купола, не прерывающего зрительную связь с небом, но вместе с тем закрывающего от загрязненной атмосферы и непогоды целые города. Развивая идею К. Лаудана, высказанную в 1822 году, Фуллер писал: «Изнутри будет создаваться ощущение непрерываемого контакта с внешним миром. Солнце и луна будут освещать ландшафт, а небо будет полностью видимым. Вместе с тем нежелательные факторы климата, такие как жара, грязь, насекомые, ослепительный свет и т.д. будут регулироваться в пределах оболочки, создавая таким образом микроклимат Райского сада^[36]».

В свете этой теории Фуллер предложил концепцию создания так называемой «климатической оболочки» над Манхэттеном в виде стеклянного купола с диаметром в три километра, что естественно не было осуществлено. Конструктивная идея такой системы заключалась в создании лёгкой и прочной пространственной сетчатой оболочки из прямых стержней с ячейками в виде правильных треугольников или тетраэдров — так называемого «геодезического купола».

В реальной жизни идея получила гораздо более скромную реализацию — сначала в 1952 году в виде купола диаметром 18 м для одного из американских ресторанов. Затем в 1953 был построен еще один купол над центральным атриумом офиса Ford Motors в предместьях Детройта (Штат Иллинойс) диаметром 83 фута и весом 8,5-тонн. И только в 1967 году появилось первое по-настоящему

знаковое сооружение, принесшее Фуллеру всемирную известность — павильон США на Всемирной выставке в Монреале Экспо '67 (рис. 1.1.13). Купол этого сооружения с прозрачной оболочкой из крашенных акриловых панелей имел диаметр 75 метров. Внутри него была сооружена пространственная композиция из этажей-платформ, как бы парящих в пространстве купола, олицетворяющего Вселенную.

Интересно отметить, что мистическая идея «рая под стеклянной крышей» была осознана знаменитым сюрреалистом — испанским художником Сальвадором Дали и нашла свое отражение при строительстве Театра — Музея в Фигерасе — родном городе художника.

Известная страсть Дали к явлениям, связанным с чувством зрения, и создающим особое восприятие чувственного мира, нашла своё отражение в «геодезическом куполе» над центральным залом музея, возведённом по проекту архитектора Эмилио Переса Пинеиро (рис. 1.1.14). Об этом архитектурном элементе художник написал: «...Нет ничего более прочного и настолько приходящегося к месту, чем крыша Пинеиро, которая, если смотреть на неё с разных сторон, представляется различными конструкциями, и все эти конструкции, в конечном счёте, сливаются в блаженстве вечного света»^[16].



Рис. 1.1.13.
Павильон США на Всемирной выставке в Монреале Экспо '67. Ныне музей «Биосфера». Монреаль. Канада. Арх. Р.Фуллер, 1967 г.



Рис 1.1.14.
Шарообразный купол покрытия над центральным залом Театра — Музея Дали, Испания, г. Фигейрас, 1974 г., арх. Э. Пинеиро.



Свою вторую сторону перерождения из утилитарного, «удобного» архитектурно-планировочного элемента в доминирующий композиционный аспект стекло переживает в идее «стеклянного небоскрёба», принадлежащей, опять же, Мису ван дер Роэ, который разрабатывал её на протяжении нескольких десятилетий, представлял в конкурсных проектах, и впервые реализовал в 1951 году в США.

Небоскрёб, по сути своей, — явление исключительно американское, порождённое небывалым развитием промышленного производства в США по окончании Первой мировой войны. Набиравшему рост промышленному капиталу были нужны градостроительные символы власти, прогресса и современности.

Первые конкурсные проекты небоскрёбов относятся к началу 1920-х годов, а первые здания такого типа были возведены в США в конце 20-х начале 30-х годов. В первых небоскрёбах — офисных зданиях Чикаго Трибьюн (1923–1925) и Дэйли Ньюс (1929–



Рис 1.1.15.

В первых небоскрёбах остекление не играло основной, доминирующей роли.

Здание Чикаго Трибьюн, Чикаго, штат Иллинойс. 1923 — 1925 гг., арх. Раймонда Худ и Джон Мед.

1930), возведённых по проектам американских архитекторов Раймонда Худа и Джона Меда, остекление не играло основной, доминирующей роли (рис. 1.1.15); оконные проёмы и их заполнение выглядели достаточно привычно, традиционно.

Идея «стеклянного небоскрёба», разрабатывавшаяся Мисом ван дер Роэ и другими европейскими архитекторами с начала 1920-х годов, вплотную подошла к своей реализации в Америке к середине 40-х... началу 50-х. Определённой отправной точкой в этом отношении можно считать здание Секретариата Организации Объединённых Наций, построенное в Нью-Йорке в период 1947–1950 гг. (рис.1.1.16).

Согласно результатам конкурса, над проектом здания Секретариата ООН было предложено поработать команде, состоящей



Рис.1.1.16.

Здание Секретариата Организации Объединённых Наций, Нью-Йорк, 1947–1950.

Архитекторы Валлас К. Харрисон, Макс Абрамович, Ле Корбюзье, Свен Маркелиус, Оскар Нимейер и др.

из нескольких известных архитекторов. В этот коллектив вошли: Валлас К. Харрисон — в качестве директора проекта; Макс Абрамович — в качестве заместителя директора, и Ле Корбюзье, Свен Маркелиус, Оскар Нимейер и др. в качестве членов консультативного комитета. Архитекторы выбрали для здания форму плоского параллелепипеда без плоскостных и объёмных членений, с полностью остеклёнными главными фасадами и торцевыми фасадами, облицованными мрамором. Технические помещения для систем кондиционирования микроклимата были размещены на четырёх различных этажах, которые зрительно выделяются на фасаде. Зелёное стекло и зеленоватые стеклянные пазухи создают уникальный эффект отражения рассеянного света небосвода и солнца, не влияющий на противостоящие здания.

Здание Секретариата ООН изменило стереотип проектирования небоскрёба, сложившийся на тот период, и открыло дорогу более поздним сооружениям. 50-е годы минувшего столетия стали началом реализации творческих замыслов Миса ван дер Роэ, когда полностью остеклённые здания значительно изменили облик американских городов и стали образцом для подражания по всему миру.

Работая над высотными зданиями, Мис ван дер Роэ пришёл к выводу, что в присущей современности динамике, «моральный износ» планировочных решений происходит существенно быстрее, чем физический износ конструкций зданий. Поэтому «единственная функция, сохраняющаяся с известной устойчивостью в уникальных сооружениях, это функция изменяемости их назначения в течение всего срока существования». В своих проектах он пытался найти универсальное решение современного здания, базирующееся на единой конструктивной системе, гарантирующей универсальность и свободу многократной перепланировки помещений в течение всего срока его физического существования сооружения. А это могло быть сделано только за счёт использования сплошного ленточного остекления по всему периметру.

В данном случае мы можем увидеть определённый практицизм, присутствующий в идеологии Миса. Использование сплошного остекления, на первый взгляд, давало очевидный экономический эффект в дорогостоящем высотном строительстве. Как покажет дальнейший опыт эксплуатации таких зданий, впечатление было глубоко обманчивым. Однако осознание этого придёт как в Европу, так и в Америку лишь спустя десятилетия.

На момент строительства и в первые годы эксплуатации «стеклянные здания» Миса Ван дер Роэ вызывали всего лишь неоднозначную реакцию архитектурных критиков. При этом никто не решался всерьёз оспаривать позиции мэтра передовой архитектуры. Основная критика «стеклянных небоскрёбов» на момент их возведения была сосредоточена в области чистой эстетики: она ещё не была подкреплена серьёзными инженерно-техническими обоснованиями.



Рис. 1.1.17.

Апартаменты Лейк Шор Драйв, Чикаго, штат Иллинойс, 1948–1951 гг. Арх. Мис ван дер Роэ.



Рис. 1.1.18.

Сигрем-билдинг, Нью-Йорк, 1954–1958. Арх. Мис ван дер Роэ.

Так, первая работа Миса в этом стиле — комплекс из двух стеклянных башенных высотных жилых домов на Лейк Шор Драйв в Чикаго, построенных в 1951 году (рис. 1.1.17), была признана неудачной с точки зрения запросов архитектуры жилища: сплошные стеклянные стены не отвечали интимности частной жизни, а геометрическая простота объёмной формы потребовала отказа от таких элементов жилища как балконы и лоджии.

Увлечённость Миса чистотой формы была общеизвестна и обычно сопровождалась как полным пренебрежением к качеству конструктивных решений, так и к продуманности функционального использования помещений. В эстетическом плане, аналогично Фарнsworth-Хаусу, он находился в творческом поиске значимой и неподверженной времени архитектуры, стоящей в стороне от потребительских запросов капитализма, общественного мнения и моды.

В этом отношении примечательно, что в более позднем здании офиса фирмы Сигрем-билдинг в Нью-Йорке, спроектированном в соавторстве с Ф. Джонсоном, и построенном в 1954–1958 гг., было применено сплошное панорамное остекление от пола до потолка (рис. 1.1.18). При этом очевидно, что архитекторов мало

заботило состояние психологического дискомфорта и элементарной безопасности людей, находящихся в помещениях 38-ми этажного здания с окнами без подоконника (до разработки современных технических решений безопасного остекления пройдут десятилетия!). В публикациях, посвящённых этому зданию, ставшему символом XX столетия, отмечается, что гораздо большие усилия были сосредоточены на проработке элементов интерьера и внутренней отделки^[37].

Со смертью теоретиков «стеклянной архитектуры» — Миса Ван дер Роэ и Ле Корбюзье (оба умерли в начале 60-х годов) завершается триумфальное шествие Интернационального стиля в странах Запада. Среди новых идеологов европейской и американской архитектуры намечается определённое охлаждение к стеклу, отход в сторону более спокойного традиционного стиля.

Очевидно, что этот процесс был связан не только с чисто эстетическим неприятием идей Миса Ван дер Роэ — обезличенностью «стеклянных» зданий, их оторванностью от национального и исторического контекста страны, где они возводятся. Здесь нужно понимать, что успеху Интернационального стиля во многом способствовали сопутствующие ему идеи индустриализации, обеспечивавшие резкое снижение единовременных затрат на строительство по сравнению с традиционными зданиями.

Так в 1872 году, по поводу Хрустального Дворца Чарльз Истлейк, исполнявший должность секретаря Королевского института британских архитекторов, писал: «По крайней мере, один архитектор ... не колебался открыто признать своё убеждение, что мистер Пэкстон, ведомый «светом своей природной проницательности», достиг успеха, который доказал со всей неопровержимостью, как ошибались мы в своих попытках копировать древние образцы, что архитектура будущего будет архитектурой здравого смысла и что если те же принципы, на которых основывался проектировщик выставочного павильона, были бы приложены к зданию Парламента, Британскому музею и к новым культовым сооружениям, тогда при строительстве были бы сэкономлены миллионы и был бы достигнут более высокий художественный уровень»^[6].

По всей видимости, экономические соображения были не последними среди тех, которые позволили Мису Ван дер Роэ получить заказы на проектирование американских небоскрёбов. Однако, уже первые годы эксплуатации таких зданий показали, что архитектурные идеи 1950–60х годов ощутимо опережали технологические возможности и уровень научных знаний, имевшихся на тот период в этой области. Профессор Университета Архитектуры Сиднея Генри Дж. Коуэн в своей книге «Строительная наука XIX–XX вв», изданной в 1978 году, отмечал, что «... сейчас в мире немало стран, где нет зданий со стеклянными навесными стенами на лёгком несущем каркасе, и можно сказать, что немногие здания не подвергались критике»^[6].

Опубликованные материалы, отражающие негативные эксплуатационные моменты, проявившиеся в зданиях Интернационального стиля, и доступные на настоящий момент в России, крайне скудны и ограничены. Однако мы всё-таки можем встретить отдельные публикации, которые позволяют, в первом приближении подойти к пониманию проблемы.

Поскольку эти негативные аспекты непосредственно связаны с надёжностью конструктивных схем зданий, имеющих большую площадь наружного остекления и с особенностями их эксплуатации, они будут подробно проанализированы ниже в разделе 1.2. С точки зрения архитектуры, важно отметить, что новый этап в развитии систем строительного остекления начинается только в 70-е годы XX столетия и непосредственно связан с освоением промышленного производства стеклопакетов и оконных профильных систем.

В значительной степени развитие производственных технологий в этой области было ускорено энергетическим кризисом 70-х годов XX века. Человечество впервые ощутило необходимость поиска новых и возобновляемых источников энергии. В этом отношении не удивительно, что уникальные свойства стекла как материала с дифференцируемым пропусканием видимого и теплового солнечного излучения, были положены в основу первых разработок в области энергосберегающих технологий.

Непрерывная работа в этом направлении, проводившаяся на протяжении десятилетий в странах Западной Европы, сегодня реализуется в концепции экологичного и энергоэффективного здания, представляющего собой симбиоз выразительной архитектуры, оптимальных условий внутреннего микроклимата и минимального энергопотребления.

В современном европейском понимании остеклённые наружные стены и кровли трактуются как неотъемлемые конструктивные элементы наружной оболочки здания, обладающие мобильными (быстро изменяемыми) техническими характеристиками, применительно к текущему моменту эксплуатации. Это стало возможным, благодаря разработкам в области магнетронного напыления покрытий с задаваемыми свойствами на стёкла, блочных систем периметральной оконной фурнитуры и микропроцессорных систем автоматики, легко монтируемых на оконных конструкциях.

В современных европейских зданиях элементы остекления интегрируются с дополнительными устройствами в единые автоматически управляемые системы и за счёт этого, помимо традиционных задач архитектурной эстетики, выполняют ещё и целый ряд дополнительных функций. Это — улавливание тепловой энергии Солнца в летнее время (в комплексе с солнечными батареями), ночное охлаждение внутренних объёмов и несущих конструкций здания летом для предотвращения солнечного перегрева, дымоудаление и защита от загазованности и др.

В этом стремительном развитии техники незримо улавливается оттенок идей Миса Ван дер Роэ и Ле Корбюзье — универсальность и адаптируемость свойств; энергия и солнечный свет. Только сегодня (более чем через 50 лет!) эти идеи обретают системную техническую основу.

Подкреплённая развитием техники, современная архитектура светопрозрачных конструкций уже не ограничивается лаконичностью и простотой форм. Она уходит от строгих прямолинейных плоскостей и объёмов, впечатляет яркостью и разнообразием цветовых решений. Выразительность светопрозрачных фасадов подчёркивается дополнительными конструктивными элемента-

ми — солнечными батареями, солнцезащитными устройствами, приточными клапанами естественной вентиляции. Специфический ночной эффект в зданиях такого типа создается внутренним освещением. Здания со светопрозрачными стенами эффектно выглядят как днем, так и ночью. В современной городской застройке они, помимо локального зрительного эффекта, создают специфический неповторимый облик городской среды (рис. 1.1.19–1.1.21).

Рис. 1.1.19.
Ночная подсветка «стеклянных зданий».



*Спа-центр в г. Эстергом, Венгрия,
арх. Hnto és Tsai Építész Studio — Docze Peter*



а) Гостиница Parkhotel, г. Халл, Австрия,
арх. бюро Henke-Schreieck (Вена)

Таким образом, проанализировав приблизительно полтора десятилетия этап развития светопрозрачных строительных конструкций и их применение в архитектуре различных зданий и сооружений, мы можем выделить основные функциональные задачи, которые определяли необходимость использования остекления большой площади на протяжении всего этого периода и практически не изменившиеся в своих принципах вплоть до сегодняшнего дня. А именно:

1. Необходимость максимально возможного освещения внутреннего пространства здания естественным светом для осуществления каких-либо производственных или других процессов или демонстрации товаров, экспонатов.

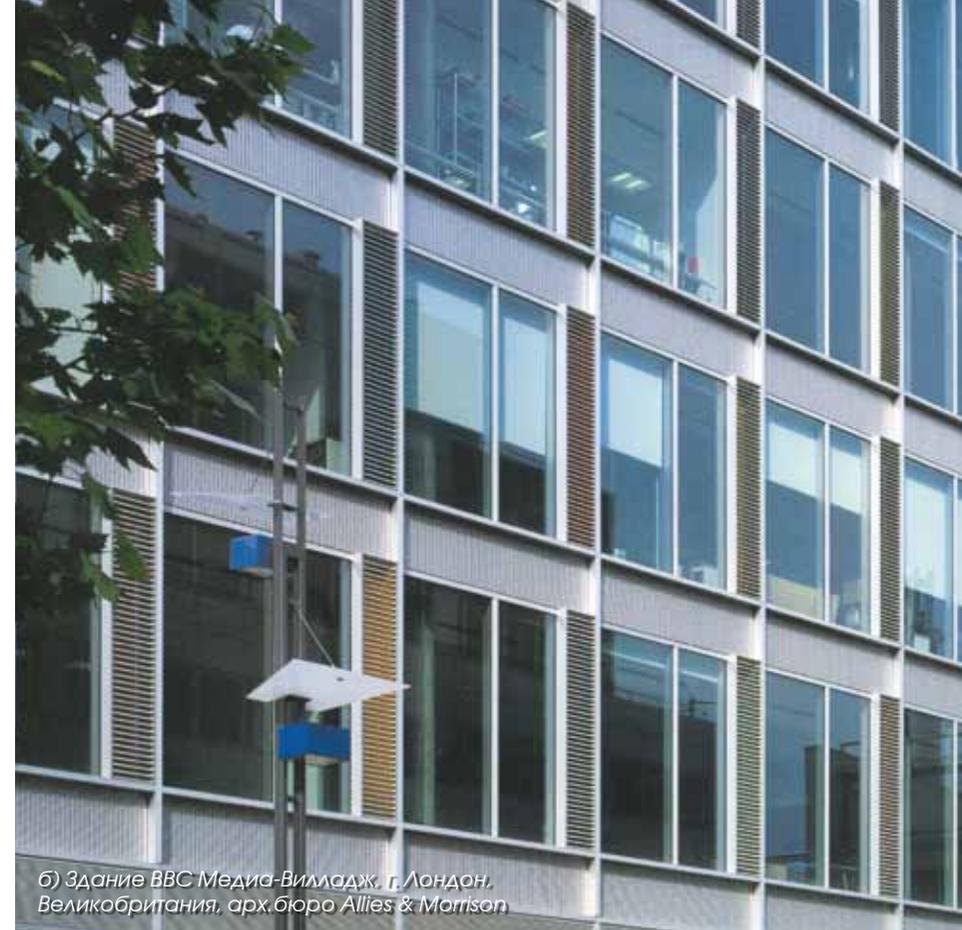
2. Создание особого зрительного эффекта сооружения, вызывающего состояние кратковременного психологического стресса (восхищение, страх, удивление).

Рис. 1.1.20.

Солнцезащитные экраны и вентиляционные клапаны как выразительные элементы светопрозрачной оболочки.

а) солнцезащитные устройства

б) вентиляционные клапаны



б) Здание BBC Медиа-Вилладж, г. Лондон,
Великобритания, арх. бюро Allies & Morrison

3. В индивидуальном строительстве — осуществление стремления человека к единению с природой, снижение негативного психологического эффекта замкнутого пространства.

На современном этапе этот список расширился определёнными дополнительными функциями:

1. Улавливание солнечной энергии для создания независимого круглогодичного цикла жизнеобеспечения здания.

2. Формирование градостроительной концепции, особенно применительно к вечернему и ночному облику города за счёт внутреннего освещения здания.

Приведённый выше список достаточно краток. И, как показывает мировой опыт возведения и эксплуатации зданий с остеклёнными наружными ограждениями, применение неоправданного избыточного остекления, выходящего за пределы перечисленных выше задач, как правило, приводило к негативным последствиям.



Светопрозрачное покрытие Музея современного искусства (Март) в г. Тренто, Италия. Диаметр — 40 м, высота — 25 м. Арх. Марио Ботта и Джулио Андриолли



Рис. 1.1.21.
Сложные архитектурные формы большепролетных светопрозрачных кровель.

Здание Złote Tarasy г. Варшава, Польша, архитектурное бюро the Jerde Partnership

Эта тенденция, с каждым днём всё более набирающая рост в России, вызывает справедливую настороженность и критику со стороны профессиональных инженеров. Далее в настоящей книге мы постараемся как можно более полно осветить весь комплекс технических проблем, которые должны быть решены при проектировании зданий такого типа. И соответственно, показать их более высокий уровень строительной ответственности по сравнению с традиционными и отработанными решениями.



Здание главного управления компании LVA
Brandenburg, г. Франкфурт на Одере, Германия,
арх. бюро Planteam West (Кёльн)

1.2. Развитие архитектуры, конструкций и технологий.

Современная история архитектуры показывает, что внедрение в строительную практику XX столетия зрительно невесомых, частично или полностью прозрачных фасадных оболочек из стекла, позволило человечеству создавать относительно дешёвые и вместе с тем, респектабельно выглядящие здания. На протяжении десятилетий философские и художественные идеи «стеклянной архитектуры» сопровождала борьба за максимальное снижение себестоимости строительства и сокращение сроков возведения этих монументальных по значимости сооружений — развитие и совершенствование индустриальных методов строительства на фоне негативных экономических тенденций раннего капитализма.

В 50–60е годы XX столетия архитектурная концепция Миса ван дер Роэ хорошо вписывалась в идеологию проектирования конструктивных схем зданий с несущим каркасом и легкой наружной оболочкой заводского изготовления, облегающей каркас наподобие сплошного занавеса. По общему признанию, родиной этого прогрессивного направления в инженерно-строительной науке являются Соединенные Штаты. За период 1950–1960х годов американская идея легкого фасадного ограждения, подвешенного с внешней стороны несущего каркаса, изменила характер архитектуры каркасных зданий и дала огромный стартовый импульс развитию промышленных технологий в этой области — как в США, так и в странах Западной Европы.

В противоположность несущим стенам, предназначенным для восприятия значительных по величине вертикальных нагрузок, конструктивная схема зданий с навесными стенами позволила применять в качестве фасадных элементов большеразмерное остекление и легкие теплоизоляционные материалы. Сочетание в навесных стенах разнообразных материалов поставило перед инженерами много новых вопросов, как в части непосредственного конструирования строительных изделий, так и в сложившихся методах расчета ограждающих конструкций.

Наряду с необходимостью некоторого нового видения в расчетах ветровых нагрузок, воспринимаемых легкими навесными ограждениями большой площади (в том числе и стеклянными), обозначилась «проблема стыка» отдельных конструктивных элементов, которая уже не могла быть решена на основании правил, приемлемых для кустарных методов строительства. На передний план выдвинулись проблемы линейного расширения материалов и температурных деформаций изготавливаемых из них конструкций. Возникла необходимость в решении целого ряда вопросов в области строительной физики и противопожарной безопасности.

Однако несмотря на то, что новые строительные системы очевидно требовали от инженеров овладения большим объемом дополнительных знаний в специальных областях, бурное развитие строительной индустрии шло хаотично, без опоры на какие-либо полноценные научные исследования. В свете современной российской истории примечательно, что десятилетие интенсивного «строительства без науки» привело технические развитые страны ко многим парадоксальным вещам, вылившимся в массовую реконструкцию и переделку зданий, построенных в этот период. В этом отношении, прежде всего, интересно отметить глубокое системное переосмысление подходов к строительству высотных зданий, наблюдаемое на Западе в период отторжения «стеклянной архитектуры».

В начале 70-х годов XX столетия для профессионального строительного сообщества Европы и наиболее прогрессивно мыслящих американских специалистов, стало очевидным, что идеи поколения пионеров современной архитектуры — Ле Корбюзье, Миса Ван дер Роэ, Гропиуса и др., стремившихся, вместо развития пригородов, к сохранению роли старых городов с высокой плотностью населения, не оправдали себя не только в градостроительном плане, но и применительно к отдельным зданиям.

Высотные здания, возведённые в исторических центрах, обесценили прежние доминанты городской застройки, как в композиционном, так и в символическом аспекте. Новое строительство, занимавшее целые кварталы, перекрывало сложившиеся пешеходные пути и транспортные магистрали. Высокие новые сооруже-

ния в виде башен и пластин создавали сильные аэродинамические потоки, особенно невыносимые на уровне первых этажей. На месте маленьких рекреационных площадей между небоскрёбами — «плаза», изначально задуманных для обеспечения комфорта в городской среде, получались бесполезные, неуютные и пронизанные сквозняками участки застройки^[19].

Погоня за максимальным поступлением света и воздуха в высотных зданиях, где проектировались огромные панорамные окна, вылилась в практически не решаемую проблему перегрева интерьеров (несмотря на использование солнцезащитных стёкол — см. раздел 4.1). Одновременное стремление к экономии на несущем каркасе привело к отсутствию в зданиях внутренних конструкций, обладающих аккумулирующей способностью. Таким образом, относительно простой и дешёвый контроль за температурой внутри помещения путём аккумуляции тепла и холода, стал недоступен. Открывание окон для охлаждения помещений за счёт естественной вентиляции было невозможным из-за сильного ветра. В 60-годы проблема привела к парадоксу — для избежания перегрева зданий окна стали закрывать шторами и среди бела дня применять искусственное освещение (рис. 1.2.1). Эстетика новых зданий на практике оказалась чисто символической и лишённой преимуществ.

Рис. 1.2.1.

Апартаменты Лэйк Шор Драйв, Чикаго, штат Иллинойс, США. Арх. Мисс Ван дер Роэ, 1948–1951.

а) *Общий вид здания в дневное время — 90% площади фасадного остекления закрыто затемняющими внутренними шторами;*

б) *лёгкий несущий металлокаркас зданий (фото на стадии возведения) не имеет массивных конструктивных элементов, позволяющих аккумулировать холод.*



Наряду с очевидным дискомфортом при эксплуатации, обозначились и технические проблемы, критичные для нормального функционирования здания. Так, приблизительно через 20 лет после начала эксплуатации, была поставлена задача о полной замене наружного остекления знаменитого Левер Хауса (рис.1.2.2), возведённого в 1952 году в Нью-Йорке по проекту архитекторов Льюиса Скидмора и Натаниела Овингса. Причинами такой глобальной реконструкции стали появление ржавчины несущего металлокаркаса и растрескивание стёкол вследствие температурных деформаций^[37]. Согласно опубликованным источникам, расчётные линейные деформации алюминиевых профилей, на которых были закреплены стёкла Левер Хауса при температурном перепаде ($Dt = 100^\circ\text{C}$ от -500°C до 500°C) составляли 9 см (см. рис.1.2.2а).

Здание, построенное в лучших традициях современной московской «точечной застройки» вызвало серьёзную критику в градостроительном плане. Аналогично знаменитому Сигрем-билдингу Миса Ван дер Роэ (см. рис.1.1.16 разд.1.1), оно разрушило архитектурный облик существовавшей застройки, при этом, несмотря на прозрачность, лишило солнечного света рядом стоящие здания. Из-за стеснённости строительного участка, не получилась (как и в Сигрем-билдинге) даже маленькая рекреационная площадь — «плаза», хотя это требование изначально оговаривалось. Исполнение скульптурной группы, предна-

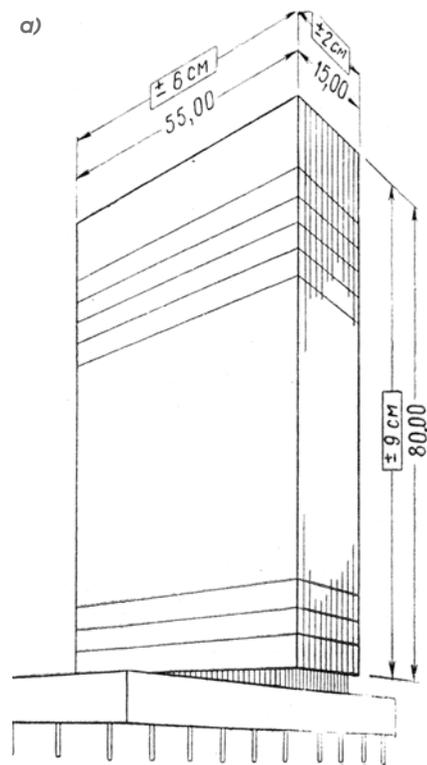


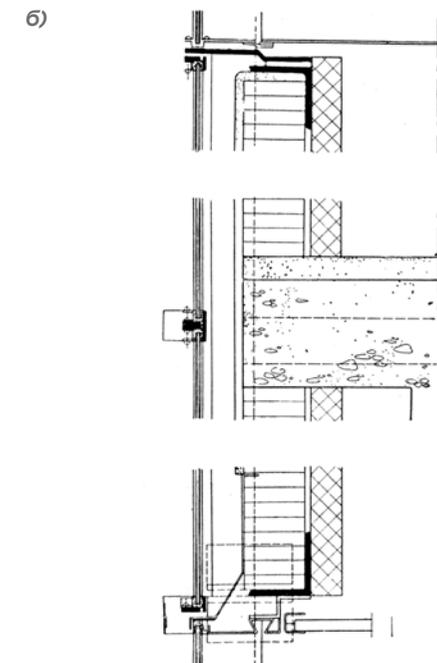
Рис.1.2.2.

Левер Хаус, Нью-Йорк, 1950–1952. Архит. Бюро Скидмор, Овингс & Мэррил (SOM).

а) Общий вид здания до реконструкции и расчётные величины температурных деформаций (при $Dt = 100^\circ\text{C}$)^[18];

б) конструктивное решение стеклянной навесной стены до реконструкции — вертикальный разрез по наружной стене в уровне примыкания перекрытия с внутренней подоконной стенкой и надоконной перемычкой. Оконные проемы — одинарное глухое остекление из теплопоглощающего стекла на мастике. Крепление остекления осуществлено при помощи накладных профилей из листовой нержавеющей стали. Подоконная стенка и надоконная перемычка из шлакобетонных камней, толщиной 10 см, дополнительно утепленные паронепроницаемой теплоизоляцией — пеностеклом.

в) общий вид здания после реконструкции;



значавшейся для этой площади, так никогда и не было осуществлено. Идея вертикальной «прозрачной архитектуры» в очередной раз показала свою несостоятельность, как в конструктивном, так и в градостроительном плане.

Очевидно, что в данном случае наряду с глобальными архитектурными и градостроительными проблемами, мы можем увидеть и элементарное пренебрежение законами строительной физики, в целом характерное для американской практики вплоть до конца XX столетия. Аналогично всем другим знаковым «стеклянным сооружениям» США 50-х годов, конструктивное решение навесной стены Левер-Хануса предполагало использование одинарного остекления теплопоглощающим стеклом в комбинации с хорошо утепленным подоконным участком и надоконной перемычкой (рис. 1.2.2б).

На этом фоне вдвойне нелогичной выглядит постановка задачи научных исследований по энергоэффективности таких стен, проводившихся в США в 50-е годы. И результаты которых, в частности, стали научным обоснованием для решения Миса ван дер Роэ по конструкции навесных стен Сигрем-Билдинга (см. рис. 1.16 гл.1).

Во время исследований определялось среднее значение общего (приведенного) термического сопротивления отдельного рамного элемента навесной стены (панели), выполняемого из алюминия с заполнением различными теплоизоляционными материалами в пределах подоконного участка. Опыты показали, что при условии применения одинарного остекления и соотношении площади остекленной поверхности к площади подоконного участка, равном 3:1, даже повышение термического сопротивления подоконного участка в 3 раза давало лишь незначительный прирост общего термического сопротивления всей панели^[18]. Учитывая, что при панорамном остеклении на всю высоту этажа от пола до потолка, дополнительные затраты на утепление узкой полосы в пределах высоты перекрытия могли дать лишь ничтожное повышение теплозащитных характеристик навесной стены в целом, Мис ван дер Роэ логически пришел к отказу от устройства теплоизоляции вообще и применил неутепленные филенки из тонкого листа латуни (рис. 1.2.3).

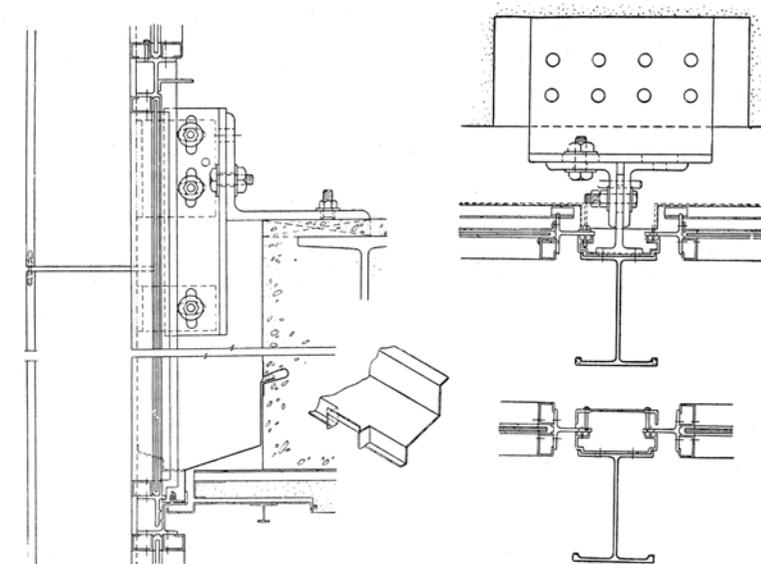


Рис. 1.2.3.

Конструктивные детали навесной стеклянной стены здания Сигрем-Билдинг в Нью-Йорке, 1954–1958. Арх. Мис ван дер Роэ. Вертикальный и горизонтальный разрезы в местах крепления остекления.

Оконные проемы — одинарное глухое остекление светорассеивающим стеклом, установленное изнутри на мастике и закрепленное раскладками на винтах. Неутепленные подоконные участки выполнены из тонкой латуни.

Интересно отметить многолетнюю устойчивость как архитектурных, так и конструктивных стереотипов в американской идее «стеклянного небоскреба», а также отношение к ней современных европейских специалистов. Так в частности, в ^[35] немецкий инженер-архитектор Кристиан Шиттич отмечает: «Стремление одеть всё в бесформенную стеклянную оболочку становится особенно модным для американских небоскрёбов, за счёт которых архитекторы и инвесторы пытались вынести безошибочную идею собственного самутверждения в небо над городом — которая выглядит также сумасбродно, как если бы они выходили на забастовку. В результате получаются образцы, которые можно вообразить исключительно как вариант городской вертикали в американском стиле.

В Далласе Й. Минг Пей и Генри Гобб zaproектировали то, что теперь называется зданием Первого Межгосударственного Банка (First Interstate Bank Tower — 1983–86). Наряду с собственной значимостью и финансовым могуществом, владельцы хотели построить впечатляющее, бездуховное здание, которое к тому же должно было стать самым высоким в городе. Здание высотой в 220 метров облицовано сине-зелёным отражающим стеклом с одинаковыми ячейками. Несмотря на то, что дата начала строительства уходит вперёд за 80-е годы, его конструктивная концепция базируется на использовании одинарного остекления в сочетании с полным кондиционированием микроклимата — исключительное по своей странности американское явление».

Справедливости ради здесь следует привести и высказывание современного американского архитектора Мишеля Г. Кросби, который недвусмысленно относит архитектуру «стеклянных небоскрёбов» уже к менталитету отсталых восточных стран^[40]: «В то время как западные архитекторы только совсем недавно пришли к пониманию ошибок Современной архитектуры, сделанных за последние пятьдесят лет, со стороны восточных клиентов, Современная архитектура, во всей её ужасающей детализировке, является выражением того, что и они тоже являются частью Первого мира. Как может архитектор выполнять это требование, не сознавая, что он предоставляет своему клиенту самое худшее из всего, что можно предложить, — только исходя из того, что это должно символизировать Современное общество?».

Таким образом, неудачный опыт строительства высотных зданий со стеклянными фасадами подтолкнул западные страны, прежде всего, к поиску некоторой новой философии престижного сооружения и, соответственно, к формированию новых градостроительных решений крупных административных и исторических центров.

В 1966 году в Кембриджском Университете профессор Лесли Мартин и Лайонел Марч опубликовали работу «Использование территорий и форма застройки», где показали, что то же самое количество площади, которое дают башенные здания, может быть создано в более низких строениях, располагаемых по периметру

участка. Фактически в этой работе была сформулирована и научно обоснована концепция современного атриумного здания с тёплым центральным двором, перекрытым светопрозрачной кровлей.

Это направление, ставшее логической альтернативой высотному строительству в крупных городах, не только вызвало новый подъём в архитектуре, но и подтолкнуло развитие технологий в области светопрозрачных кровельных конструкций, которые в то время не развивались дальше потребностей в строительстве оранжерей.

Вместе с тем, негативный опыт «стеклянных сооружений» эпохи Интернационального Стиля совершенно несправедливо относить только к проблемам высотного строительства. Ощутимый недостаток научных исследований не менее болезненно сказался и на малоэтажных зданиях.

Буквально на следующий год после строительства знаменитого стеклянного дома — Фарнсворс-Хауса (*рис. 1.8 разд. 1.1*), заказчица — доктор Элизабет Фарнсворс начала официальный судебный процесс против архитектора Миса Ван дер Роэ и капитальную реконструкцию его произведения^[39]. Помимо чисто эстетической неустраиваемости частной жизни в стеклянном «аквариуме», не устраивавшей Элизабет, в доме были отмечены протечки кровли и появление обильного конденсата на стеклянных стенах. Кроме того, ощутимый дискомфорт был связан с перегревом помещений от солнечной радиации на протяжении жаркого лета, характерного для этого района. Для улучшения теплового режима г-жа Фарнсворс внесла в дом настолько большие изменения, что это в конечном итоге уничтожило тот визуальный шедевр, который создал архитектор. Позднее дом был разрушен из-за прокладки скоростной автострады.

Не лучшая судьба постигла и другие сооружения Миса. В 1974 году была проведена полномасштабная строительная экспертиза Краун-Холла — большепролётного павильона, обрамлённого стеклянными стенами, построенного в 1956 году по его проекту на территории кампуса Иллинойского Технологического Института в Чикаго (*рис. 1.2.4*). Для здания, прослужившего менее 20 лет, была определена необходимость проведения большого ком-

плекса ремонтно-восстановительных работ, включая 10 000 \$ на новую кровельную систему. В числе технических недостатков, возникших при эксплуатации, были названы: перегрев помещений от солнечной радиации, появление трещин оконного стекла и штукатурки на потолке, вызванных температурными деформациями, высокие тепловые потери зимой, солнечные блики, проникновение внешнего шума и низкая звукоизоляция внутри здания^[39].

Этот печальный список дополняет общежитие Армии спасения («Сити де Рефьюж»), построенное в 1933 году в Париже по проекту Ле Корбюзье (рис. 1.2.5), где в первое же жаркое лето южный фасад был снабжён солнцезащитными устройствами, а часть



Рис. 1.2.4.

Краун-холл — учебный корпус Иллинойского Технологического Института, в котором размещены Школа архитектуры и градостроительства и Департамент дизайна.

Общий вид и интерьеры. 1950–1956 гг. Арх. Мис Ван дер Роэ.



Рис. 1.2.5.

Общежитие Армии спасения («Сити де Рефьюж»), Париж, Франция. Арх. Ле Корбюзье, 1929–1933. Современный вид после реконструкции 1948–1952 гг.



глухого остекления заменена открывающимися окнами. При капитальной реконструкции 1948–1952 годов была полностью переделана система отопления и добавлены железобетонные затеняющие козырьки^[37].

Очевидно, что перечисленный список объектов является далеко не полным — фактически он отражает объём доступной опубликованной информации. Вместе с тем, за этими скромными сведениями нетрудно увидеть значительный комплекс проблем, осознанный западными странами ценой тяжёлого практического опыта. Закономерным следствием этого опыта стало появление первых независимых работ и публикаций в области лёгких ограждающих конструкций и строительной физики.

Одним из первых значительных исследований, опубликованных в Европе, по праву считается книга немецкого архитектора Рольфа Шаала «Конструкции навесных стен», изданная в 1961 году в Германии, в 1965 году опубликованная в СССР на русском языке^[18], и не утратившая своей актуальности вплоть до сегодняшнего дня. Наряду с общими методическими правилами проектирования лёгких навесных ограждений — систематизацией архитектурных и конструктивных принципов, автором были сформулированы ба-

зовые научные и технологические идеи, положенные в основу разработок современного фасадного остекления на базе профильных систем, начальная стадия которых отчётливо прослеживается в европейских навесных стенах 50х–60х годов (рис. 1.2.6).

Период с конца 60х годов XX столетия до современного этапа, по сути характеризуется становлением и развитием унифицированных системных решений светопрозрачных конструкций, технологическим и конструктивным совершенствованием идей, опробованных на объектах Интернационального Стиля. Несмотря на многочисленную критику, высказываемую по сей день архитектурной общественностью, заманчивая философия «стеклянного здания» не умерла. В разном виде и в разном социальном контексте она продолжает свою жизнь по всему миру — от слепого копирования неудачного опыта в отсталых странах до новой идеологии «здания будущего» в технически развитом сообществе.

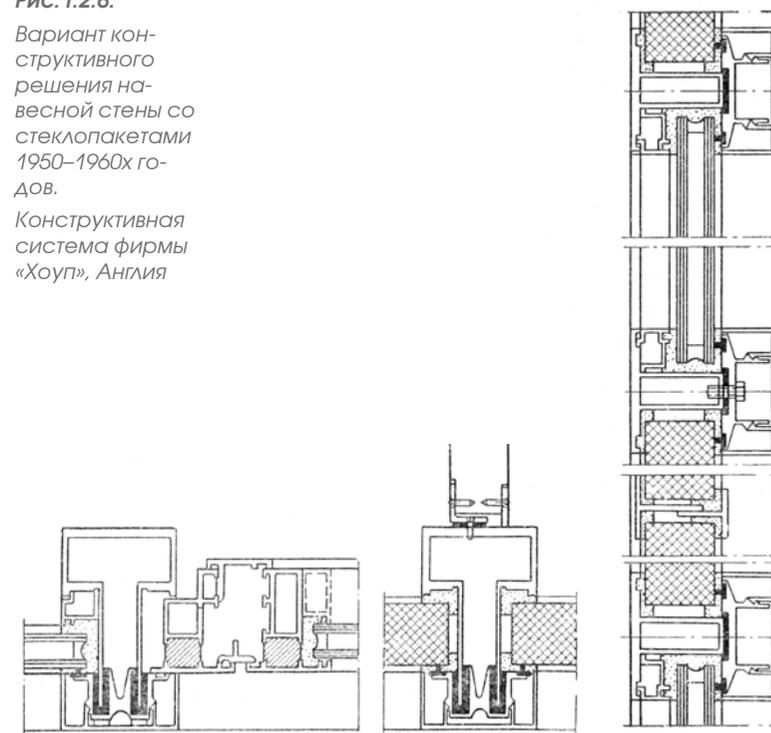
Как справедливо предсказывал в своей книге Р.Шааль: «Дальнейшее техническое совершенствование известных в настоящее время способов конструирования навесных стен не приведет к принципиальному их изменению; скорее всего оно может привести к упрощению и сокращению их числа. На подлинный прогресс в развитии конструкции навесных стен можно рассчитывать лишь в случае создания принципиально новых строительных материалов, обладающих более высокими свойствами, чем материалы, известные нам в настоящее время».

И как показывают мировые тенденции в строительстве «стеклянных зданий» в сопоставлении с имеющимися на сегодняшний день техническими возможностями для их реализации, сегодня мы приближаемся именно к такому качественному скачку как непосредственно в технологиях, так и в области архитектурно-конструктивных решений. Обоснование этого тезиса с точки зрения строительной техники является предметом рассмотрения в последующих главах книги.

Рис. 1.2.6.

Вариант конструктивного решения навесной стены со стеклопакетами 1950–1960х годов.

Конструктивная система фирмы «Хоуп», Англия





Основные конструкционные материалы для возведения светопрозрачных фасадных и кровельных оболочек

- 2.1. Конструкционные материалы для производства формообразующих несущих стержневых элементов. Алюминиевые сплавы и сталь.
- 2.2. Стекло как основной конструкционный материал светопрозрачного заполнения.

As far as metal and glass are the main construction materials for the light transparent facades and roofs, this chapter describes their physical and chemical properties, important for the envelope construction. A subject of special attention is glass production technologies, which influence glass breakage during exploitation period.

2.1. Конструкционные материалы для производства формообразующих несущих стержневых элементов.

Алюминиевые сплавы и сталь

2.1.1. Алюминиевые сплавы. Химический состав. Обработка. Защита от коррозии

Как уже отмечалось в предыдущей главе, на протяжении десятилетий приоритетным движущим фактором индустрии светопрозрачных оболочек, были макроэкономические тенденции, в известном смысле задававшие определённые рамки в разработке технических решений.

Немаловажным фактором, предопределившим широкое внедрение алюминиевых сплавов в строительную практику, стала послевоенная конверсия военно-промышленного комплекса Европы и США, в результате чего образовался огромный излишек в производстве алюминия, использовавшегося для самолётов. Когда производство самолётов было свёрнуто, специализированные предприятия были переориентированы на выпуск продукции строительного назначения.

Алюминиевые переплёты окон, в этот период доказали свою конкурентоспособность, благодаря возможности получения разнообразных сечений сложной формы за счёт относительно простых операций обработки горячего металла. В США они впервые были применены ещё до войны — в 1936 году при строительстве библиотеки Кембриджского Университета и гораздо позднее в нашей стране — только в 70-х годах XX столетия при строительстве Института автоматики и телемеханики в Москве.

В настоящее время, профильные системы из алюминиевых сплавов, развитые по номенклатуре изделий, являются общепризнанным мировым лидером для производства стержневых элементов фасадных и кровельных светопрозрачных оболочек.

Алюминий (Al) — металл серебристо-белого цвета, находится в группе II периодической системы элементов, порядковый номер 13. Относится к группе лёгких цветных металлов.

По сравнению со сталью алюминий является мягким пластичным материалом. Плотность его составляет $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$, а модуль упругости $E = 71\,000 \text{ Па}$, что почти в три раза меньше плотности и модуля упругости стали. Алюминий очень пластичен — удлинение при разрыве достигает 40–50%, но прочность его весьма низка (предел прочности σ_b составляет порядка 60–70 МПа). Алюминий имеет очень высокую, даже по сравнению с другими металлами, теплопроводность. Его коэффициент теплопроводности составляет $\lambda = 220 \text{ Вт/м}^\circ\text{C}$, что почти в 4 раза превышает коэффициент теплопроводности стали. Серьёзным недостатком алюминия, с точки зрения применения в светопрозрачных конструкциях, является относительно высокий коэффициент линейного температурного расширения $k = 24,0 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$, который более чем вдвое превышает аналогичную величину для стекла и стали.

Вследствие низкой прочности технически чистый алюминий в строительных конструкциях применяется крайне редко. Для повышения прочности в него вводят легирующие добавки — магний, марганец, медь, кремний, цинк и некоторые другие элементы. Легирование повышает прочность алюминия, но снижает его пластичность и коррозионную стойкость. Поэтому в строительстве применяют малолегированный алюминий малой и средней прочности. Механические, технологические и эксплуатационные свойства алюминиевых сплавов определяются химическим составом и условиями обработки полуфабрикатов.

Все сплавы на основе алюминия подразделяются на два класса — деформируемые (обрабатываемые давлением — прокаткой, прессованием, штамповкой, гибкой) и литейные. В строительстве используют почти исключительно деформируемые сплавы, из которых изготавливают листы, ленты, профили, трубы и другие полуфабрикаты.

Для производства оконных и фасадных профилей используются сплавы на основе системы **Al-Mg-Si**, которые по своему химическому составу относятся к **деформируемым алюминиевым сплавам, упрочняемым термической обработкой**, заключающейся в закалке и последующем старении.

Сплавы системы **Al — Mg — Si** отличаются высокой коррозионной стойкостью и пластичностью, что позволяет прессовать из них тонкостенные профили сложного сечения при больших скоростях. Они удовлетворительно свариваются аргоно-дуговой, роликовой и точечной сваркой, хорошо полируются, имеют хороший декоративный вид.

Российские производители алюминиевых профильных систем используют сплав **АД-31**, зарубежные — сплав **AlMgSi** (сплав N 6060 в соответствии с «Международным регистром сплавов и химических композиций для алюминиевых сплавов», издаваемым Вашингтонской Ассоциацией Алюминия, сплав EN AW 6060 в соответствии с DIN EN 573) или сплав **AlMg 0,7Si** N 6063 (сплав EN AW 6063 в соответствии с DIN EN 573). Прочностные характеристики указанных сплавов принципиально не отличаются между собой, а их а номинальный химический состав приведён в табл. 2.1.1 и 2.1.2.

Табл. 2.1.1

Номинальный химический состав деформируемых алюминиевых сплавов, применяемых для производства оконных профилей (в соответствии с ГОСТ 22233–2001 «Профили прессованные из алюминиевых сплавов для светопрозрачных ограждающих конструкций. Технические условия»)

Обозначение системы и марки сплава	Массовая доля элементов, в процентах										
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	Прочие	
АД 31										Каж- дый	Сумма
AlMgSi 0,5	0,3–0,6	0,10–0,30	0,10	0,10	0,35–0,60	0,05	0,15	0,10	Остальное	0,05	0,15
AlMgSi 6060	0,3–0,6	0,10–0,30	0,10	0,10	0,35–0,60	0,05	0,15	0,10	Остальное	0,05	0,15
AlMg0,7Si	0,3–0,6	0,10–0,30	0,10	0,15	0,60–0,90	0,05	0,15	0,10	Остальное	0,05	0,15

Табл. 2.1.2
Номинальный химический состав деформируемых алюминиевых сплавов, применяемых для производства оконных (фасадных) профилей (согласно DIN EN 573-3 Табл.6 — Алюминиевые сплавы — Серия 6000 — Al Mg Si)

Обозначение сплава	Марка	Химическая формула	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Замечания	Другие до- бавки		Алюми- ний min
															По от- дель- ности	В сово- купно- сти	
EN AW-6003	EN AW-Al Mg1 Si0,8		0,35–1,0	0,6	0,10	0,8	0,8–1,5	0,35	–	0,20	0,10	–	–	–	0,05	0,15	Остаток
EN AW-6005	EN AW-Al SiMg		0,6–0,9	0,35	0,10	0,10	0,40–0,6	0,10	–	0,10	0,10	–	–	–	0,05	0,15	Остаток
EN AW-6005A	EN AW-Al SiMg(A)		0,50–0,9	0,35	0,30	0,50	0,40–0,7	0,30	–	0,20	0,10	–	–	0,12–0,50 Mn + Cr	0,05	0,15	Остаток
EN AW-6005B	EN AW-Al SiMg(B)		0,45–0,8	0,30	0,10	0,10	0,40–0,8	0,10	–	0,10	0,10	–	–	–	0,05	0,15	Остаток
EN AW-6008	EN AW-Al SiMgV		0,50–0,9	0,35	0,30	0,30	0,40–0,7	0,30	–	0,20	0,10	–	0,05–0,20	–	0,05	0,15	Остаток
EN AW-6011	EN AW-Al Mg0,9Si0,9Cu		0,6–1,2	1,0	0,40–0,9	0,8	0,6–1,2	0,30	0,20	1,5	0,20	–	–	–	0,05	0,15	Остаток
EN AW-6012	EN AW-Al MgSiPb		0,6–1,4	0,50	0,10	0,40–1,0	0,6–1,2	0,30	–	0,30	0,20	–	–	0,7 Bi; 0,40–2,0 Pb	0,05	0,15	Остаток
EN AW6012A	EN AW-Al MgSiSn		0,6–1,4	0,50	0,40	0,20–1,0	0,6–1,2	0,30	–	0,30	0,20	–	–	0,7 Bi; 0,40–2,0 Sn	0,05	0,15	Остаток
EN AW-6013	EN AW-Al Mg1 Si0,8CuMn		0,6–1,0	0,50	0,6–1,1	0,20–0,8	0,8–1,2	0,10	–	0,25	0,10	–	–	–	0,05	0,15	Остаток
EN AW-6014	EN AW-Al Mg0,6Si0,6V		0,30–0,6	0,35	0,25	0,05–0,20	0,40–0,8	0,20	–	0,10	0,10	–	0,05–0,20	–	0,05	0,15	Остаток
EN AW-6015	EN AW-Al Mg1 Si0,3Cu		0,20–0,40	0,10–0,30	0,10–0,25	0,10	0,8–1,1	0,10	–	0,10	0,10	–	–	–	0,05	0,15	Остаток
EN AW-6016	EN AW-Al Si1,2Mg0,4		1,0–1,5	0,50	0,20	0,20	0,25–0,6	0,10	–	0,20	0,15	–	–	–	0,05	0,15	Остаток

Обозначение сплава		Другие до- бавки	Замечания	V	Ga	Ti	Zn	Ni	Cr	Mg	Mn	Cu	Fe	Si	Alюми- ний пип
Марка	Химическая формула														
EN AW-6018	EN AW-Al Mg1SiPbMn	По от- дель- ности	c	-	-	0,20	0,30	-	0,10	0,6-1,2	0,30- 0,8	0,15- 0,40	0,7	0,50-1,2	Остаток
EN AW-6023	EN AW-Al Si1SnMgBi	По от- дель- ности	0,30-0,8 Bi; 0,6-1,2 Sn	-	-	-	-	-	-	0,40-0,9	0,20- 0,6	0,20- 0,50	0,50	0,6-1,4	Остаток
EN AW-6025	EN AW-Al Mg2,5SiMnCu	По от- дель- ности	-	-	-	0,20	0,50	-	0,20	2,1-3,0	0,6- 1,4	0,20- 0,7	0,7	0,8-1,5	Остаток
EN AW-6056	EN AW-Al Si1 MgCuMn	По от- дель- ности	d	-	-	d	0,10- 0,7	-	0,25	0,6-1,2	0,40- 1,0	0,50- 1,1	0,50	0,7-1,3	Остаток
EN AW-6060	EN AW-Al MgSi	По от- дель- ности	-	-	-	0,10	0,15	-	0,05	0,35-0,6	0,10	0,10	0,10- 0,30	0,30-0,6	Остаток
EN AW-6061	EN AW-Al Mg1SiCu	По от- дель- ности	-	-	-	0,15	0,25	-	0,04- 0,35	0,8-1,2	0,15	0,15- 0,40	0,7	0,40-0,8	Остаток
EN AW-6061A	EN AW-Al Mg1SiCu(A)	По от- дель- ности	e	-	-	0,15	0,25	-	0,04- 0,35	0,8-1,2	0,15	0,15- 0,40	0,7	0,40-0,8	Остаток
EN AW-6063	EN AW-Al Mg0,7Si	По от- дель- ности	-	-	-	0,10	0,10	-	0,10	0,45-0,9	0,10	0,10	0,35	0,20-0,6	Остаток
EN AW-6063A	EN AW-Al Mg0,7Si(A)	По от- дель- ности	-	-	-	0,10	0,15	-	0,05	0,6-0,9	0,15	0,10	0,15- 0,35	0,30-0,6	Остаток
EN AW-6065	EN AW-Al Mg1Bi1Si	По от- дель- ности	0,50-1,5 Bi; 0,05 Pb; 0,15 Zr	-	-	0,10	0,25	-	0,15	0,8-1,2	0,15	0,15- 0,40	0,7	0,40-0,8	Остаток
EN AW-6081	EN AW-Al Si0,9MgMn	По от- дель- ности	-	-	-	0,15	0,20	-	0,10	0,6-1,0	0,10- 0,45	0,10	0,50	0,7-1,1	Остаток
EN AW-6082	EN AW-Al Si1 MgMn	По от- дель- ности	-	-	-	0,10	0,20	-	0,25	0,6-1,2	0,40- 1,0	0,10	0,50	0,7-1,3	Остаток
EN AW-6082A	EN AW-Al Si1 MgMn(A)	По от- дель- ности	e	-	-	0,10	0,20	-	0,25	0,6-1,2	0,40- 1,0	0,10	0,50	0,7-1,3	Остаток

Профили из алюминиевых сплавов для изготовления светопрозрачных конструкций получают методом прессования — путем механического продавливания заготовки, нагретой до определенной температуры, через матрицу с заданным сечением. В современной терминологии, употребляемой зарубежными производителями, по аналогии с ПВХ применяется такое понятие как «экструзия». Поскольку алюминиевые сплавы, используемые для производства оконных профилей очень пластичны, метод прессования (экструзии) позволяет получать профили сложного сечения (см. раздел 3.2).

Коррозионная стойкость

Алюминий и его сплавы легко окисляются на воздухе, образуя на поверхности плёнку окисла толщиной 0,01...0,02 микрона, которая сама по себе, отличается высокой плотностью и прочностью. Это и определяет высокую коррозионную стойкость алюминия.

Профильные системы, изготовленные из алюминиевых сплавов и эксплуатируемые в неагрессивной, слабоагрессивной и среднеагрессивной средах, т.е. в подавляющем большинстве помещений гражданских зданий, можно применять без специальной защиты от коррозии. Характеристика устойчивости алюминиевых сплавов к воздействию различных химических веществ приведена в табл. 2.1.3.

Табл. 2.1.3
Таблица устойчивости алюминия
и его сплавов к воздействию различных химических веществ

№ п/п.	Наименование вещества
	Группа I. Хорошая сопротивляемость
1	Азотная кислота
2	Серная кислота
3	Лимонная кислота
4	Молочная кислота
5	Муравьиная кислота

Продолжение табл. 2.1.3

№ п/п.	Наименование вещества
6	Уксусная кислота
7	Фосфорная кислота
8	Хромовая кислота
9	Перекись водорода кислота
10	Аммиак газообразный безводный
11	Ароматические углеводороды
12	Бензол
13	Бензин
14	Этиловый спирт
15	Сероводород
16	Фенол
17	Окись и двуокись водорода
18	Питьевая сода
	Группа II. Неудовлетворительная сопротивляемость
1	Щелочная среда

Таким образом, при обычных эксплуатационных условиях (в неагрессивной окружающей атмосфере) коррозия алюминия обычно не рассматривается как фактор, способный нанести какой-либо существенный вред сооружению. За счёт образования естественного оксидного слоя считается, что алюминий в этих условиях обладает почти неограниченной долговечностью, что подтверждается хорошим техническим состоянием целого ряда объектов, возведённых в различных странах мира несколько веков назад.

Наиболее выдающийся пример — церковь San Gioacchino в Риме, где архитектор Лоренцо де Росси, уверенный в безграничном сроке службы неокрашенного алюминия, рекомендовал сделать из него купол, сохранившийся в отличном состоянии до сегодняшних дней.

Первым большим показательным проектом с использованием алюминия в строительстве стал концертный зал Dortmunder Westfalenhalle, возведённый в Германии в 1951–1952 гг. Конструкции кровли, площадью около 10.000 м² были выполнены из алюминиевых профилей, находящихся сегодня в безупречном состоянии.

Гостиница «Россия» в центре Москвы, снесённая в 2007 году, до последних дней сохраняла первоначальный вид алюминиевых панелей под «золото», которыми была отделана при строительстве в 1964–1969 гг.

Основным условием возникновения коррозии алюминиевых строительных конструкций является воздействие на них агрессивной атмосферы с высокой концентрацией соединений хлора, фтора или окислов SO₂ и NO₂ при высокой относительной влажности воздуха $f = 60..90\%$ и температуре окружающей среды порядка +20°C.

Такие условия могут возникнуть при возведении зданий на морских побережьях или в экологически загрязнённых промышленных районах, а также при использовании алюминиевых конструкций в зданиях бассейнов, аквапарков и других помещений с высоким уровнем влажности внутреннего воздуха и содержанием в нём соответствующих агрессивных веществ.

В этих условиях развивается так называемая нитевидная коррозия алюминия и его сплавов, которая может появиться уже через 6 месяцев после монтажа конструкций в здании. Коррозия такого типа распространяется по поверхности в форме тонких, прямолинейных, изогнутых или скошенных линий.

Нитевидная коррозия может возникать как на окрашенной, так и на неокрашенной алюминиевой поверхности. На неокрашенной поверхности она развивается в поверхностном слое, не проникая вглубь. При окрашенных поверхностях агрессивная среда проникает под плёнку краски через поры большого размера или другие места повреждений в плёнке. Осмотическое давление и большие объёмы продуктов коррозии вызывают отделение плёнки от основания.

В общем случае для защиты от коррозии и подготовки к последующей окраске поверхность профилей подвергают электролитической очистке — анодированию. Для предотвращения нитевидной

коррозии рекомендуется проводить специальную дополнительную операцию — предварительное тонкослойное анодирование (пред-анодирование) с последующим покрытием лакокрасочным материалом. Полости, в которых обработка поверхности невозможна, должны быть тщательно загерметизированы.

После пред-анодирования может использоваться любая другая декоративная обработка поверхности, жидкая или порошковая покраска, создающее желаемое цветовое решение и оттенок. По технологическим требованиям, покраска должна производиться сразу через 12–16 часов после этапа пред-анодирования. Поэтому такая технология обработки профилей возможна лишь на предприятиях, имеющие оборудование для выполнения обеих операций.

Необходимо отметить, что покрасочный слой в данном случае оказывает влияние только на эстетические свойства изделия, при этом никак не улучшая антикоррозионную устойчивость профиля. Устойчивость к появлению и развитию нитевидной коррозии создаётся исключительно за счёт пред-анодирования поверхности.

Описанные выше процессы нитевидной коррозии негативно влияют на внешний облик профильных элементов, однако не представляют реальной угрозы для прочностных свойств светопрозрачной оболочки. Основной причиной разрушения металлоконструкций (в том числе и из алюминиевых сплавов) является **электрохимическая коррозия**, происходящая в различных водных растворах и возможная в атмосферных условиях при воздействии влажного воздуха (электролитная среда).

В таких условиях при контакте двух металлов с определённой разницей потенциалов образуется **гальваническая пара**. В этом случае в рассматриваемой системе самопроизвольно развивается процесс растворения металла, обладающего большим отрицательным электродным потенциалом. Этот металл станет анодом и будет посылать свои ионы в раствор электролита, а другой металл — катодом, и в присутствии первого металла в электролите растворяться не будет.

В табл. 2.1.4. приведены нормальные электродные потенциалы для ряда металлов. Из указанной таблицы можно увидеть, что **алюминий обладает очень большим отрицательным потенциалом,**

и в среде электролита будет образовывать гальваническую пару с большинством металлов, при этом являясь анодом и разрушаясь. С точки зрения проектирования строительных конструкций, наиболее важна опасность разрушения алюминия и его сплавов за счёт образования гальванической пары со сталью.

Табл. 2.1.4

**Сравнительная таблица
нормальных электродных потенциалов для ряда металлов**

№ п/п	Наименование металла	В	№ п/п	Наименование металла	В
1	Медь	+ 0,33	8	Кадмий	– 0,40
2	Висмут	+ 0,28	9	Железо	– 0,44
3	Сурьма	+ 0,22	10	Хром	– 0,56
4	Олово	– 0,10	11	Цинк	– 0,76
5	Свинец	– 0,12	12	Марганец	– 1,10
6	Никель	– 0,23	13	Алюминий	– 1,34
7	Кобальт	– 0,29	14	Магний	– 1,53

Таким образом, наиболее слабым местом светопрозрачных оболочек, выполняемых на основе алюминиевых профильных систем, являются места сопряжения алюминиевых профилей со стальными крепёжными элементами (кронштейнами и болтами), где в обычных атмосферных условиях при воздействии влажного воздуха или дождевой воды, будут возможными локальные процессы электрохимической коррозии.

Учитывая указанный фактор, при проектировании навесных фасадов, к кронштейнам, за счёт которых осуществляется закрепление оболочки на несущих конструкциях здания, должны предъявляться строжайшие требования. Так, крепление фасадных конструкций, изготовленных из алюминиевых профильных систем SCHÜCO, к несущему каркасу здания допускается только при помощи кронштейнов, опорных пластин, опор (башмаков), анкеров, анкерных пластин, произведённых компанией «Schüco International KG»

и изготовленных из алюминиевых сплавов, нержавеющей стали или стали с антикоррозионным покрытием.

Крепежные метизы — саморезы, винты и др., которые при эксплуатации конструкции находится снаружи помещения, должны быть изготовлены из нержавеющей стали класса А4 согласно рекомендациям DIN EN ISO 3506. Крепежные метизы, находящиеся в процессе эксплуатации внутри помещения должны быть изготовлены из нержавеющей стали класса А2 согласно рекомендациям DIN EN ISO 3506.

2.1.2. Легированные стали. Химический состав. Разновидности

В настоящее время, наряду с системами из алюминиевых сплавов, всё более широкое применение в светопрозрачных фасадах и кровлях находят профильные системы из стали. По сравнению с алюминием сталь является гораздо более прочным материалом с плотностью 7700 — 7900 кг/м³ и модулем упругости $E = 210 \text{ кН/мм}^2$. При этом обладает гораздо большей устойчивостью к температурным воздействиям. Значения коэффициентов теплопроводности и линейного температурного расширения для сталей различных марок составляют соответственно $\lambda = 15 \dots 55 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ и $k = 11,0 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$. Применение стальных систем устраняет опасность возникновения электрохимической коррозии с несущими опорными кронштейнами и крепёжными элементами.

Строительные конструкционные стали в основном предназначены для работы в атмосферных условиях при обычной и пониженной температурах. Вместе с тем, как будет показано в последующих главах, светопрозрачные фасадные и кровельные оболочки, могут подвергаться воздействию достаточно высоких температур, вызываемых тепловым воздействием солнечной радиации. С этой целью при изготовления профильных элементов для ответственных светопрозрачных конструкций (фасадных и большепролётных светопрозрачных кровель) используют так называемые легированные стали, способные выдерживать широкий диапазон рабочих

температур — в общем случае от -269°C до $+1200^\circ\text{C}$ ^[25]. Согласно общепринятой терминологии, сталь называют легированной, если в её составе имеются специально введённые легирующие элементы или содержится более 1% Si или 1% Mn.

Химический состав применяемой стали определяется производителем профильной системы. В зависимости от функционального назначения сооружения или его отдельного элемента (окна, входной двери, фасада, кровли), современные профили для изготовления светопрозрачных конструкций могут изготавливаться из сталей различных видов. В стальных профильных системах Schüco Jansen, в основном, используются стали следующих марок:

«Сырая» сталь (S260NC / QStE260N / 1.0971) — С — макс. 0,16%; Si — макс. 0,5%; Mn — макс. 1,2%; P — макс. 0,025%; S — макс. 0,02%; Al — мин. 0,015%; Nb — макс. 0,09%; V — макс. 0,1%; Ti — макс. 0,15%

Оцинкованная сталь (S250GD) — с непрерывным горячим покрытием цинком (275 г/м^2) слоем около 20 микрон — С — макс. 0,2%; Si — макс. 0,6%; Mn — макс. 1,7%; P — макс. 0,1%; S — макс. 0,045%

Нержавеющая сталь 1.4301 (AISI 304 / X5CrNi18-10 / S30400 / 08X18H10) — С — макс. 0,07%; Cr — 17,0–19,5%; Ni — 8,0–10,5%; Si — макс. 1,0%; Mn — макс. 2,0%; P — макс. 0,045%; S — макс. 0,015%; N — макс. 0,11%

Нержавеющая сталь 1.4307 (AISI 304L / X2CrNi18-9 / S30403 / 03X17H9) — С — макс. 0,03%; Cr — 17,5–19,5%; Ni — 8,0–10,5%; Si — макс. 1,0%; Mn — макс. 2,0%; P — макс. 0,045%; S — макс. 0,015%; N — макс. 0,11%

Нержавеющая сталь 1.4401 (AISI 316 / X5CrNiMo17-12-2 / S31600 / 07X17H12M2) С — макс. 0,07%; Si — макс. 1,0%; Mn — макс. 2,0%; P — макс. 0,045%; S — макс. 0,03%; Cr — 16,5–18,5%; Mo — 2,0–2,5%; Ni — 10,0–13,0%; N — макс. 0,11%

Нержавеющая сталь 1.4404 (AISI 316L / X2CrNiMo17-12-2 / S31603 / 03X17H13M2) С — макс. 0,03%; Si — макс. 1,0%; Mn — макс. 2,0%; Cr — 16,5–18,5%; Mo — 2,0–2,5%; Ni — 10,0–14,0%.

2.2. Стекло как основной конструкционный материал светопрозрачного заполнения

Важнейшим и до сих пор не решённым вопросом теории «стеклянных» зданий и сооружений является чрезмерная подверженность стекла хрупкому разрушению — часто непредсказуемому, которое может произойти самопроизвольно в любой момент эксплуатации изделия. Таким образом, основной критерий проектирования строительных конструкций, связанный с обеспечением запаса надёжности, пока ещё остаётся неясным во многих аспектах. Несмотря на то, что сам по себе процесс разрушения стекла на сегодняшний день уже достаточно изучен при помощи методов механики разрушения, природные движущие силы, запускающие этот процесс, так и остаются до конца не понятыми. Как в отечественных, так и в зарубежных публикациях справедливо отмечается недостаток специальных знаний, необходимых для построения логичных и понятных методов расчёта, как это существует для всех «нестеклянных» строительных элементов зданий и сооружений.

В опубликованных источниках мы можем увидеть справедливый акцент на возникновение и развитие поверхностных и краевых трещин. Вместе с тем, очевидно, что **необходимым первоначальным условием для разрушения стеклянных пластин является возникновение некоторого напряжённого состояния — статического или многократно повторяемого под действием циклических нагрузок. Сосредоточенная локальная нагрузка в месте концентратора напряжений — трещины, выступает в данном случае в виде дополнительного фактора, в определённый момент времени набирающего критическую энергию, достаточную для разрушения пластины.** При проведении расчётов светопрозрачных конструкций принципиально важным является описание именно этого стартового состояния, которое возникает при действии статических нагрузок, вызывающих изгибные деформации в стёклах, и может быть рассмотрено как стадия, предшествующая разрушению.

Для анализа напряжённого состояния стеклянных пластин, вызываемого действием равномерно распределённых статических нагрузок, в настоящее время используются методы линейной теории упругости, справедливой для тонких пластинок, подвергающихся малым прогибам. Однако сопоставление результатов расчётов, полученных на основании этих методов, даёт весьма условную сходимость с результатами экспериментов — реальные эксплуатационные прогибы листового стекла без разрушения значительно превышают расчётные^[44]. Необходимо отметить, что учёт влияния тепловой обработки на прочностные свойства стекла в существующих методах расчёта также весьма условен. А поведение стекла в интервале реальных эксплуатационных температур не изучено, можно сказать, совсем.

Очевидно, что ответ на поставленные вопросы необходимо искать в области процессов формирования стекловидного состояния, макрохимической структуры стекла, а также в особенностях его изготовления и тепловой обработки. В разделах настоящей главы, в основном охватывающих круг технологических вопросов, наряду с достаточно освещёнными в специализированной литературе аспектами, связанными с формированием микроклимата зданий и их архитектурного облика, большое внимание уделено физико-химическим характеристикам стекла, определяющим его прочностные свойства. Подробное рассмотрение указанных факторов необходимо для внесения определённой ясности в вопросы распределения нагрузок и напряжений в стеклянных пластинах и стеклопакетах, рассматриваемые в *главе 4*, а также понимания предпосылок разрушения готовых стеклянных изделий на стадии монтажа и непосредственно в процессе эксплуатации сооружения.

2.2.1. Стекловидное состояние. Структурная химия стекла

Стекловидное состояние, по мнению многих исследователей, является самой сложной и до сих пор наименее изученной формой существования материи. Согласно общему определению комиссии

по терминологии Академии наук СССР, «стеклом называются все аморфные тела, получаемые путём переохлаждения расплава, независимо от их химического состава и температурной области затвердевания, и обладающие в результате постепенного увеличения вязкости механическими свойствами твёрдых тел; причём процесс перехода из жидкого состояния в стеклообразное должен быть обратимым»^[11]. Стекловидные материалы являются веществами аморфными, изотропными, т.е. такими, свойства которых не зависят от того направления, в котором они измерены. Стёкла изотропны, т.к. имеют по всем направлениям в среднем однородную структуру. При понижении температуры любого стекловидного расплава происходит нарастание его вязкости, что приводит к образованию твёрдого тела.

Представление о стекле как о сложной системе впервые изложил и научно обосновал Д.И. Менделеев. Согласно определению Менделеева, стекло не есть определённое химическое соединение, как полагали многие химики первой половины XIX века, а является сплавом окислов, подобным металлическим сплавам переменного состава. Менделеев рассматривал структуру стёкол как сложную систему, различая в ней две составные части — неизменяемую (главную) и изменяемую. При этом под главной частью подразумевался основной каркас кремнезёмистого сплава, изменение которого привело бы к изменению соединения в целом. Изменяемая же часть, по мнению Менделеева, могла подвергаться изменениям и претерпевать замещения.

Таким образом, современные представления о стекле, как о весьма сложном расплаве высокой вязкости, были заложены Д.И. Менделеевым и в дальнейшем получили своё развитие в работах Таммана. **В настоящее время мы рассматриваем стекло как сложную жидкую систему, находящуюся в переохлаждённом состоянии.**

Базовый химический состав строительного стекла образуется группой природных материалов — основных сырьевых компонентов, перечень которых приведён в *табл. 2.2.1.1*. Пропорциональное массовое соотношение материалов в стекловидном расплаве приведено в соответствии с действующим европейским стандартом EN 572-1.

Табл. 2.2.1.1

Химический состав натриево-силикатного строительного стекла
(согласно EN 572-1)

Составляющая	Химическая формула	Массовая доля, %
Окись кремния	SiO ₂	69–74
Окись натрия	Na ₂ O	10–16
Окись кальция	CaO	5–14
Окись магния	MgO	0–6
Окись алюминия	Al ₂ O ₃	0–3
Другие		0–5

Из *табл.2.2.1.1* можно увидеть, что основная структура стекловидного расплава образуется оксидом кремния — кремнезёмом, представленным в расплаве, согласно Д.И. Менделееву, полимеризованными молекулами Si_nO_{2n} образующими, так называемую силикатную стеклообразную систему.

В современных теориях строения такой системы мы можем наблюдать определённые разногласия, отражающиеся в наличии двух ярко выраженных научных направлений. В европейских странах и США наиболее признанной является теория Захарисена, согласно которой структура стекла, как и структура соответствующего кристаллического тела, представляет непрерывную сетку, в узлах которой расположены ионы, атомы или атомные группы. Однако, в отличие от обычной кристаллической сетки, образуемой путём многократного закономерного повторения элементарной ячейки, структурная сетка стекла является неправильной (*рис.2.2.1.1*). Согласно определению Американского сообщества по испытаниям и материалам, стекло является «неорганическим расплавленным продуктом, который охлаждается и затвердевает без нормальной кристаллизации»^[34]. Образующей структурой неправильной кристаллической решётки стекла являются полимеризованные молекулы кремния с вкраплением ионов натрия Na⁺ и кальция Ca⁺.

Наряду с современным представлением о теории строения стекла, принятой в западных странах, в Советском Союзе было

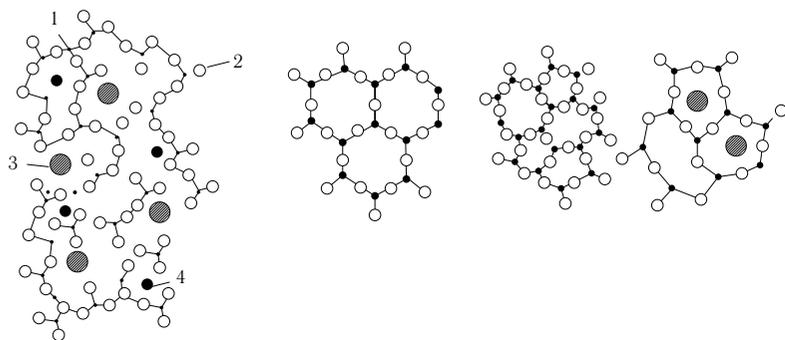


Рис. 2.2.1.1.

Схема структуры натриево-силикатного стекла по Захариасену.

1 — кремний (Si); 2 — кислород (O_2);
3 — натрий (Na); 4 — кальций (Ca).

разработано собственное научное направление, основные идеи которого были впервые сформулированы в 1921 году академиком А.А. Лебедевым и в дальнейшем исследовались в работах Н.Н.Валенкова и Е.А. Порай-Коршица. Эти исследования легли в основу так называемой **кристаллитной теории строения стекла**, первоначально встретившей ряд справедливых возражений, однако в дальнейшем показавшей свою большую жизнеспособность по сравнению с теорией неправильной структурной сетки.

Согласно этой теории, структуру стёкол можно рассматривать как скопление чрезвычайно мелких деформированных кристаллов — кристаллитов, аналогичных по своим характеристикам кристаллическим силикатам и кремнезёму. Если рассматривать кристаллиты как сильно деформированные обломки нормальных кристаллических решёток, то можно полагать, что в центральной части кристаллит имеет структуру, наиболее близкую к структуре соответствующей нормальной кристаллической решётки, а при переходе из центра к периферии в структуре кристаллита накапливаются всё большие неправильности. Таким образом, в периферической области, граничной с другими кристаллитами, структура оказывается аморфной (рис.2.2.1.2).

Дальнейшие научные исследования, проведённые в нашей стране^[11], выявили значительное количество факторов, позволивших

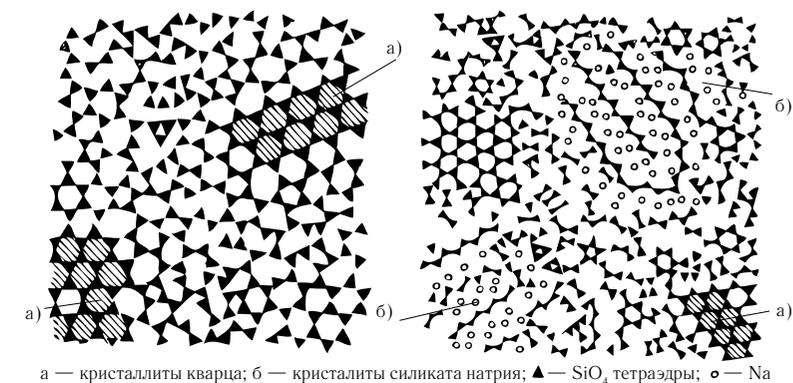


Рис. 2.2.1.2.

Схема кристаллитной структуры стекла по Е.А. Порай-Коршицу:

1 — кварцевого; 2 — натриево-силикатного

утверждать, что теория кристаллитного строения стекла точнее и детальнее объясняет физические свойства стёкол, нежели теория неправильной структурной сетки.

С точки зрения инженерно-строительного проектирования на этом уровне знаний принципиально важен вопрос об оценке степени пластичности стекла, его упругих деформаций и релаксации напряжений. В частности, кристаллитная теория позволяет предположить, что стеклянные пластины не являются абсолютно пластичными. В момент установки их на строительном объекте в качестве элемента готового изделия (стеклопакета), они приобретают деформированное состояние, зависящее от величины действующих нагрузок, при этом никогда более не возвращаясь к идеально ровной плоскости. Если при монтаже изделий в стеклопакете возникают значительные климатические нагрузки, описанные в главе 4, то это сопровождается значительными зрительными искажениями фасадной плоскости, сохраняющимися в изменяемом виде на протяжении всего срока эксплуатации сооружения (см. главу 4).

На современном уровне проектирования светопрозрачных конструкций, кристаллитная теория позволяет и более близко подойти к вопросу оценки нагрузок, действующих на стеклянные пластины, в зависимости от времени их действия и постепенности прироста

значений. Как показывает практический опыт, тонкие пластины строительного стекла могут выдерживать весьма значительные по величине статические изгибающие нагрузки (см. главу 4), относительно медленно возрастающие во времени. При этом резкий нагрев стеклянной пластины, известный в специальной литературе под термином «термоудар», разрушает её практически мгновенно.

Очевидно, что основы кристаллитной теории гораздо точнее соответствуют характеру самопроизвольного разрушения стекла, вызываемому пороками стекломассы (см. раздел 2.2.5), а также объясняют само по себе наличие кристаллических включений-дефектов в готовом изделии. При этом на основе кристаллитной теории гораздо легче объясняются, например, такие факторы как более высокие прочностные характеристики молированного (изогнутого) стекла, полученного методом горячей гибки (нагревание стекла до температуры, близкой к точке размягчения) по сравнению с молированными стёклами холодной гибки (нагревание стекла до температуры + 70 °С).

2.2.2. Технологические особенности производства стекла

При оценке надёжности и долговечности сооружений из стекла необходимо понимать, что, несмотря на значительные успехи, достигнутые в технологии его производства, на сегодняшний день идеально бездефектная, однородная стекломасса не может быть получена. Процесс стекловарения протекает в сложной обстановке, создаваемой рядом физических и технологических факторов. Он состоит из пяти основных стадий, протекающих в различных температурных режимах. Сырьевая смесь материалов, используемая для производства стекла — **шихта**, состоит из природных материалов, доступных по всему миру, — кварцевого песка, извести, доломита (мела), полевого шпата или синтетических веществ — соды и различных сульфатов и значительного количества стеклобоя.

К концу первой стадии — **силикатообразования**, заканчивающейся при температуре 800–900 °С, в шихте не остаётся отдель-

ных составляющих её компонентов (нет отдельно песка, соды, мела и др.) — между компонентами шихты завершаются основные химические реакции в твёрдом состоянии. На этой же стадии из шихты улетучивается большинство газообразных веществ.

К концу второй стадии — **стеклообразования**, заканчивающейся при температуре 1150–1200 °С, масса становится прозрачной. В ней отсутствуют непроваренные частицы шихты. Однако на этой стадии стекломасса является неоднородной — она пронизана большим количеством газовых включений — пузырей и свилей (см. раздел 2.2.5).

От видимых газовых включений стекломасса освобождается на третьей стадии — **дегазации**, завершающейся при температуре 1400–1500 °С.

На четвёртой стадии — **гомогенизации** — стекломасса освобождается от свилей и становится однородной.

Пятая стадия — **охлаждение (студка)** — характеризуется снижением температуры стекломассы на 200–300 °С с целью создания необходимой рабочей вязкости для выработки изделия.

В процессе стеклообразования имеет место сложная совокупность физико-химических процессов, относительно чёткая классификация которых была впервые сделана только в 1920 году В. Тернером. А именно:

Физические изменения

1. испарение влаги;
2. нагревание шихты;
3. плавление отдельных её компонентов;
4. растворение веществ в твёрдом или жидком состоянии в уже образовавшейся жидкости;
5. изменение кристаллической формы;
6. улетучивание некоторых составных частей.

Химические реакции

1. расщепление гидратов;
2. удаление химически связанной воды;
3. разложение карбонатов, сульфатов, нитратов и перекисей;
4. взаимодействие различных компонентов и образование силикатов.

Физико-химические процессы

1. взаимодействие между жидкой стекломассой и газообразными компонентами атмосферы печи;
2. взаимодействие между стекломассой и включенными в неё газами;
3. взаимодействие между газовой фазой стекломассы и газовой фазой пузырей, включённых в стекломассу;
4. взаимодействие между газами печи и газами, включенными в стекломассе и пузырях, пронизывающих её;
5. взаимодействие между стекломассой и огнеупором.

Сложность процессов, происходящих при варке стекла и связанных с неоднократным преобразованием вещества, определила трудное и протяжённое во времени развитие технологий его изготовления. Особенно — в области строительных стёкол, где необходимо было освоить изготовление тонких и больших по формату пластин.

Проблема вытягивания непрерывной ленты стекла со стабильными геометрическими свойствами была решена только в начале XX столетия одновременно двумя изобретателями, работавшими совершенно независимо друг от друга — бельгийским инженером Фурко и американцем Кольберном.

По способу Эмиля Фурко, разработанному в 1902 году, стекло вытягивалось из стекловаренной печи в виде непрерывной ленты по вертикали (рис. 2.2.2.1а). Затем через прокатные валцы оно поступало в шахту охлаждения, в верхней части которой резалось на отдельные листы. Толщина стекла при этом регулировалась путем изменения скорости вытягивания. Для повышения качества обработки поверхности такое стекло подвергалось шлифовке и полировке.

Особенность машины Кольберна заключалась в горизонтальном направлении вытягиваемой ленты, которая лишь на очень небольшом протяжении от поверхности расплавленного стекла сохраняла вертикальное положение, после чего изгибалась на 90° и продолжала вытягиваться уже горизонтально (рис. 2.2.2.1б).

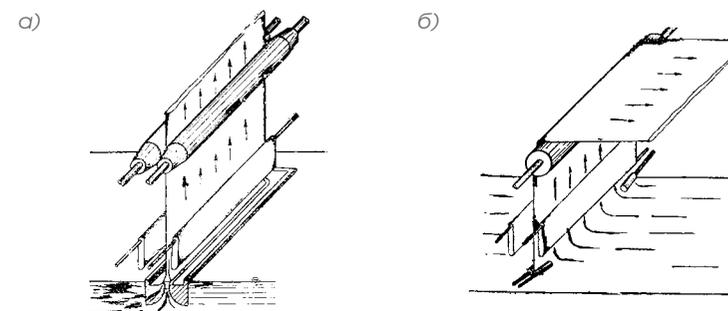
Оба способа вытягивания листового стекла получили широкое распространение — способ вертикального вытягивания в Европе, способ горизонтального вытягивания в США — и просущество-

Рис. 2.2.2.1.

Вытягивание ленты стекла.

а) Вертикальное вытягивание методом Фурко;

б) Горизонтальное вытягивание методом Кольберна



вали в качестве основного способа производства строительного стекла вплоть до 1959 года. В 1959 году английским изобретателем Аластером Пилкингтоном был изобретён так называемый **флоат** — метод (от англ. float — плавать на поверхности) производства листового стекла, который в настоящее время применяется всеми крупными мировыми производителями (рис. 2.2.2.2).

При флоат-процессе расплавленная стекломасса из стекловаренной печи поступает на валки прокатной машины; после чего лента стекла попадает в ванну с расплавленным металлом (оловом). В ванне лента стекла движется по поверхности расплавленного металла и обогревается снизу металлом, а сверху газом. Ванна разделена на отдельные зоны — зону нагрева и зону охлаждения.

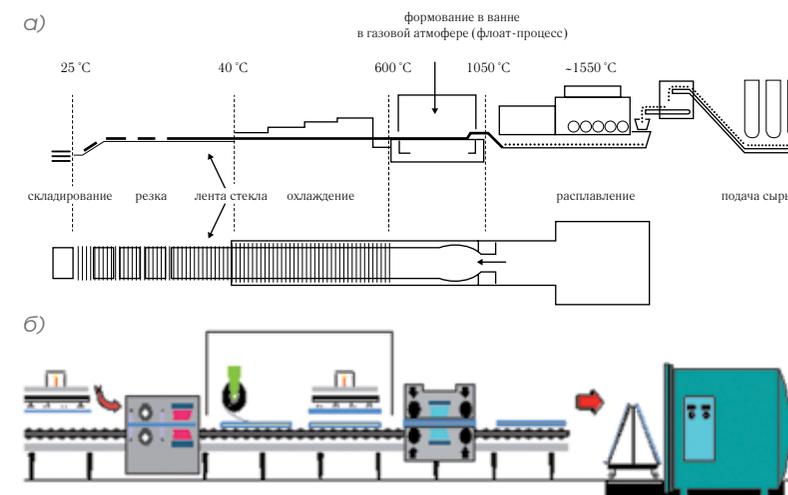


Рис. 2.2.2.2

Схема технологической линии по производству флоат-стекла

а) вид сверху;
б) продольный разрез

Температура в нагревательной зоне поддерживается около 1000 °С. В этой зоне исчезают все неровности стекломассы. Благодаря поверхностному натяжению, толщина ленты стекла получается абсолютно одинаковой. В зоне охлаждения лента охлаждается до 600 °С, после чего по роликовому конвейеру поступает в печь отжига, где происходит постепенное охлаждение стекла до температуры окружающей среды.

Отжиг стекла, осуществляемый в несколько последовательных стадий, производится с целью устранения внутренних напряжений, которые возникают в случае его быстрого неконтролируемого охлаждения до комнатной температуры. В процессе отжига сначала производится охлаждение изделия до температуры отжига, затем выдерживание при этой температуре в течение времени, необходимого для устранения напряжений, после чего производится медленное охлаждение изделия от температуры отжига до температуры окружающей среды со скоростью, при которой в изделии не могут образоваться опасные временные внутренние напряжения, которые могут разрушить изделие. Тщательно отожженное стекло приобретает стабильные физико-химические свойства. В таком состоянии оно готово к резке в листы размером 6000 x 3210 мм (формат JUMBO).

2.2.3. Тепловая и химическая обработка стекла. Повышение механической прочности

При необходимости дополнительного повышения прочностных характеристик стекла его подвергают закалке, обеспечивающей закономерное распределение напряжений в стеклянной пластине. Закалка стекла является старейшим приёмом тепловой обработки, связанном с повышением предела прочности стекла при растяжении и изгибе. По различным данным, прочность закалённого листового стекла превышает прочность отожжённого листового стекла при изгибе в 5–7 раз; в 3–4 раза при растяжении и в 4–5 раз при ударе.

Поскольку работа стеклянных пластин в строительных конструкциях, прежде всего, связана с восприятием знакоперемен-

ных изгибающих нагрузок, изучение напряжённого состояния закалённых стёкол является важнейшим вопросом с точки зрения повышения надёжности светопрозрачных конструкций.

В готовой пластине отожжённого стекла, вышедшего с конвейера, будет наблюдаться специфическое распределение внутренних напряжений, классифицируемое в специальной литературе термином «постоянное остаточное напряжение» (permanent residual stress) и иллюстрируемое диаграммой *рис.2.2.3.1*.

На схеме *рис.2.2.3.1* хорошо видны две характерных зоны напряжений сжатия вблизи поверхностей пластины и зона растягивающих напряжений в её центральной зоне. Такая картина имеет место, поскольку наружные слои стекла охлаждаются быстрее и, соответственно, быстро твердеют. Охлаждение внутренних слоёв и их термическое сжатие происходят уже под твёрдой поверхностной коркой. Эта корка создаёт растягивающие усилия во внутренних слоях, а наружные слои, в свою очередь, приобретают напряжения сжатия. Распределение внутренних напряжений зависит от толщины стеклянной пластины, режима охлаждения и химического состава стекла.

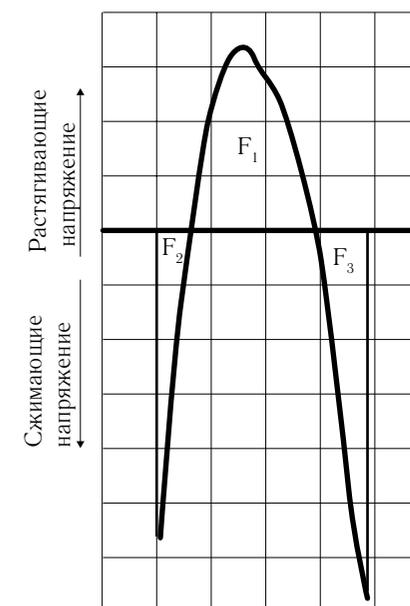


Рис. 2.2.3.1.
Распределение напряжений в отожженном листовом стекле

Очевидно, что из условия равновесия площадь эпюры F_1 , характеризующей напряжения растяжения, должны быть равна сумме площадей $F_1 + F_2$, характеризующих напряжения сжатия. В идеальном случае, области F_1 и F_2 должны быть симметричны относительно центральной оси пластины (см. рис.2.2.3.2). Однако это практически не осуществимо для реальной ленты стекла, выходящей с конвейера, где распределение остаточных напряжений изменяется по площади и толщине изделия за счёт различных условий охлаждения.

При закалке стекла, за счёт соответствующей термической обработки, происходит выравнивание напряжений растяжения-сжатия и их симметричное распределение по толщине пластины. Для этого стекло равномерно нагревается до температуры, близкой к температуре размягчения (чуть выше $570\text{ }^\circ\text{C}$), а затем быстро и равномерно охлаждается. В результате в пластине стекла формируется характерное распределение напряжений, иллюстрируемое рис.2.2.3.2.

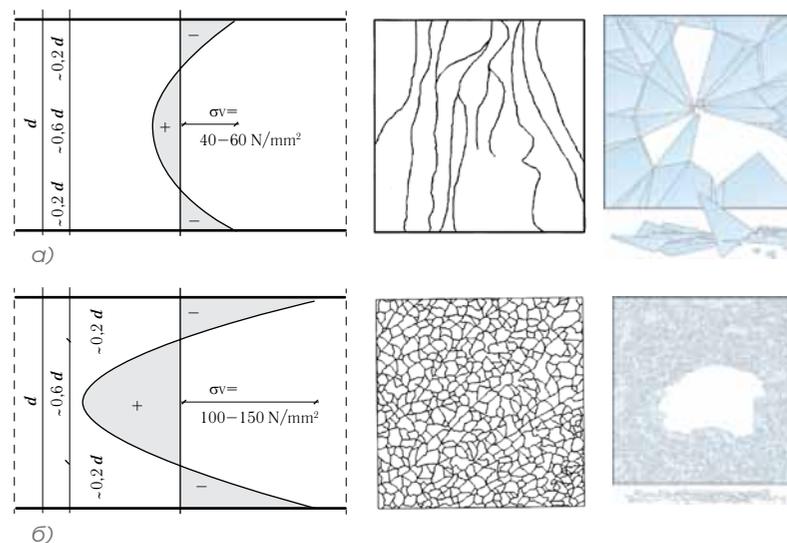


Рис. 2.2.3.2.
Распределение напряжений и характерная картина разрушения листового стекла.
а) Отожжённое стекло согласно (DIN EN 1863-1);
б) Закалённое стекло (согласно DIN EN 12150)

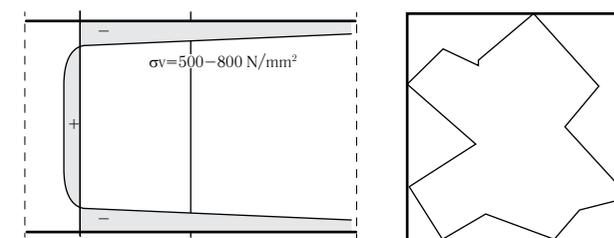
При рассмотрении эпюр напряжений на рис. 2.2.3.2 можно увидеть, что в пластине стекла наибольшие напряжения сжатия сосредоточены на поверхности. Слои, расположенные на некоторой глубине от поверхности, имеют меньшие напряжения сжатия, и ве-

личина этих напряжений уменьшается по мере погружения вглубь пластины. На некоторой глубине имеет место некоторая нулевая линия напряжений, начиная от которой обнаруживаются уже растягивающие напряжения, достигающие максимума вблизи центральной оси.

В результате закалки происходит увеличение поверхностных сжимающих напряжений; при этом из условия равновесия, резко увеличиваются и внутренние растягивающие напряжения. Таким образом, **увеличение прочности, достигаемое при закалке стекла, сопровождается увеличением внутренних напряжений, проявляющимся в характерной картине разрушения с образованием мелкодробной сетки трещин.**

Снижение внутренних растягивающих напряжений достигается при использовании метода химического упрочнения стекла, заключающегося в кислотной обработке поверхности и используемого в качестве альтернативы закаливанию. В результате происходит уплотнение кремнезёмной плёнки поверхностного слоя с резким увеличением в нём сжимающих напряжений, сопровождающееся перераспределением и выравниванием растягивающих напряжений внутри стеклянной пластины (рис.2.2.3.3).

Рис. 2.2.3.3.
Распределение напряжений в химически упрочненном стекле и характерная картина разрушения (согласно DIN EN 12337)



Из рис. 2.2.3.2 и рис.2.2.3.3 можно увидеть, что **вне зависимости от химического состава и обработки, начальное рабочее состояние стеклянной пластины всегда характеризуется неравномерным распределением напряжений в её поперечном сечении, которое не учитывается классическими уравнениями теории упругости.** Иными словами, имеет место **некоторое неравномерное**

преднапряжённое состояние пластины (сложное распределение напряжений по сечению в ненагруженном состоянии).

Это, в известной степени объясняет существенное расхождение в результатах расчётов стеклянных пластин, и экспериментальных данных, упомянутые в начале настоящей главы и дополнительно рассмотренные в главе 4.

2.2.4. Физико-химические свойства стекла в твёрдом состоянии

Фундаментальные научные исследования в области природы стеклообразного состояния рассматривают три базовых температурных интервала, характеризующих состояние стекловидного расплава, а именно: твёрдое состояние вещества — для стекла в нормальных эксплуатационных условиях; жидкое состояние, соответствующее полному расплавлению, и переходное пластическое состояние, в значительной степени определяемое химическим составом стекла.

С точки зрения эксплуатации в строительных конструкциях, изучение твёрдого состояния стекла, безусловно, является важнейшим. Оно характеризуется областью температур ниже температуры размягчения T_g , т.е. той области, где стекловидный расплав приобретает хрупкость. Для большинства строительных стёкол температура T_g находится в интервале от 550 до 600 °С.

Поскольку по своей природе стекло является композитным материалом-сплавом, его свойства, помимо чисто технологических параметров, в значительной степени определяются химическим составом и соотношением массовых долей образующих элементов. Соответственно, такие важные характеристики стекла как прочность на растяжение и сжатие, а также теплоёмкость и коэффициент линейного расширения в зависимости от определённого химического состава могут быть приближённо вычислены по эмпирическим формулам с точностью до 15–20%. Ниже приводятся такие вычисления для стекла со стандартным химическим составом (согласно табл. 2.2.1.1), дополнительно иллюстрирующие очень

широкий потенциал изменяемости и программируемости свойств этого материала.

Пример 1
Определение показателей прочности стекла на растяжение и сжатие в зависимости от химического состава.
 Согласно^[11]

$$\sigma_{\text{раст}} = P_1 F_1 + P_2 F_2 + \dots, \quad (2.2.4.1a)$$

$$\sigma_{\text{сж}} = P_1 f_1 + P_2 f_2 + \dots, \quad (2.2.4.1б)$$

Где

$\sigma_{\text{раст}}$ — предел прочности на растяжение, кг/мм²;

$\sigma_{\text{сж}}$ — предел прочности на сжатие, кг/мм²;

P_1, P_2 — содержание окислов в стекле в %;

F_1, F_2 — коэффициенты, характеризующие прочность соответствующих окислов, принимаемые по табл.2.2.4.1.

Табл. 2.2.4.1

Коэффициенты различных окислов для расчёта прочности стекла при растяжении F и сжатии f

	F	f		F	f
SiO ₂	0,09	1,23	Zn O	0,15	0,6
Na ₂ O	0,02	0,6	CaO	0,2	0,2
K ₂ O	0,01	0,05	PbO	0,025	0,48
Mg O	0,01	1,1	Al ₂ O ₃	0,05	1

Для стекла, имеющего химический состав согласно^[34] и табл.2.2.1 (SiO₂–72,8%; Na₂O – 13,8%; CaO – 8,6%; MgO – 3,6%; Al₂O₃ – 0,7%), вычисления по формулам (2.4.1a) и (2.4.1б) дадут результат:

$$\sigma_{\text{раст}} = 72,8 \times 0,09 + 13,8 \times 0,02 + 8,6 \times 0,2 + 3,6 \times 0,01 + 0,7 \times 0,05 = 8,6 \text{ кг/мм}^2 = 86 \text{ Н/мм}^2$$

$$\sigma_{\text{сж}} = 72,8 \times 1,23 + 13,8 \times 0,6 + 8,6 \times 0,2 + 3,6 \times 1,1 + 0,7 \times 1 = 104,2 \text{ кг/мм}^2 = 1042 \text{ Н/мм}^2$$

Пример 2

Определение коэффициента линейного расширения и теплоёмкости стёкол в зависимости от химического состава.

Согласно^[11]

$$C_{ст} = (P_1/100) C_1 + (P_2/100) C_2 + (P_3/100) C_3 + \dots \quad (2.2.4.4)$$

А формула для вычисления коэффициента термического расширения как

$$\alpha_{ст} = \alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2 + \alpha_3 P_3 + \dots \quad (2.2.4.5)$$

где

$C_{ст}$ — теплоёмкость, кал/(г °С)

$\alpha_{ст}$ — коэффициент линейного расширения, 1/°С

P_1, P_2, P_3 — содержание окислов в стекле в %;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ и C_1, C_2, C_3 — эмпирические коэффициенты для соответствующих окислов в стекле, принимаемые по табл.2.2.4.2.

Табл. 2.2.4.2

Коэффициенты для расчёта теплоёмкости стёкол и коэффициента линейного расширения в зависимости от химического состава

	C	$\alpha \times 10^7$		C	$\alpha \times 10^7$
SiO ₂	0,1913	0,05	Zn O	0,1248	0,07
Na ₂ O	0,2674	4,32	CaO	0,1903	1,66
K ₂ O	0,1860	3,9	PbO	0,0512	1,06
MgO	0,2439	0,45	Al ₂ O ₃	0,2074	0,67

Для стекла, имеющего химический состав согласно табл.3.2.1 (SiO₂—72,8%; Na₂O — 13,8%; CaO — 8,6%; MgO — 3,6%; Al₂O₃—0,7%), вычисления по формулам (2.4.4) и (2.4.5) дадут результат:

$$\alpha_{ст} = (72,8 \times 0,05 + 13,8 \times 4,32 + 8,6 \times 1,66 + 3,6 \times 0,45 + 0,7 \times 0,67) \times 10^{-7} = 8,0 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$$

$$C_{ст} = 72,8 \times 0,1913/100 + 13,8 \times 0,2674/100 + 8,6 \times 0,1903/100 + 3,6 \times 0,2439/100 + 0,7 \times 0,2074/100 = 0,204 \text{ кал/(г }^\circ\text{C)} = 855 \text{ Дж/(кг К)} = 0,86 \text{ кДж/(кг К)}$$

В современной технической литературе приводятся осреднённые характеристики стекла, учитывающие диапазон изменений химического состава. При этом в нормативных документах соответствующие показатели указываются в виде одной величины, принимаемой с учётом запасов, учитывающих производственные дефекты стекла, неизбежно возникающие из-за сложности технологического процесса его производства.

Характеристики обычного строительного стекла могут быть в общем виде представлены таблицей 2.2.4.3. Для наглядности в этой же таблице приведены аналогичные показатели других конструкционных строительных материалов — стали, алюминия и бетона.

Табл. 2.2.4.3

Сравнительная таблица физических свойств листового стекла и других конструкционных материалов^[34]

Свойство, единица измерения	Листовое стекло	Стекло закалённое	Сталь	Алюминий	Бетон
Плотность, кг/м ³	2500	2500	7800	2700	2300
Предел прочности при сжатии, МПа (Н/мм ²)	700–900	700–900	144–204	29–78	–
Предел прочности при растяжении, МПа (Н/мм ²)	30–100	50–150	360–510	89–107,5	–
Предел прочности при изгибе, МПа (Н/мм ²)	15–40	120–150	–	–	–
Модуль упругости E, МПа (Н/мм ²)	$7,3 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^4$	$2,7 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^4$	–
Коэффициент линейного расширения при температуре 20–300 °С, К ⁻¹	$9,0 \cdot 10^{-6}$	$9,0 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	–	–
Коэффициент теплопроводности, Вт/м К	1,0	1,0	50–58	204,0	2,3

Продолжение табл. 2.2.4.3

Свойство, единица измерения	Листовое стекло	Стекло закалённое	Сталь	Алюминий	Бетон
Удельная теплоёмкость, кДж/(кг °С)	0,67	0,67	0,462	0,92	1,13
Термостойкость (устойчивость к разнице температур), К	40	100			—
Максимальная температура эксплуатации, °С					
кратковременная	300	200			
долговременная	200	200			

Из табл. 2.2.4.3 хорошо видно, что стекло намного лучше работает на сжатие, нежели на растяжение и изгиб. Это является важнейшей особенностью стекла как конструкционного материала.

С показателями прочности стекла на растяжение и изгиб связано такое важнейшее его свойство как термостойкость. Под термостойкостью понимают способность стекла выдерживать, не разрушаясь, резкие изменения температуры.

Для оценки термостойкости стёкол иногда используют коэффициент термостойкости, определяемый как

$$K = \frac{\sigma_{\text{раст}}}{\alpha E} \sqrt{\frac{\lambda}{C\rho}} \quad (2.2.4.6)$$

где

$\sigma_{\text{раст}}$ — предел прочности стекла при растяжении;

α — коэффициент термического расширения;

E — модуль упругости

λ — коэффициент теплопроводности;

C — теплоёмкость;

ρ — плотность

Формула (2.2.4.6) хорошо иллюстрирует соотношение физических величин, определяющих термостойкость стекла, однако далеко не всегда совпадает с экспериментальными данными и не удобна в практическом использовании. При оценке возможного разрушения реальных конструкций удобнее пользоваться формулой, предложенной Г.И. Бартеневым и С.Г. Лиознянской, которая при условии охлаждения всего изделия (нагретой пластинки) запишется в виде (2.2.4.7а), а при местном охлаждении в виде (2.2.4.7б).

$$t - t_0 = \frac{\sigma_{\text{изг}} (1 - \vartheta)}{\alpha E} \quad (2.2.4.7a)$$

$$t - t_0 = 3x \frac{\sigma_{\text{изг}} (1 - \vartheta)}{\alpha E} \quad (2.2.4.7b)$$

где

t — температура нагревания;

t_0 — температура охлаждения;

$\sigma_{\text{изг}}$ — предел прочности стекла при изгибе;

α — коэффициент термического расширения;

E — модуль упругости

ϑ — коэффициент Пуассона (для стекла $\vartheta = 0,25$);

Как показывают экспериментальные данные, термостойкость стекла при нагревании оказывается значительно выше его термостойкости при охлаждении. Так, один и тот же образец стекла способен выдержать резкий нагрев на 450 °С, но разрушается при быстром охлаждении на 60 °С^[11]. Определяющую роль в данном случае играют напряжения, возникающие в поверхностных слоях, распределение которых при нагревании будет аналогично процессу закалки стекла.

С учётом указанных факторов формула (2.2.4.7б) при местном нагревании пластины стекла будет выглядеть как

$$t - t_0 = 1,5x \frac{\sigma_{\text{изг}} (1 - \vartheta)}{\alpha E} \quad (2.2.4.7в)$$

Из формулы (2.2.4.6) хорошо видно, что повышение термостойкости стекла может быть достигнуто при понижении его коэффициента термического расширения, которое может быть достигнуто за счёт изменения химического состава стекла. Добавление в стекломассу 7–15 % оксида бора позволяет снизить коэффициента термического расширения до величины $\alpha = 3,1...6,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (по сравнению с $9,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ для обычного натриевого стекла). Такое стекло называется боросиликатным и используется в огнезащитных конструкциях (печи, камины и др.). Все остальные показатели боросиликатного стекла (модуль упругости, теплопроводность, теплоёмкость) идентичны натриевому стеклу.

При оценке **возможного разрушения стекла от удара важнейшим показателем является прочность стекла на сжатие**. Хрупкость стеклянной пластины в основном зависит от её толщины и степени термической обработки (величины сжимающих напряжений в поверхностном слое). Прочность стекла на удар возрастает с увеличением толщины и возрастает в 5–7 раз для закалённого стекла по сравнению со стеклом отожжённым.

В общем случае прочность на удар может быть выражена как отношение прочности стекла при сжатии к энергии удара, т.е.

$$D = \frac{\sigma_{сж}}{A} \quad (2.2.4.8)$$

где

D — прочность на удар;

$\sigma_{сж}$ — предел прочности на сжатие;

A — работа, произведённая ударом, вызвавшим появление трещины.

2.2.5. Химическая устойчивость стекла

Строительное стекло является материалом, обладающим очень высокой химической стойкостью по отношению к подавляющему большинству реагентов. Сущность процессов его поверхностной

коррозии заключается в химической реакции образующих силикатов с атмосферной влагой. Силикаты поверхности, вступая во взаимодействие с водой и влагой воздуха, гидролизуются. Щелочные силикаты образуют при этом едкую щёлочь и гель кремниевой кислоты. В зависимости от общего состояния поверхности, разрушающая щёлочь может свободно вымываться или оставаться на стекле, концентрируясь, как правило, в микротрещинах. Гель кремниевой кислоты остаётся на поверхности в виде более или менее равномерного слоя. Этот слой замедляет процесс разрушения стекла, образуя со временем защитную кремнезёмную плёнку.

На практике процесс поверхностной коррозии стекла называют «выщелачиванием». Внешне он проявляется в виде белесоватых пятен, капельного налёта и др. Если поверхность стекла не омывается водой, а подвергается лишь воздействию паров воды или кислоты (что характерно для крупных экологически загрязнённых мегаполисов или морских побережий), то растворимые продукты гидролиза — едкие щёлочи и получающиеся из них в результате взаимодействия с углекислотой карбонаты, постепенно накапливаются на поверхности. Будучи гигроскопичными, они притягивают влагу и образуют мельчайшие капли концентрированных растворов щёлочи (капельный налёт). При изменении влажности или температуры окружающего воздуха, капельный налёт может высыхать или вновь появляться. При длительном соприкосновении капли концентрированного раствора щёлочи со стеклом происходят местные глубокие разрушения его поверхности.

С точки зрения практического применения в зданиях, возводимых в соответствующих строительных районах, представляют интерес разработки, связанные с повышением химической устойчивости поверхности стекла и известные достаточно много лет, однако не находящие широкого применения. В частности, опыт исследований, проведённых в Советском Союзе, показал, что химическая устойчивость поверхности стеклянных изделий может быть повышена в сотни и даже тысячи раз за счёт специальной обработки, в результате которой на поверхности стекла создаётся покрытие, обладающее гидрофобностью, но при этом не оказывающее

заметного влияния на оптические свойства (прозрачность) стекла. В качестве таких покрытий могут быть применены тончайшие плёнки из окислов алюминия и цинка, а также кислотно-парафиновые плёнки и покрытия^[11].

2.2.7. Факторы, влияющие на прочность стекла и резервы технического развития материала

Современная история развития стекла отражает его широкое применение в различных областях техники, включая высокотехнологичные и наукоёмкие оборонно-космические отрасли, где конструкционные элементы проектируются с учётом работы под действием экстремальных нагрузок. Это в известной степени опровергает настороженное отношение к стеклу со стороны строительных инженеров, как к материалу непрочному и очень хрупкому.

В современных зарубежных источниках^[34] можно встретить указание на теоретическую прочность листового стекла при изгибе, равную 6000 Н/мм^2 (6000 МПа), что намного превышает аналогичную величину для стали ($360\text{--}510 \text{ Н/мм}^2$). Однако реальная прочность листового стекла при изгибе составляет порядка 100 Н/мм^2 (100 МПа). При этом в инженерных расчётах, с учётом запаса, принимается величина равная всего лишь $15\text{--}30 \text{ Н/мм}^2$ ($15\text{--}30 \text{ МПа}$) (см. табл. 2.2.4.3). Что закладывается в этой разнице?

Такие значительные понижающие запасы связаны с пороками стекломассы, к которым относят различные нарушения физической и химической однородности, возникшие в процессе варки стекла. Аналогично недостаткам или нарушениями технологического режима формования и последующей обработки изделий, пороки стекломассы опасны, прежде всего, с точки зрения нарушения механической прочности стекла за счёт образования концентраторов локальных напряжений. Дефекты такого рода часто не обнаруживаются на стадии изготовления готовых строительных изделий (стеклопакетов) и выявляются на стадии эксплуатации в виде внезапного самопроизвольного нарушения целостности стекла.

Как уже отмечалось выше, несмотря на значительные успехи, достигнутые в технологии стекловарения за последние десятилетия, идеально однородной стекломассы на практике не существует. Стеклу, сваренному в промышленных печах, всегда свойственна та или иная степень неоднородности, тот или иной порок, а иногда и несколько. Причины появления пороков стекломассы в процессе варки и их виды очень разнообразны. В специальной литературе выделяется три основных вида, классифицируемых по агрегатному состоянию. А именно:

- Газовые включения;
- Стекловидные включения;
- Кристаллические включения.

Газовые включения обычно возникают вследствие попадания воздуха в стекломассу или неполного удаления газообразных продуктов разложения шихты. В готовом изделии они проявляются в виде пузырей различных газов внутри массы стекла (кислорода, азота, воздуха и др.), разнообразных по форме и размеру (рис. 2.2.7.1). Размеры пузырей могут быть от нескольких долей миллиметра до нескольких миллиметров. Мельчайшие пузыри в практике называют мошкой.

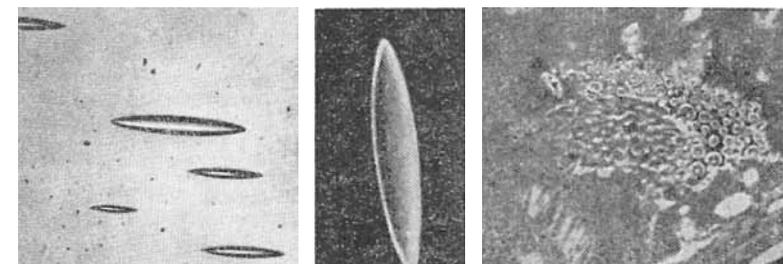


Рис. 2.2.7.1.
Газовые включения в листовом стекле

Стекловидные включения, которые могут содержаться в основной массе стекла, возникают вследствие недостаточной гомогенизации стекломассы или попадания в неё инородных веществ из окружающей среды. От основной массы стекла стекловидные включения отличаются своими свойствами и составом (плотностью,

коэффициентом преломления, коэффициентом теплопроводности, вязкостью). В специальной литературе включения такого типа называются **свилями** и **шлирами**. По внешнему виду они представляют собой более или менее резко выделяющиеся участки на основной массе стекла. Наиболее часто встречаются свиля в виде нитей, прямых или изогнутых, одиночных или располагающихся пучками (рис. 2.2.7.2). Тонкая свиль иногда даже невидима простым глазом. Нити, пронизывающие всю массу стекла, образуют так называемую грубую свиль или шлиры.

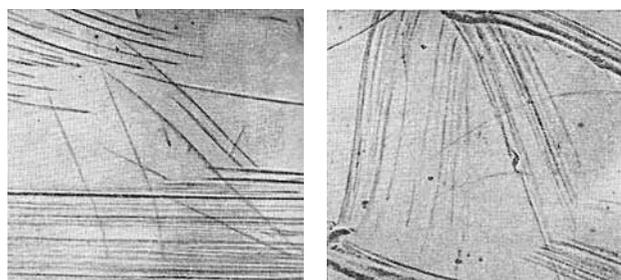


Рис.2.2.7.2.
Свиля в стекле

Кристаллические включения («камни») в стекломассе являются самым опасным её пороком. Они могут обнаруживаться в стекломассе, вследствие ряда технологических причин, приводящих к неоднородному провариванию шихты (плохое смешивание компонентов, неправильный температурный режим и др.). Кристаллические включения бывают самых различных размеров, форм и цвета: от мельчайших кристалликов, с трудом видимых даже в микроскоп, до крупных сферолитов с диаметром в несколько сантиметров. Кристаллы могут иметь разнообразную форму (в виде чешуи, иголок, октаэдров, кубов и др.) и располагаться в стекле в одиночку и целыми скоплениями. Примеры кристаллических образований в стекле приведены на рис. 2.2.7.3.

Часто кристаллические включения в стекле сопровождаются свилями, т.к. кристаллы, постепенно растворяясь в стекле, изменяют вокруг себя его состав. Иногда кристалл под действием высокой температуры расплавляется, но не растворяется в окружающем стекле. Тогда получается так называемый «узелок» — сте-

кловидная капля в стекле, дающая начало свиля. Таким образом, кристаллические и стекловидные включения тесно связаны и часто встречаются одновременно.

Аналогично газообразным и стекловидным включениям, кристаллические включения ухудшают внешний вид изделий и их оптическую однородность. Кроме того, они **резко снижают механическую прочность, т.к. создают дополнительные внутренние напряжения в стекле**. Как показывает практический опыт, **кристаллические включения являются основной причиной хрупкого разрушения стеклянных изделий**, которое, как правило, происходит непредсказуемо в любой момент эксплуатации изделия, независимо от длительности эксплуатации. В реальных условиях это явление характерно для стёкол, подвергшихся термической обработке (закалённых и огнеупорных), и соответственно, обладающих высокими внутренними напряжениями. При разрушении формируется характерная картина выпадения из единой массы стекла некоторой кристаллитной группы (см. рис. 2.2.1.2), образуемой вокруг дефектного кристалла. На рис. 2.2.7.4 показано разрушение боросиликатного каминного стекла, произошедшее через три года после начала эксплуатации.

Рис.2.2.7.3. Примеры кристаллических включений в стекле

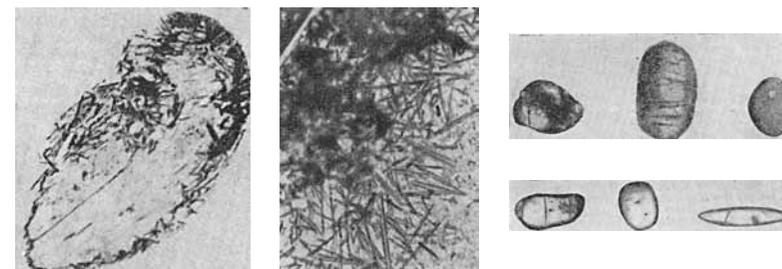


Рис. 2.2.7.4. Выпадение кристаллического элемента из боросиликатного каминного стекла



Второй аспект в понижающих коэффициентах связан с поверхностными дефектами, которые также неизбежно возникают в процессе изготовления стекла. Исследования этой проблемы были впервые начаты в 1920 году английским учёным А.А. Гриффитсом из Авиационного исследовательского центра в г. Фарнборо и впоследствии положены в основу важнейшей отрасли современной науки — механики разрушения.

Рассматривая стекло как идеальный материал для изучения процессов хрупкого разрушения, Гриффитс проводил свои опыты на стеклянных нитях, стеклянных сферических колбах и цилиндрических трубках. Им была впервые установлена зависимость между прочностью стеклянных волокон и их толщиной. Интересно отметить, что прочность стекловолокон малой толщины, достигнутая Гриффитсом при испытаниях, составила около 3000 МПа^[15].

Гриффитсом была впервые выдвинута идея о совершенствовании структуры кристаллов за счёт исправления поверхностных дефектов — микротрещин, царапин и т.п., являющихся местами концентрации разрушающих напряжений. В 1920 г. он писал: «Можно сделать общий вывод о том, что недостаточная прочность изотропных твёрдых тел, с которой обычно приходится встречаться, вызвана присутствием нарушений сплошности или дефектов, основные размеры которых велики по сравнению с межмолекулярным расстоянием. Эффективную прочность технических материалов можно повысить, по крайней мере, в 10—20 раз, если удастся устранить подобные дефекты».

В 30-х годах советские академики А.П. Александров и С.Н. Журков на стеклянных нитях достигли прочности 5900 МПа. А в 50-е годы в физико-техническом институте АН СССР имени А.Ф. Иоффе, под руководством Ф.Ф. Витмана были проведены исследовательские работы, позволившие повысить прочность оконного стекла до 4900 МПа против прежних 50 МПа^[15].

Таким образом, исследования проблем прочности стекла, проведённые зарубежом, а также в нашей стране по линии оборонных проектов, свидетельствует об имеющихся технических резервах этого материала, реальный потенциал которого ещё далеко не раскрыт для применения в строительстве.

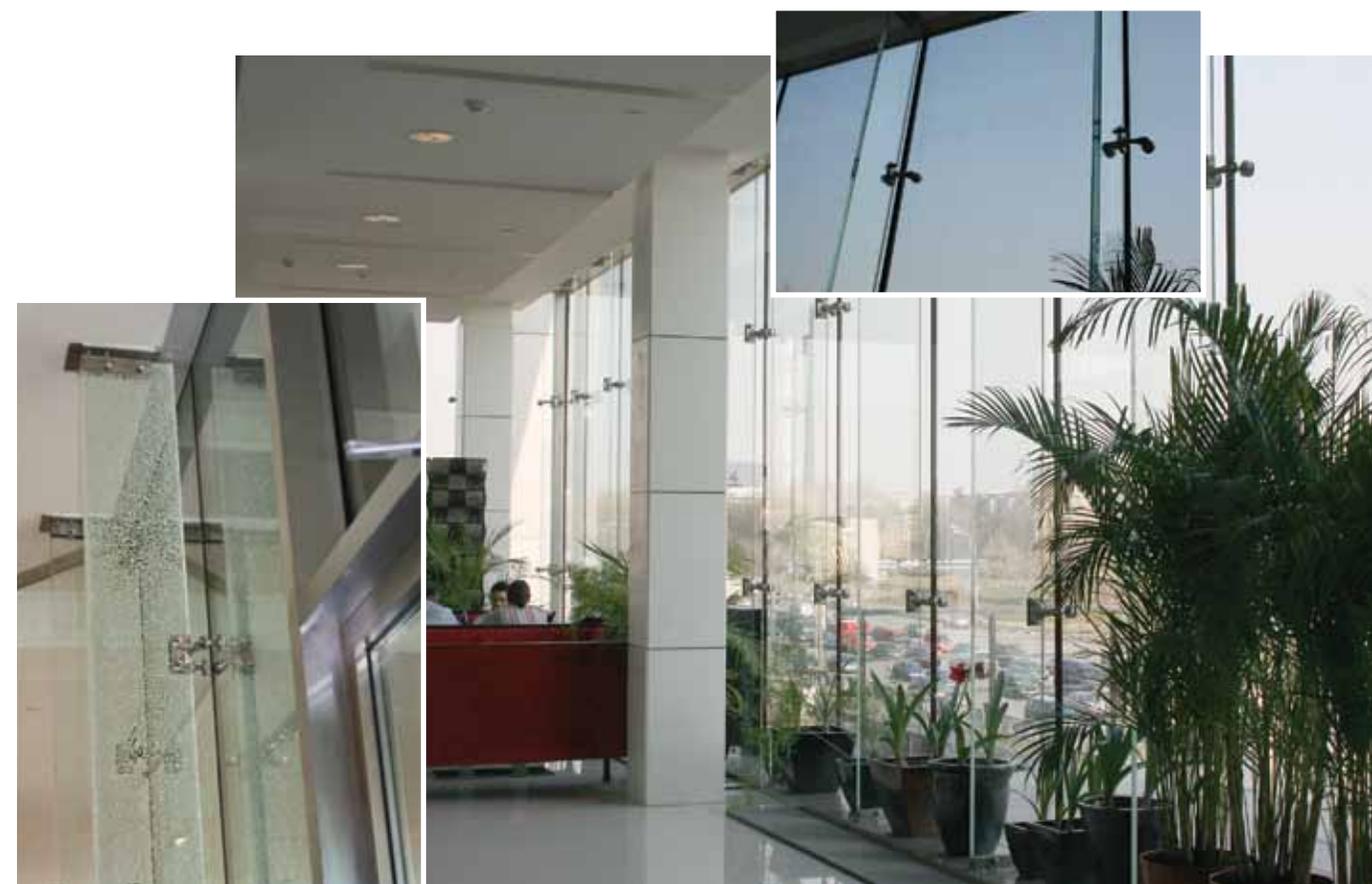
Экономические реформы, начавшиеся в конце 80-х годов XX столетия, остановили развитие научных исследований в нашей стране. Вместе с тем, несмотря на возрастающую тенденцию к использованию оборонных технологий в строительстве, направление по совершенствованию непосредственно стекла как конструкционного материала не прослеживается и в современной инженерно-строительной науке развитых стран. Аналогично всему предшествующему опыту, европейская строительная школа развивается по относительно простому пути улучшения технологий обработки стекла, а разработка проектных решений всё более выстраивается на оценочных методах теории вероятностей. На фоне возрастающего увлечения архитекторов несущими конструкциями из стекла (рис. 2.2.7.5), такой подход выглядит вдвойне нелогичным.

Тем не менее, в настоящей главе необходимо привести краткое описание основных технологических методов обработки стекла, влияющих на безопасность эксплуатации, надёжность и долговечность изготавливаемых из него конструкций.

Рис. 2.2.7.5.

Конструктивная схема спайдерного остекления (см. раздел 3.2) с применением несущих колонн из стекла.

Торговый комплекс «Времена года», г. Москва. Общий вид интерьеров и разрушение стекла в несущей колонне



2.2.8. Технологические способы повышения надёжности и безопасности строительных конструкций из стекла. Механическая обработка и ламинирование

Несмотря на кажущееся разнообразие современных технологических решений в области обработки стекла, фактический набор мероприятий, позволяющих повысить надёжность и безопасность изготавливаемых из стекла строительных конструкций, весьма ограничен.

Старейшим и до сих пор применяемым способом снижения риска разрушения стекла при изготовлении конструкций и их дальнейшей эксплуатации является механическая обработка (шлифовка) кромок по всему периметру пластины (рис. 2.2.8.1). Это простое и эффективное мероприятие приводит к ликвидации концентраторов напряжений по краям стекла в виде микротрещин, возникающих при резке. В идеале, помимо обработки по периметру, скругляются углы. Все виды механической обработки производятся до закалки стекла.

Другое достаточно старое и эффективное мероприятие сводится к предотвращению опасных последствий возможного разрушения стекла в процессе эксплуатации (падение с высоты острых режущих осколков). Технологически это решается за счёт использования безопасного многослойного стекла, которое может состоять из нескольких слоёв одинаковых или разных по толщине и типу стёкол, соединённых между собой при помощи промежуточного склеивающего слоя из плёнки или жидкообразного клеящего материала — смолы (рис. 2.2.8.2).

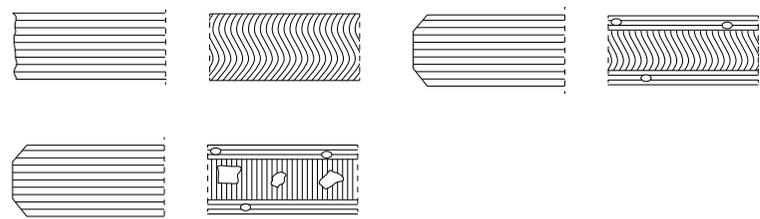


Рис.2.2.8.1.
Обработка кромок листового стекла (DIN 1249-11)

Рис.2.2.8.2.

Многослойное строительное стекло (триплекс).

1 — пластины стекла; 2 — промежуточный склеивающий слой

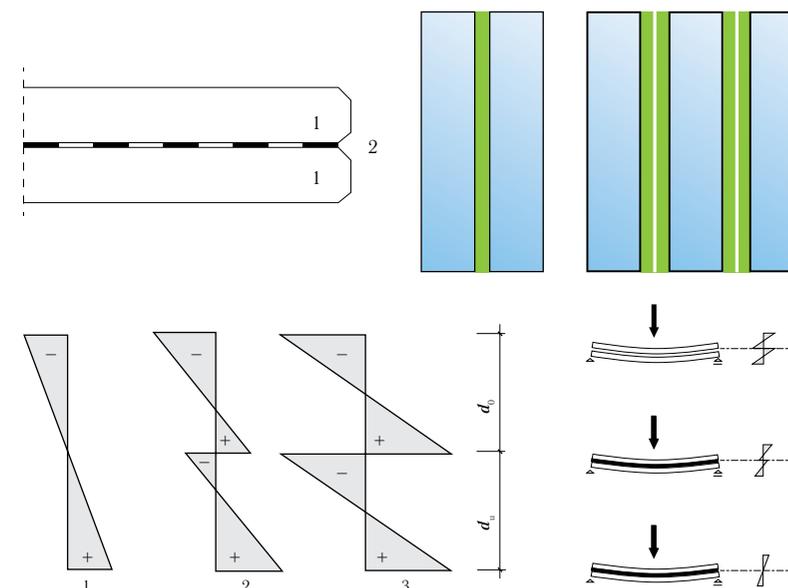


Рис.2.2.8.3.

Эпюры распределения напряжений в промежуточном слое многослойного стекла.

1 — жёсткий промежуточный слой; 2 — полужёсткий (гибкий) промежуточный слой; 3 — мягкий (скользящий) промежуточный слой

В качестве основного фактора для оценки безопасности стеклянных конструкций европейскими инженерами используется термин «остаточная несущая способность» (residual load bearing capacity), характеризующий работу стеклянной пластины после разрушения. Применительно к многослойному стеклу этот термин в основном относится к материалу склеивающего слоя.

Согласно классификации европейского стандарта DIN EN 12600, при проектировании конструкций из многослойного стекла необходимо рассматривать три разные схемы, определяемые подвижностью промежуточного слоя (рис.2.2.8.3)^{[41], [36]}. При этом необходимо отметить, что при проведении прочностных расчетов светопрозрачных конструкций, работа каждой стеклянной пластины триплекса рассматривается отдельно. Совместная работа стёкол, обеспечиваемая тем или иным типом промежуточного слоя не учитывается (см. раздел 4.7).

В настоящее время наиболее распространённым решением являются триплексы с промежуточным слоем из поливинилбутеральной плёнки (PVB). Однако этот метод имеет существенные недостатки с точки зрения использования в ответственных сооружениях.

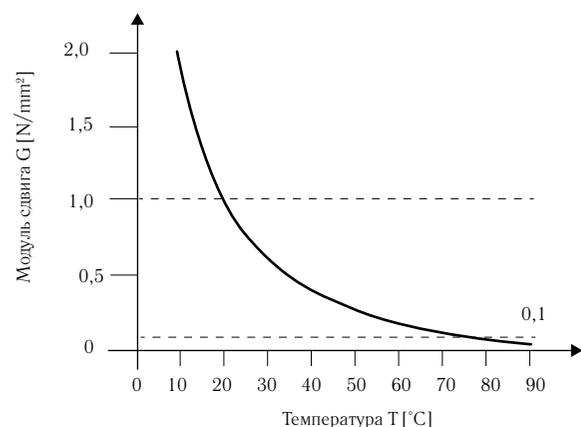


Рис.2.2.8.4. Характер изменения модуля сдвига промежуточного слоя в зависимости от температуры [36]

Поскольку PVB является эластичным термопластом, его модуль сдвига в значительной степени зависит от температуры окружающей среды и продолжительности действия нагрузки (рис. 2.2.8.4). Таким образом, полностью жёсткая связь между слоями может быть принята только при расчёте на действие кратковременных нагрузок — ветра или удара. При расчёте на действие долговременных нагрузок триплексы с использованием PVB необходимо рассчитывать по полужёсткой схеме, которая, помимо всего прочего, имеет достаточно ограниченный интервал рабочих температур. Иными словами, полужёсткая схема будет справедливой в температурном интервале ниже + 23 °С. При более высоких температурах PVB постепенно переходит в зону подвижного слоя, а при температуре свыше + 80 °С происходит полное отделение плёнки от стекла (деламинация).

В настоящее время в Европе разработаны специальные плёнки для изготовления конструкций из многослойного стекла, предназначенных для эксплуатации под действием высоких температур (фасады и кровли, подвергающиеся солнечному перегреву). К решениям такого типа относятся склеивающие плёнки EVA и SIP из материалов, имеющих сходные свойства с PVB, а также плёнки типа SPG.

Плёнки EVA и SIP имеют вдвое меньшую жёсткость по сравнению с PVB при комнатной температуре, однако при температурах свыше + 60 °С она в сравнении значительно выше. Промежуточный слой SPG специально разработан для применения в остекле-

нии зданий, возводимых в ураганно-опасных районах. Его жёсткость превышает PVB на несколько порядков — приблизительно в 100 раз. Длительно действующие температуры вплоть до + 70 °С не оказывают какого-либо заметного влияния на его прочностные свойства. Таким образом, триплекс с таким промежуточным слоем может рассчитываться по жёсткой схеме даже на действие длительных нагрузок. Одним из существенных недостатков SPG является очень высокий коэффициент температурного расширения, который в несколько раз превышает аналогичную величину для стекла.

Остаточная несущая способность триплексов на основе PVB может быть увеличена за счёт использования плёнки большей толщины. Использование SPG значительно снижает деформации после разрушения. Исследования, проведённые в Институте лёгких конструкций и концептуального проектирования Штудгардского Университета показали, что остаточная несущая способность триплексов может быть значительно повышена при введении в промежуточные слои тканей или волокон.

2.2.9. Технологические возможности стекла для архитектуры и микроклимата

Наряду с относительно ограниченным набором технологических возможностей, доступных на современном этапе в части повышения безопасности и эксплуатационной надёжности конструкций из стекла, современные способы его производства и обработки, позволяют решать широкий спектр архитектурно-композиционных и функциональных задач, связанных с общей эстетикой «стеклянного» сооружения и условиями формируемого в нём микроклимата.

Закономерности передачи различных видов излучения через стеклянные пластины и стеклопакеты, а также соответствующие характеристики, используемые в инженерных расчётах, подробно изложены в главе 4. В связи с этим материал настоящего раздела носит в большей степени обзорный характер, в основном сконцентрированный на технологических аспектах, соответственно обеспечивающих реализацию определённой группы задач.

Широкий ассортимент современных типов так называемого «архитектурного стекла», предлагаемых ведущими мировыми производителями, можно условно разделить на несколько общих категорий, классифицируемых по функциональному признаку. А именно:

1. Тонированные (окрашенные в массе) стекла;
2. Стекла с отражающим покрытием;
3. Матированные стекла;
4. Непрозрачные стеклянные панели;
5. Стёкла с декоративными элементами.

Окрашенные в массе стекла производят путем добавления оксидов металлов в стекло в момент, когда оно находится в расплавленном состоянии на флоат-линии. В зависимости от вида применяемого красителя стекло приобретает различный цвет (табл. 2.2.9.1). В светопрозрачных фасадах и кровлях окрашенное в массе стекло, как правило, устанавливается с внешней стороны стеклопакета. За счёт добавления оксидов металлов в стекломассу, происходит поглощение теплового излучения Солнца стеклянной пластиной (см. раздел 4.1). В этой связи окрашенные в массе стёкла в специальной литературе обычно классифицируются как «телопоглощающие стёкла». Необходимо также отметить, что наряду с поглощением тепловой энергии Солнца, применение окрашенных в массе стёкол неизбежно связано со снижением уровня естественности по отношению к прозрачному стеклу. Соответствующие характеристики окрашенных в массе стёкол приведены в табл. 2.2.9.2.

Табл. 2.2.9.1а

Вид применяемого красителя для наиболее распространенных стёкол, окрашенных в массе



Краситель	Цвет стекла
Оксид хрома	Зеленый
Оксид кобальта	Синий
Оксиды меди	Красный, голубой
Оксиды железа	Коричневый, сине-зеленый
Селен	Розовый
Оксид урана	Желтый
Оксид никеля	Серый, фиолетовый

Табл. 2.2.9.1б

Цветовая гамма окрашенных в массе стекол
AGC PLANIBEL COLOURED

Марка стекла	Цвет стекла
Planibel Green	зеленый
Planibel Bronze	бронзовый
Planibel Grey	серый
Planibel Azur	лазурный (светло-голубой)
Planibel Priva Blue	интенсивный синий
Planibel Dark Blue	темно-голубой
Planibel Dark Grey	темно-серый



Светопрозрачная кровля Гданьского Технологического Университета, Польша. Арх. В. Чабанский

Рис. 2.2.9.1.
Светопрозрачная кровля атриумного здания, выполненная из окрашенного в массу стекла AGC Planibel Coloured Azur. Вид изнутри здания

Табл.2.2.9.2

Технические характеристики* стекла AGC PLANIBEL COLOURED, окрашенных в массу

Цвет стекла	Световые характеристики (видимый диапазон спектра)		Энергетические характеристики (диапазон коротковолнового ИК излучения Солнца)			
	$\tau_v (\tau_1)$ %	ρ_v %	τ_e %	ρ_e %	α_e %	q %
6 мм AGC PLANIBEL COLOURED при одинарном остеклении						
Green (Зеленое)	73	7	44	5	51	57
Bronze (Бронзовое)	51	6	50	5	45	62
Grey (Серое)	44	5	46	5	49	59
Azur (Лазурное)	73	7	49	6	45	61
Dark Blue (Темно-синий)	57	6	44	5	51	57
Priva Blue (Насыщенный синий)	35	5	20	5	75	40

* Терминология и описание характеристик — см. раздел 4.1

Стёкла с отражающим покрытием получают путем нанесения на поверхность бесцветного или окрашенного в массу стекла тонкого прозрачного слоя из оксидов металлов. В зависимости от функционального назначения проектируемого остекления, в нем могут быть применены два основных типа покрытия, принципиально различающиеся по технологии нанесения (рис. 2.2.9.2).

«Твердое покрытие» — (“Hard coating” — англ.) на основе оксида олова SnO_2 ; F, называемое в ряде источников «пиролитическим покрытием» или «полупроводниковым покрытием», наносится непосредственно на одной из стадий производства стекла (так называемая технология “on-line” — англ. «на линии») за счет химической реакции пиролиза (разложения вещества под действием высоких температур). Во время этой реакции слой оксида олова оседает на поверхность горячего стекла, становясь неотделимой его частью (рис.2.2.9.2а). При этом образуется крепкое и прочное металлическое покрытие, обладающее химической, механической и термической стойкостью, равноценной стеклу без покрытия. Твердые покрытия устойчивы к воздействию погодных условий и выдерживают воздействия температур до 620 °С. Следовательно, стёкла с пиролитическими покрытиями могут использоваться в одинарном остеклении, а также в качестве наружного стекла стеклопакета с покрытием, обращённым на улицу. Стёкла с таким покрытием, как правило, обозначаются в специальной литературе термином «**k — стекло**». Их можно подвергать термической и механической обработке — термоупрочнению (закалке), моллированию (изгибу), а также наносить на них эмаль и трафаретную печать.

«Мягкое покрытие» (“Soft coating” — англ.) на основе металла или оксида металла (серебра — Ag), обозначаемое в литературных источниках как «**i — стекло**», наносится на готовое, бесцветное или окрашенное в массу стекло (технология “off-line” — англ. «вне линии») в вакууме на магнетроне и удерживается на нём силами молекулярного взаимодействия (рис. 2.2.9б). Чтобы получить высокоэффективные многослойные покрытия, используют несколько последовательных камер нанесения покрытия. Количество и состав тонких слоев зависит от требуемых характеристик

остекления — излучательной способности (ϵ), светопропускания и др. (см. раздел 4.1). В отличие от «твёрдых» покрытий, «мягкие» ограниченно устойчивы по отношению к погодным и температурным воздействиям, поэтому они не могут устанавливаться в стеклопакете снаружи. В отличие от k -стекла «мягкое покрытие» должно быть всегда обращено в сторону воздушной прослойки стеклопакета и имеет наибольшую антикоррозионную устойчивость в аргоновой среде. Таким образом, заполнение внутренней полости стеклопакета с i -стеклом аргоном не только улучшает его теплозащитные характеристики, но и обеспечивает долговечность магнетронного покрытия, сопоставимую с «твёрдым».

Химический состав, толщина и структура покрытия (последовательность нанесения слоёв) подбирается применительно к решаемой функциональной задаче для отражения излучения в определённом спектральном диапазоне (см. раздел 4.1). В специализированной литературе стёкла с покрытием, предназначенным для отражения коротковолнового ИК солнечного излучения классифицируются соответственно как «солнцеотражающие», для отражения

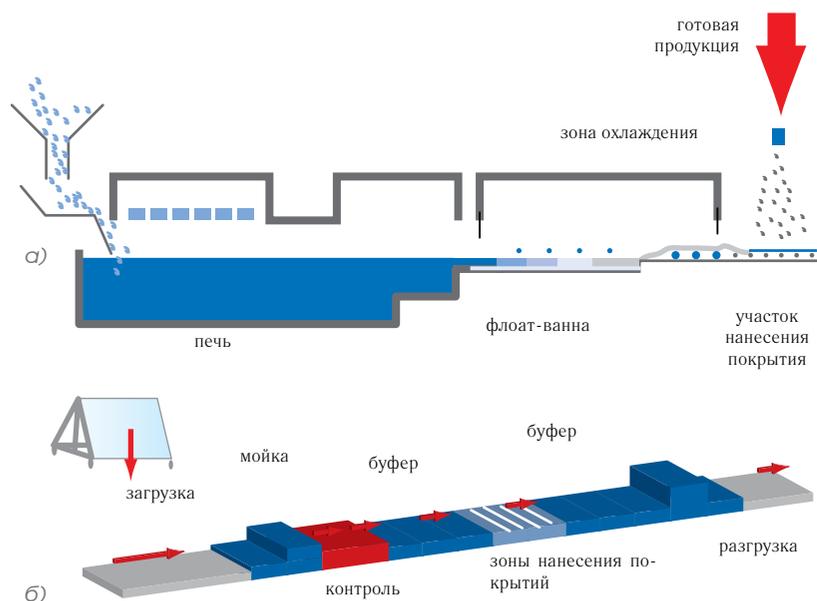


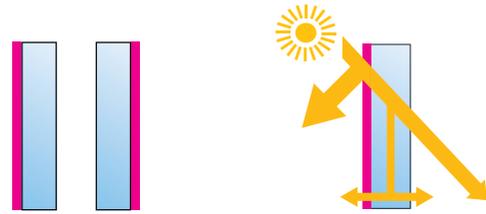
Рис. 2.2.9.2. Технологии нанесения покрытий на стёклах.
а) пиролитический процесс («твёрдое покрытие» — « k — стекло»);
б) магнетронный процесс («мягкое покрытие» — « i — стекло»)

теплого длинноволнового ИК излучения из помещения — как «теплоотражающие», «низкоэмиссионные» (LOW-E). «энергоэффективные». Определённую промежуточную позицию занимает так называемое «многофункциональное стекло», имеющее покрытия обоих типов, нанесённое на разных поверхностях пластины. Соответствующие технические характеристики для стёкол с различными покрытиями приведены в табл. 2.2.9.4.

Общее цветовое восприятие фасада при применении стёкол с «твёрдыми» солнцезащитными покрытиями будет зависеть от базового оттенка стекла (прозрачное или окрашенное в массу), цвета металлического покрытия и расположения поверхности, на которой оно нанесено (табл. 2.2.9.3). В том случае, когда отражающее покрытие (k -стекло) обращено наружу, фасад приобретает более зеркальный и однородный вид, в нём чётко отражается окружающий ландшафт (рис. 2.2.9.3). Если покрытие обращено внутрь здания, снижается зеркальный эффект фасада, более заметным становится цвет базового стекла. Примечательно, что во втором случае в вечернее время суток наблюдатель, находящийся внутри здания, при включенном искусственном освещении перестаёт видеть происходящее снаружи.

Табл.2.2.9.3

Цветовая гамма стекол с отражающими солнцезащитными покрытиями AGC STOPSOL CLASSIC и STOPSOL SUPERSILVER



Марка стекла	Положение покрытия	Цвет
Stopsol Classic Clear	Наружу	желтовато-серебристый
	Внутри	металлик
Stopsol Classic Bronze	Наружу	янтарно-серебристый
	Внутри	бронзовый металлик
Stopsol Classic Green	Наружу	серебристый
	Внутри	зеленый металлик
Stopsol Classic Grey	Наружу	серебристый
	Внутри	серый металлик
Stopsol Supersilver Clear	Наружу	ярко-серебристый
	Внутри	голубовато-серебристый
Stopsol Supersilver Green	Наружу	серебристо-стальной
	Внутри	блестяще-зеленый
Stopsol Supersilver Grey	Наружу	серебристо-стальной
	Внутри	стальной
Stopsol Supersilver Dark Blue	Наружу	серебристо-синий
	Внутри	блестяще-синий
Stopsol Supersilver Priva Blue	Наружу	серебристо-синий
	Внутри	Интенсивно-синий

Рис. 2.2.9.3.

Здание со светопрозрачным фасадом, выполненным из стекла с солнцезащитным покрытием AGC Stopsol Silverlight PrivaBlue



Спортивный комплекс Тасмайдан, г. Белград, Сербия. Арх. бюро Partner Inzenjering

Табл. 2.2.9.4

Технические характеристики солнцезащитных стекол
AGC PLANIBEL STOPSOL

Марка стекла	Положение покрытия	Световые характеристики			Энергетические характеристики			
		$\tau_v(\tau_1), \%$	$\rho_v, \%$	Отражение света внутреннее, %	$\tau_e, \%$	$\rho_e, \%$	$\alpha_{e,1}, \%$	$q, \%$
6 мм PLANIBEL STOPSOL при одинарном остеклении								
Stopsol Classic Clear	Наружу	38	34	27	46	29	25	53
	Внутри	38	27	34	46	21	33	55
Stopsol Classic Bronze	Наружу	22	34	12	29	28	43	40
	Внутри	22	12	34	29	11	60	45
Stopsol Classic Green	Наружу	31	34	20	22	28	50	35
	Внутри	31	20	34	22	11	67	39
Stopsol Classic Grey	Наружу	19	34	10	27	28	45	38
	Внутри	19	10	34	27	10	63	43
Stopsol Supersilver Clear	Наружу	63	35	34	64	27	9	66
	Внутри	63	34	35	64	24	12	67
Stopsol Supersilver Green	Наружу	52	34	25	33	26	41	43
	Внутри	52	25	34	33	14	53	47
Stopsol Supersilver Grey	Наружу	31	34	12	37	26	37	46
	Внутри	31	12	34	37	10	53	50
Stopsol Supersilver Dark Blue	Наружу	41	34	17	30	26	44	41
	Внутри	41	17	34	30	12	58	45
Stopsol Supersilver Priva Blue	Наружу	27	24	8	16	20	64	32
	Внутри	27	8	24	16	7	77	36

* Терминология и описание характеристик — см. раздел 4.1

Матированные стёкла используют для уменьшения яркости и смягчения света, а также в тех случаях, когда требуются защита помещений от посторонних глаз. Одной из наиболее совершенных технологий по изготовлению матированного стекла является кислотное травление, в ходе которого на одну из поверхностей готового флоат-стекла наносится кислотный реагент. За счёт него стекло становится полупрозрачным и приобретает однородную мелкозернистую поверхность. В полностью остеклённых фасадах стёкла такого типа часто используются в местах, где требуется создать контрастный вид с основным остеклением — например при облицовке межэтажных перекрытий.

Непрозрачные фасадные панели из стекла применяют для облицовки непрозрачных участков фасадов. Их совместное использование с прозрачными стёклами позволяет создавать фасады типа «стеклянная стена» (рис. 2.2.9.4).

Рис. 2.2.9.4.
Применение непрозрачных стеклянных элементов в композиции фасада.
(AGC Matelux Stopsol Supersilver Dark Blue)



Торговый центр Krug Portegies Alkmaar, Нидерланды.
Арх. бюро Bleichrodt Architectuur

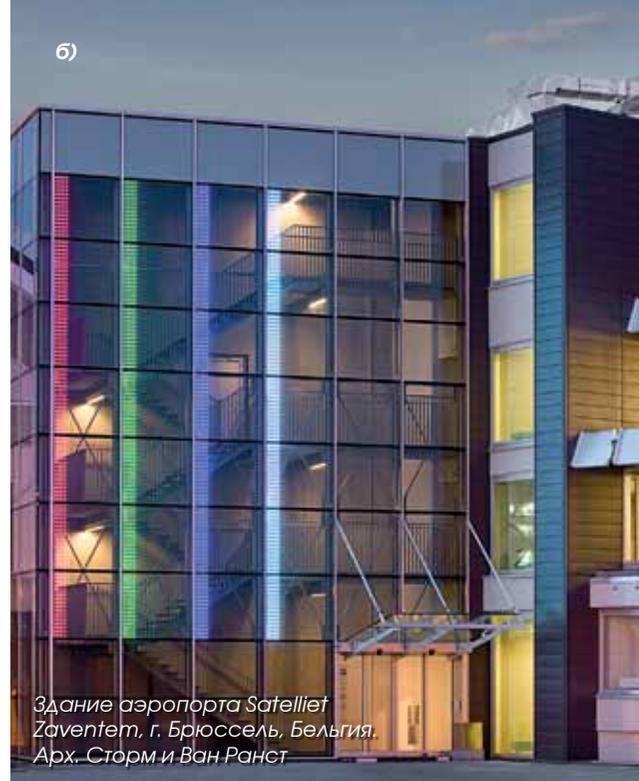
Декоративные многослойные стекла представляют собой конструкцию, состоящую из одного или нескольких слоев бесцветного, окрашенного или матированного стекла, соединенных между собой PVB пленками. Инновационным решением являются многослойные стекла со встроенными светодиодами (рис.2.2.9.5).

При необходимости получения выразительных архитектурных решений стекло может быть подвергнуто **молированию** — изгибу. Молирование стекол производят в нагревательных камерах или печах с ис-

Рис. 2.2.9.5.

Светопрозрачные фасады зданий с использованием декоративных стёкол.

а) Интерьер здания с применением многослойного декоративного стекла



Здание аэропорта Satelliet
Zaventem, г. Брюссель, Бельгия.
Арх. Сторм и Ван Ранст

б) Фасад здания с применением многослойного стекла со встроенными светодиодами



Средняя школа Сан-Серве, г. Льеж, Франция.
Арх. бюро Bureau Arleau

пользованием специальных форм для придания нужной конфигурации. Перед молированием стекло вырезают в соответствии с задаваемой формой.

Для строительства, как правило, требуется производить гнутые стекла маленькими и кратковременно выпускаемыми сериями. Изготовление молированных стекол является сложной операцией и предполагает наличие у производителя особых знаний и навыков. Учитывая требования, предъявляемые к промышленному производству и к качеству готового продукта, в производстве гнутых стекол для нужд строительной промышленности используется так называемая техника формования на оболочках — стекло нагревают и гнут в специальных печах. Стекло при нагревании изгибается на поверхности специально изготовленной стальной формы, принимая желаемую форму. При производстве гнутого стекла стекло охлаждают таким образом, чтобы в готовом изделии было как можно меньше напряжений. Минимальный радиус изгиба стекла определяют в соответствии с толщиной стекла (рис. 2.2.9.6). Размеры получаемого молированного стекла ограничиваются возможностями производственного оборудования, имеющегося у изготовителя, и факторов, зависящих от формы конструкции.

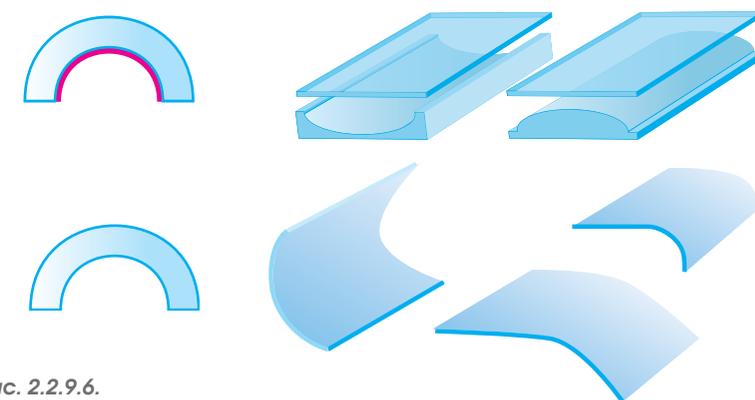


Рис. 2.2.9.6.

Молированное (изогнутое) стекло



Конструктивные решения и расчётные схемы светопрозрачных оболочек современных зданий и сооружений. Светопрозрачные фасады и кровли

- 3.1. Элементы светопрозрачного заполнения. Стеклопакеты.
- 3.2. Фасадные и кровельные профильные системы. Принцип построения и расчётные схемы.
- 3.3. Элементы дополнительной солнцезащиты

A chapter describes the main structural components for light transparent envelopes – such as profile systems, IGUs and sun protection elements. It's a short overlook of the main theoretical principles for the envelope elements construction and also some basic items, used in modern engineering practice for their structural calculation

Введение

Исторический анализ развития архитектуры и технологий в области светопрозрачных конструкций показывает, что современное строительство зданий и сооружений со «стеклянными» наружными оболочками не является остановившимся во времени процессом. Оно отражает поступательную динамику строительной техники — постоянный поиск новых, более совершенных, конструктивных решений и архитектурных концепций. Их сегодняшний спектр настолько широк и разнообразен, что не может быть очерчен строгими рамками какого-либо систематизированного описания.

Поэтому целью настоящего раздела является скорее формулировка и описание базовых конструктивных принципов некоторого среднестатичного здания такого типа, проектируемого и возводимого с использованием наиболее общепринятых и отработанных на сегодняшний день решений. Это, по сути, позволяет подойти к оценке конструктивных достоинств и недостатков современных зданий со светопрозрачными наружными оболочками, а также выделить определённые перспективные тенденции в области их проектирования и возведения.

Светопрозрачные фасады и кровли современных зданий представляют из себя лёгкие пространственные оболочки, закрепляемые на несущих конструкциях и образуемые отдельными конструктивными ячейками из стержневых профильных элементов. Заполнение ячеек осуществляется светопрозрачными материалами или изделиями — как правило, стеклопакетами. В зависимости от архитектурно-композиционного решения, отдельные ячейки могут выполняться непрозрачными, с заполнением сэндвич-панелями из лёгких теплоизоляционных материалов с различными вариантами облицовки. Для обеспечения требуемых параметров внутреннего микроклимата в отдельные конструктивные ячейки светопрозрачной оболочки могут быть дополнительно включены проветривающие устройства — клапаны (в зарубежной технической документации — проветриватели) для осуществления приточной вентиляции, как с естественным так и с принудительным побуждением. В совре-

менных европейских зданиях, вентиляционные клапаны, используемые совместно с устройствами наружной солнцезащиты, являются выразительным элементом архитектурной композиции и обеспечивают естественное охлаждение здания за счёт вентиляции в летнее время, предотвращая таким образом перегрев помещений (см. гл. 1 и гл. 5). В качестве альтернативы приточным клапанам в зданиях малой и средней этажности используются открывающиеся окна, встраиваемые в конструктивную ячейку.

В единой конструктивной схеме здания светопрозрачные фасады, рассматриваются как навесные стены, шарнирно закрепляемые на несущих конструкциях, обычно на междуэтажных перекрытиях. С точки зрения стереотипных подходов к проектированию ограждающих навесных стен, сложившихся для традиционных зданий, разработка конструктивных решений светопрозрачных фасадных оболочек не требует проведения каких-либо ответственных прочностных расчётов. В строгом понимании строительной терминологии, навесные фасадные стены не являются самонесущими, поскольку в них не происходит передачи нагрузок от собственного веса на уровень нижележащих этажей. Они не требуют устройства фундаментов, обеспечивающих непосредственно передачу нагрузки от собственного веса наружной стены на основание; таким образом, выполняют в конструктивной схеме здания в чистом виде ограждающую функцию, отделяя его внутреннее пространство от внешней среды. Аналогично, светопрозрачная оболочка кровельного покрытия всегда укладывается по некоторой несущей пространственной конструкции, образуемой пространственными стержневыми системами, стропильными балками, фермами и др.

Тем не менее, в отличие от каркасных зданий с массивными навесными стенами, возводившихся в нашей стране до 90-х годов, проектирование лёгких навесных ограждений со светопрозрачным заполнением требует рассмотрения не только закономерностей строительной физики, не связанных с силовыми воздействиями на конструкции, но и учёта факторов, вызываемых специфическими нагрузками и напряжениями, не характерными для традиционных зданий. Как будет подробно показано в главе 4, этот аспект в значительной степени

определяется нарушением целостности оболочки при эксплуатации, вследствие возможного разрушения стекла, а также избыточных прогибов стержневых профильных элементов под действием температурных напряжений и ветра.

В сложившейся европейской практике, светопрозрачная оболочка при проведении инженерных расчётов, рассматривается в качестве единой пространственно-сетчатой структуры с выделением образующих стержневых элементов (профильной системы), часто обозначаемых на практике как «стеклонесущая система» и непосредственно элементов заполнения — стеклопакетов (или отдельных стёкол), рассматриваемых в качестве некоторых пространственных пластинчатых элементов (пластин в случае заполнения ячеек одинарным листовым стеклом или триплексом) с опиранием по контуру, по двух сторонам, в нескольких точках (спайдерные системы) или, в редких случаях (козырьки, парапеты, ограждения балюстрад и балконов), защемлённых по консольной схеме.

Несмотря на то, что восприятие нагрузок, действующих на светопрозрачную оболочку, и подробно рассмотренных в главе 4, осуществляется за счёт совместной пространственной работы образующих стержневых элементов и стеклопакетов, обеспечивающих жёсткость оболочки в пределах отдельной конструктивной ячейки, в существующих европейских методиках инженерных расчётов, эта совместная работа не учитывается. Каждый из образующих элементов рассматривается отдельно с большими коэффициентами запаса.

Недостаток систематизированной теории определяет достаточно сильный акцент на дорогостоящие натурные испытания и лабораторные методы подтверждения соответствия конструкций декларируемым характеристикам. Таким образом, европейская практика проектирования предполагает обеспеченность лабораторно-испытательной базой, достаточной для контроля основной группы требований к светопрозрачным фасадам, которая кратко может быть сформулирована следующим образом.

1. Устойчивость к ветровой нагрузке, исходя из следующих условий:
 - а) недопустимость избыточных прогибов и разрушения стеклянных пластин;

- б) недопустимость избыточных прогибов стержневых профильных элементов;
 - в) недопустимость разрушения крепёжных элементов, посредством которых осуществляется закрепление навесной фасадной оболочки на несущих конструкциях здания
 2. Устойчивость образующих стержневых элементов под действием нагрузки от собственного веса стеклопакетов.
 3. Устойчивость к воздействию температурных нагрузок, исходя из условий:
 - а) недопустимость избыточных температурных деформаций стержневых профильных элементов по длине и в узлах сопряжения друг с другом;
 - б) недопустимость неравномерного или резкого нагрева-охлаждения стеклянных пластин, вызывающего их мгновенное разрушение («термошок»).
 4. Устойчивость к воздействию ударных нагрузок:
 - б) внутренних — при случайном падении человека или предметов интерьера на стекло
 - а) внешних — при ударе стекла обломками строительного мусора, летящими с большой скоростью в условиях урагана.
 5. Воздухо- и водонепроницаемость соответственно при действии статического давления ветра и косоугольного дождя.
 6. Тепловая защита (по условиям эксплуатации в летнее и зимнее время).
 7. Звукоизоляция (по условиям необходимого уровня защиты от воздействия внешнего шума)
 9. Огнестойкость по условию недопустимости распространения огня и прогрессирующего обрушения фасадной оболочки при пожаре до истечения расчётного времени эвакуации людей из здания и с прилегающей к зданию территории.
 10. В сейсмически опасных районах — сейсмостойкость.
 11. Специальные требования — молниезащита, врыво- и пуленепробиваемость, защита от внешнего и внутреннего взлома и др.
- Анализ указанных факторов с точки зрения построения расчётных схем и описания действующих нагрузок является предметом рассмотрения в настоящей и последующей главах. Наряду с соблюдением

этих требований, немаловажную роль при выборе конструктивной схемы светопрозрачной оболочки будут играть такие факторы как технологичность при изготовлении и монтаже, удобство периодического обслуживания при эксплуатации, долговечность и ремонтпригодность.

Несмотря на высокий уровень технологий, достигнутый на сегодняшний день в этой области, каждый отдельный светопрозрачный фасад или кровля является объектом индивидуального проектирования. Это определяет принципиальное отличие в постановке задачи и формировании технического задания на проектирование от массового заполнения светопроёмов традиционных зданий.

3.1. Элементы светопрозрачного заполнения. Стеклопакеты

В подавляющем большинстве современных зданий со светопрозрачными оболочками в качестве элементов светопрозрачного заполнения используются герметичные стеклопакеты с различными стёклами, имеющие двойной контур герметизации.

С точки зрения развития техники примечательно, что стеклопакет, как продукт массового серийного производства, первоначально был применён в транспортной индустрии, и лишь несколько десятилетий спустя, превратился в неотъемлемый конструктивный элемент зданий и сооружений. Впервые патент на стеклопакет был зарегистрирован американским инженером Т. Стетсоном в 1865 году; однако их промышленное производство началось только в 1934 г. в Германии со стеклопакетов, примененных для остекления железнодорожных вагонов.

Начиная от конструкции первых стеклопакетов, мы можем проследить техническое совершенствование идеи создания высоко технологичного остекления с необслуживаемым межстекольным пространством (отсутствие запыления и загрязнения, характерного для раздельного листового остекления), обладающего необходимыми теплозащитными свойствами.

В этом контексте интересно отметить, что в самом первом стеклопакете, аналогично стеклопакетам последующих поколений, за

основу был принят принцип герметичной камеры, ограниченной двумя стёклами с заполнением межстекольного пространства осушенным воздухом (рис.3.1.1). Сборка и герметизация первых стеклопакетов, впоследствии получивших название **«заваренные»**, осуществлялась путём нагрева и сварки стёкол по периметру таким образом, чтобы они отстояли на определенное расстояние друг от друга. Заполнение осушенным воздухом осуществлялось сквозь специальные отверстия, которые затем также герметизировались.

Технология производства таких стеклопакетов было достаточно сложной и дорогостоящей. Они отличались низкой надежностью герметизации и высокой концентрацией механических напряжений по контуру сопряжения пластин стекла. Соответственно такие стеклопакеты достаточно быстро разрушались на стадии эксплуатации, их срок службы был относительно коротким.

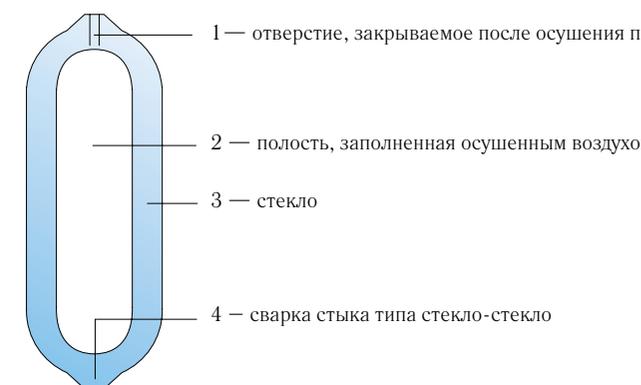


Рис. 3.1.1.
Конструкция
«заваренного»
стеклопакета

Следующим технологическим шагом стало появление в 1938 г. в США под маркой Thermopane, так называемых **«паянных»** стеклопакетов, состоявших из стёкол и свинцовой распорной рамки, спаянных между собой (рис.3.1.2). По сравнению со своими предшественниками, производство таких стеклопакетов было значительно упрощено. Устанавливаемая по периметру свинцовая рамка задавала необходимую дистанцию между стёклами и легко припаялась к ним.

Однако, по истечении определённого периода эксплуатации, выявились серьезные недостатки такой конструкции. За счёт большой разницы коэффициентов линейного температурного расширения свинца ($\alpha = 28 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$) и стекла ($\alpha = 9 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$), при сезонных температурных перепадах стеклянные пластины и свинцовая рамка отделялись друг от друга — происходила разгерметизация, и стеклопакет выходил из строя. При отрицательных температурах наружного воздуха, зона по периметру стеклопакета внутри помещения, за счёт высокой теплопроводности свинцовой рамки, покрывалась конденсатом или инеем.

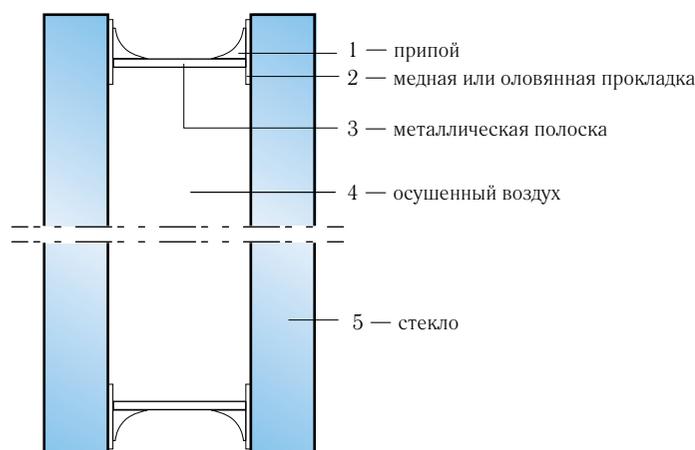


Рис. 3.1.2.
Конструкция «паяного» стеклопакета

В 1950 г. впервые были изготовлены «клеёные» стеклопакеты с эластичным уплотнением (рис. 3.1.3). В качестве дистанционной рамки, соединённой со стёклами при помощи полисульфидного герметика Thiokol, была использована алюминиевая пустотелая рейка, заполненная осушительным реагентом. За счёт этого был исключен технологический процесс заполнения камеры осушенным воздухом — стеклопакет герметизировался в помещении с нормальной влажностью, после чего внутренний воздух самостоятельно осушался адсорбентом, находящимся в полости рейки, через специальные отверстия.

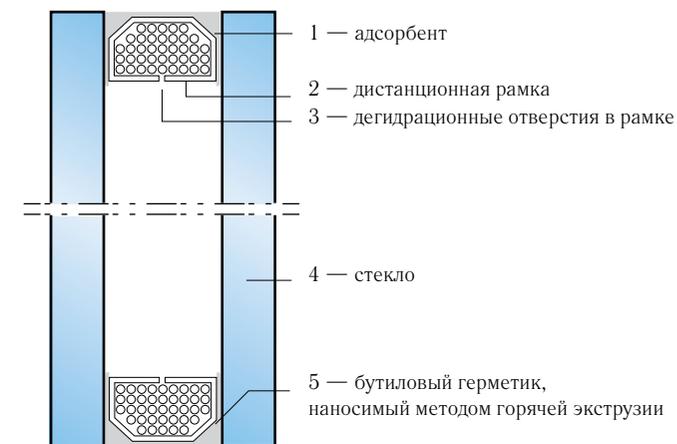


Рис. 3.1.3.
Конструкция стеклопакета с одинарным эластичным контуром герметизации

Общепризнанной датой рождения современного стеклопакета с двойным контуром герметизации (рис. 3.1.5) считаются 1970-е годы XX столетия, когда энергетический кризис поставил европейцев перед необходимостью резкого снижения энергозатрат на отопление зданий. Очевидно, что это могло быть сделано, в первую очередь за счёт совершенствования светопрозрачных конструкций, повышения их теплозащитных качеств и показателей эксплуатационной надёжности. На сегодняшний день доля стеклопакетов с двойным контуром герметизации составляет около 90% всего мирового производства стеклопакетов.

В стеклопакете такого типа используется металлическая (чаще всего — алюминиевая) полая рамка-спейсер (от англ. — spacer), заполненная адсорбентом — молекулярным ситом. **Герметизация первого уровня** находится между дистанционной рамкой и стеклом и выполняет основную функцию изолирования внутреннего межстекольного пространства. Очевидно, что при использовании металлических дистанционных рамок, на протяжении всего периода эксплуатации стеклопакета, температурные деформации стёкол и рамки различны. Это, в свою очередь, вызывает напряжения в краевой зоне стеклопакета, которые компенсируются в первом слое герметизации. Таким образом, герметик первого уровня должен обладать необходимыми свойствами пластичности из условия

не нарушения герметичности сопряжения стекла и металлического спейсера по всему контуру. Согласно требованиям промышленных стандартов, герметик не должен попадать внутрь камеры стеклопакета, в том числе в местах угловых соединений.

В качестве герметиков первого слоя обычно применяют полиизобутиленовые герметики (бутилы), существенным недостатком которых является низкая устойчивость к воздействию УФ излучения, что определяет необходимость защиты краевой зоны стеклопакета от действия прямой солнечной радиации (рис. 3.1.4).

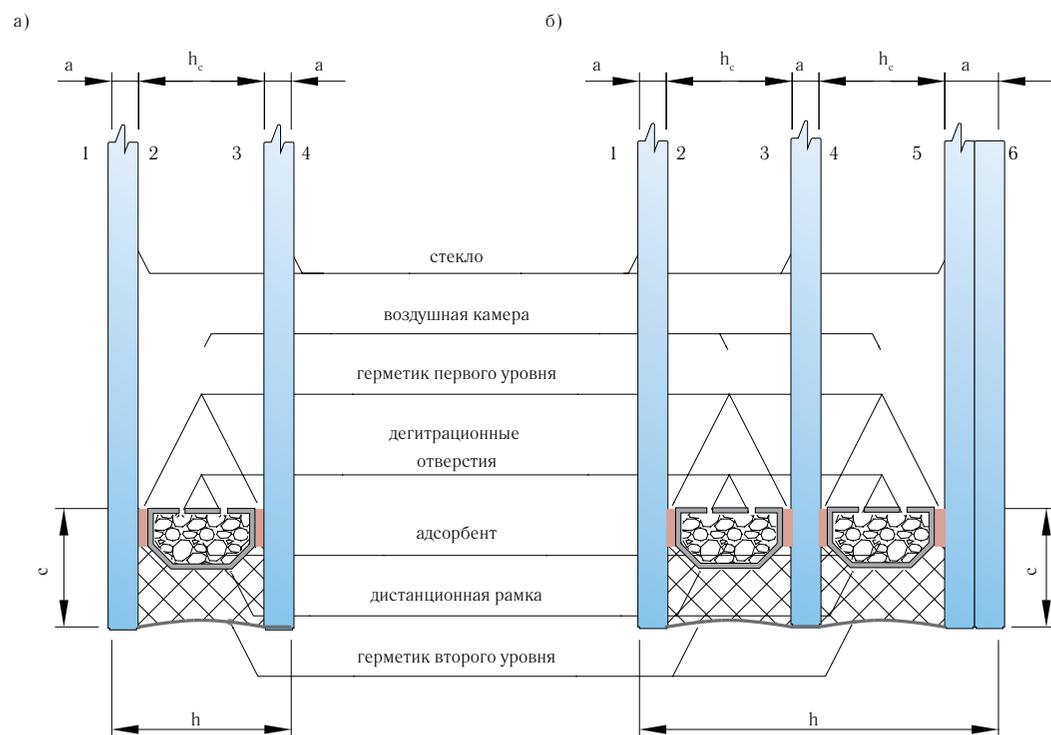


Рис.3.1.4.
Разрушение
бутилового
герметика под
действием УФ в
первом контуре
герметизации
при нарушении
технологии нане-
сения (попада-
ние во внутрен-
нюю камеру
стеклопакета)

Основное назначение **второго герметизирующего слоя**, в котором, как правило, применяют полисульфидные (тиоколовые), полиуретановые или силиконовые герметики заключается в удержании геометрии стеклопакета. Второй уровень герметизации, таким образом, обеспечивает соединение стёкол в единую пространственно жёсткую конструкцию, а его прочностные свойства определяют показатели геометрической неизменяемости пакета. Для компенсации циклических растягивающих напряжений в краевой зоне, вызываемых климатическими нагрузками (см. главу 4), герметик второго уровня, должен одновременно обладать высоким модулем упругости и пластичностью для восприятия растягивающих усилий.

В современных зарубежных источниках стеклопакет обозначается термином «insulating glass unit» или «IGU» (англ.) — изолированное стеклянное изделие. Согласно определению европейского стандарта EN 1279, «стеклопакет представляет собой изделие, состоящее минимум из двух листов стекла, разделенных одной или более дистанционной рамкой, герметично скреплённых по периметру, механически устойчивое и прочное». Применительно к вопросам эксплуатации, стеклопакет является строительным изделием, предполагающим 100% заводскую готовность, и таким образом, неремонтопригодным на строительном объекте. Соответственно, в случае выхода из строя хотя бы одного из образующих стёкол или разгерметизации краевой зоны, изделие полностью подлежит демонтажу и замене.

Стеклопакеты классифицируются по количеству воздушных камер на однокамерные (два стекла) и двухкамерные (три стекла) (см. рис. 3.1.5). В зависимости от архитектурных и функциональных требований в стеклопакетах в самых различных комбинациях могут применяться различные стёкла (многослойные, отражающие, закалённые и др. — см. гл. 2 и гл. 4). Для повышения теплозащитных характеристик стеклопакета (см. раздел 4.1) пространство между стёклами может заполняться инертным газом (Ar; Kr или смесью газов). В технической документации и специализированной литературе, поверхности стёкол стеклопакета обычно нумеруются позициями от 1 до 4 от наружной поверхности внутрь (рис. 3.1.6).



a — толщина стекла; h — толщина стеклопакета; h_c — расстояние между стеклами; c — ширина герметизирующего слоя; цифрами 1–6 пронумерованы поверхности стекол, начиная с наружной

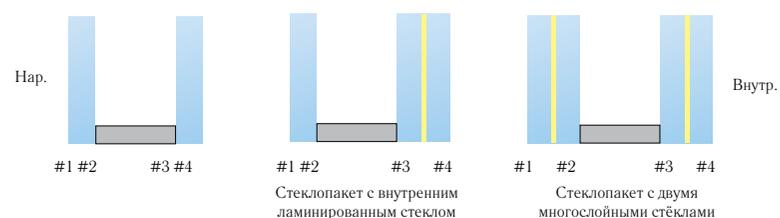


Рис. 3.1.5.

Конструкция стеклопакета с двойным контуром герметизации; **а)** однокамерный стеклопакет; **б)** двухкамерный стеклопакет; **в)** варианты конструктивных решений стеклопакетов с различными стёклами

При маркировке стеклопакетов указываются толщина и тип стёкол, ширина дистанционной рамки, количество воздушных прослоек, а также тип газа, используемого для их заполнения. Согласно ГОСТ 24866-99 «Стеклопакеты клееные строительного назначения» применяется следующая основная маркировка:

Для стекол:

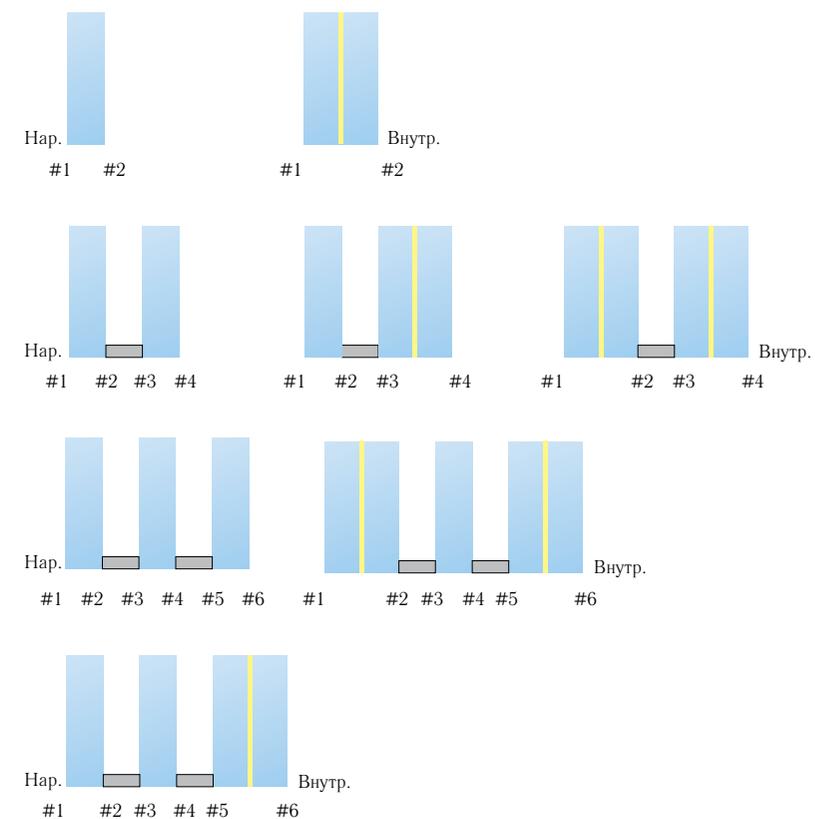


Рис.3.1.6.

Порядок нумерации поверхностей стёкол стеклопакета, начиная от наружной поверхности для стеклопакетов различной конструкции

М	Листовое стекло с марками: М0; М1; М2; М3; М4. Цифрами обозначена группа качества, где М0 — самое высокое качество
К (k)	Стекло с «твердым» покрытием (см. главу 2)
И (i)	Стекло с «мягким» низкоэмиссионным покрытием (см. главу 2)

Для газов, заполняющих межстекольное пространство:

Воз-дух	Пробел по умолчанию
Аг	Аргон
Кг	Криптон
SF6	Гексафторид серы (элегаз)

Примеры маркировки стеклопакетов:

Однокамерный стеклопакет общестроительного назначения, состоящий из двух листовых стекол толщиной 4 мм марки М1, с расстоянием между стеклами 16 мм, с низкоэмиссионным покрытием на внутреннем стекле, с заполнением аргоном. Геометрические размеры пакета: высота — 1500 мм, ширина — 800 мм, толщина 24 мм:
СПО 4М1-16Аг-И4 1500x800x24 ГОСТ 24866-99

Двухкамерный стеклопакет общестроительного назначения, состоящий из трех листовых стекол толщиной 4 мм марки М1, с расстоянием между стеклами 12 мм, с низкоэмиссионным покрытием на внутреннем стекле, с заполнением аргоном. Геометрические размеры пакета: высота — 1500 мм, ширина — 800 мм, толщина 36 мм:
СПД 4М1-12-4М1 1500x800x36 ГОСТ 24866-99

Наряду с маркировками согласно действующим нормативным документам, каждый производитель стекла имеет собственное обозначение торговых марок, как правило, указываемое перед маркировкой ГОСТ.

Торговые марки стёкол с магнетронным напылением (i-стекло), производимые предприятием — AGC: **Stopray, Stopray NEO, Stopray T, Planibel Top N+, Planibel Top N+T, Planibel Tri, Planibel Energy N, Planibel Energy NT, Stopsol Phoenix.**

Торговые марки, стёкол с пиролитическим покрытием (k-стекло), производимые AGC: **Stopsol, Sunergy, Blackpearl, Planibel G, Planibel G fasT.**

Подавляющее большинство современных стеклопакетов производятся на полностью автоматизированных технологических линиях. Так, на линии, выпускающей до несколько тысяч квадратных метров готовой продукции в смену, могут работать всего два человека — грузчик, подающий подготовленное стекло, и грузчик, выгружающий готовый стеклопакет. Существуют и полностью автоматизированные производства, осуществляемые без присутствия человека и на погрузочно-разгрузочных операциях.

На всех современных автоматизированных линиях по производству стеклопакетов может быть выделено несколько участков (этапов), соответствующих различным стадиям технологического процесса.

На **I этапе** производится резка стекла по типоразмерам. В зависимости от толщины и размера заготовки, резка производится с небольшими различиями (тип режущего инструмента и жидкости для резки). Современные столы для резки — это высокотехнологичные устройства, в которых перемещение резца управляется компьютером по программе, задаваемой оператором с клавиатуры. Некоторые столы снабжены специальной программой по оптимизации раскроя, позволяющей снизить отходы до 5% и ниже.

Перемещение стекла по поверхности стола производится на воздушной подушке, создаваемой с помощью большого числа отверстий на поверхности стола. Ломка стекла после надреза осуществляется специальными штангами, поднимающимися из поверхности стола.

При прохождении режущего инструмента по поверхности стекла, на стекле образуется небольшая бороздка с микротрещинами. При надломе вдоль этой бороздки стекло раскалывается. Для того чтобы получить ровный срез, надлом необходимо производить достаточно быстро после создания бороздки. Это связано с так называемым эффектом «самозалечивания стекла» после создания

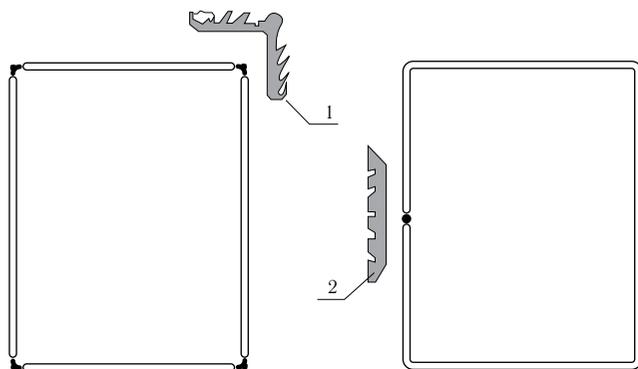


Рис. 3.1.7.

Варианты сборки дистанционных рамок

а) дистанционная рамка из прямолинейных деталей, собранная на четырёх соединительных уголках (1);

б) дистанционная рамка, собранная методом гнутья и замкнутая на одном соединителе (2)

микротрещин. Получившиеся микротрещины как бы начинают самопроизвольно склеиваться, и разлом стекла в этом случае значительно затруднён. Для того, чтобы избежать подобных явлений, применяется специальная жидкость для резки, которая обладает малой вязкостью и хорошими смачивающими свойствами. Она проникает в микротрещины и препятствует самозалечиванию стекла.

Параллельно с резкой стекла производится резка дистанционных рамок (спейсеров) по размерам данного стеклопакета и предварительная сборка с помощью уголков и соединительных вставок (рис. 3.1.7).

Одновременно со сборкой спейсер заполняется осушителем, поглощающим влагу из межстекольного пространства стеклопакета. При изготовлении стеклопакетов в качестве влагопоглотителя применяют синтетический гранулированный цеолит (молекулярное сито) или технический силикагель, которыми заполняют полости дистанционных рамок.

Размеры гранул влагопоглотителя должны быть больше, чем дегидрационные отверстия в дистанционной рамке. Размер пор во влагопоглотителе (молекулярном сите) должен иметь размер, необходимый для избирательного поглощения газов на молекулярном уровне: должно происходить поглощение только молекул воды (водяного пара), а не других газов, входящих в состав воздуха.

За счёт использования осушителя воздух, находящийся внутри стеклопакета, практически полностью обезвоживается, и таким образом устраняется возможность выпадения конденсата

между стёклами во всём диапазоне нормальных эксплуатационных температур.

В правильно изготовленном стеклопакете выпадение конденсата в межстекольном пространстве наступает при некоторой критической температуре, называемой «точкой росы» и соответствующей температуре наружного воздуха, при которой происходит выпадение конденсата в межстекольном пространстве без разгерметизации стеклопакета. Для большинства стеклопакетов эта температура составляет — 45 °С. Появление конденсата на поверхности стёкол внутри стеклопакета в процессе эксплуатации при более высоких температурах свидетельствует о грубых нарушениях, допущенных при его производстве — неполной герметизации или отсутствии осушителя.

На **II этапе** изготовления стеклопакетов производится мойка стёкол деминерализованной водой в щёточной моечной машине. Мойка стёкол, имеющих «мягкое» покрытие, должна производиться только специально предназначенными щётками, имеющими определённую жёсткость щетинок. Мойка является ответственной операцией, в значительной степени определяющей долговечность стеклопакета, хорошая герметизация которого основана на идеальной адгезии герметика к стеклу.

На **III этапе** на торцевую поверхность спейсера слоем шириной приблизительно 3–4 мм методом экструзии при температуре 120–140 °С наносится неотверждающийся эластопластичный герметик первого герметизирующего слоя. К качеству этого слоя предъявляются повышенные требования. Он должен быть равномерным, без разрывов, шириной не менее 3 мм, особенно в углах и местах соединения. Дополнительно в углах наносится герметик вдоль соединительной щели. При небольших объёмах производства, первичная герметизация стеклопакетов может осуществляться вручную. При этом герметизирующий слой наносится в виде тонкой самоклеящейся бутиловой ленты.

На **IV этапе** осуществляется первая стадия сборки стеклопакетов (предварительная сборка): соединение стёкол и спейсера с нанесённым на него герметиком первого слоя.

При применении в стеклопакете стекла с «мягким» (нестойким к внешним воздействиям) покрытием, по всему периметру этого стекла перед сборкой стеклопакета должна быть очищена от покрытия кромка, шириной 8–10 мм (обычно это делается перед резкой стекла). Это мероприятие обеспечивает необходимую адгезию бутила к стеклу, а также исключает возможную коррозию самого покрытия. Поверхность стекла, имеющая «мягкое» покрытие, должна быть обращена во внутреннее межстекольное пространство. Кромка стекла со снятым покрытием не должна попадать в поле зрения при оценке внешнего вида стеклопакета.

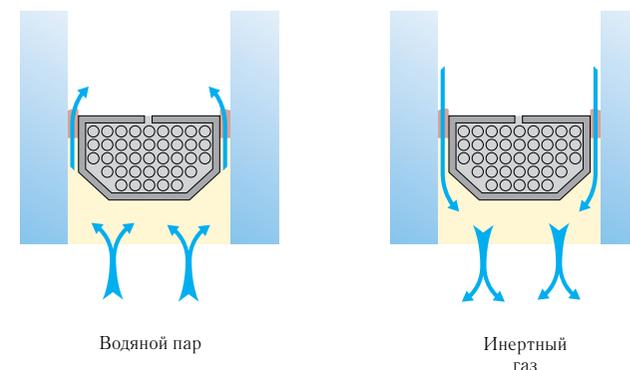
После предварительной сборки, стеклопакет поступает в пресс, который сдавливает его до фиксации. После сдавливания стеклопакет должен несколько десятков секунд выдерживаться в сжатом состоянии. Это необходимо для того, чтобы бутил мог проникнуть в поры и микротрещины стекла, таким образом, увеличив адгезию.

Для устранения возможности разрушения стеклопакета при монтаже и эксплуатации вследствие концентрации локальных напряжений в кромке стекла, возникающей после его резки, рекомендуется перед сборкой стеклопакета сошлифовать крошку на стёклах по периметру.

На **завершающей стадии** изготовления стеклопакета на автоматическом оборудовании или вручную по торцевой поверхности стеклопакета наносится отверждающийся полисульфидный (тиоколовый) или полиуретановый герметик второго герметизирующего слоя.

Заполнение промежутка между стёклами газом осуществляется через специальные отверстия в дистанционной рамке в двух противоположных углах, которые затем герметизируются. Необходимо отметить, что на протяжении всего расчётного периода эксплуатации стеклопакета происходит постепенная естественная утечка газа из внутренней камеры, а также обратный процесс диффузии водяного пара внутрь через микротрещины в герметике (рис. 3.1.8), вызванные напряжениями (по контуру примыкания стекол к дистанционной рамке) под действием перепада давлений и температур (см. раздел 4.3). Величина и скорость диффузии определяет максимальный срок службы стеклопакета.

Рис. 3.1.8.
Диффузия газа и водяного пара через герметизирующий контур стеклопакета



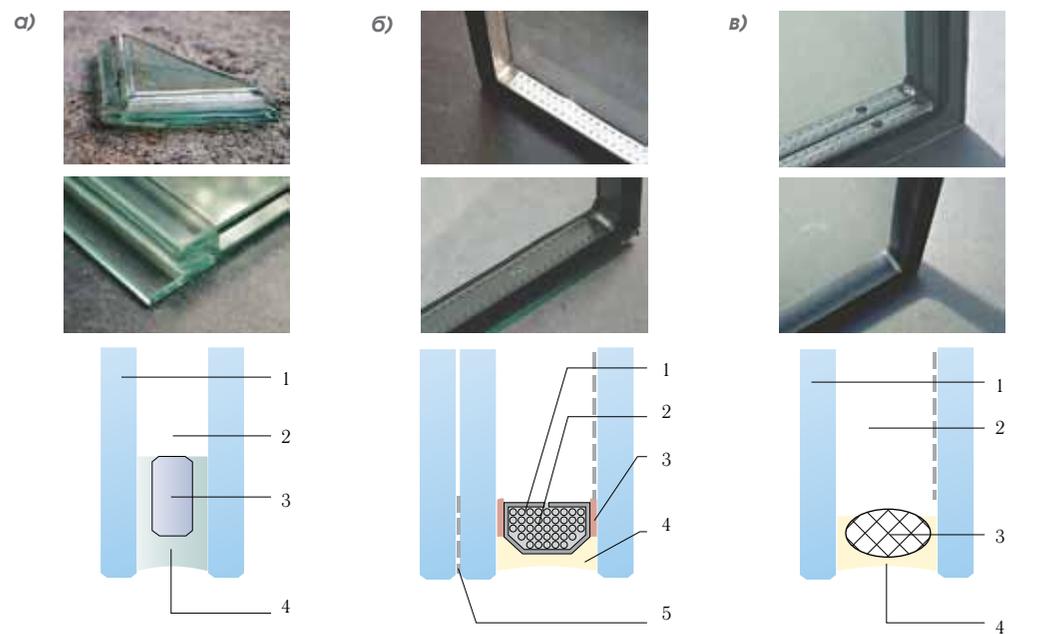
Современное производственное оборудование позволяет изготавливать стеклопакеты различных форм — прямоугольные, круглые, треугольные, трапециевидные и др. Размеры стеклопакетов по высоте и ширине, как правило, не превышают 3,2х3,0 м. Не рекомендуется изготовление стеклопакетов с размерами менее 300х300 мм, а также с соотношением сторон более 5:1, из условия ненадёжной работы под действием статических нагрузок (см. гл. 4).

Общая толщина стеклопакета h (см. рис. 3.1.5) определяется толщиной применённых стёкол и дистанционных рамок (спейсеров), и как правило, находится в пределах 16....40 мм. Существует возможность изготовления изогнутых стеклопакетов из моллированных стекол, а также стеклопакетов с внутренней декоративной рамкой.

Постоянное повышение общемировых требований к энергоэффективности светопрозрачных конструкций, привело к разработкам различных типов дистанционных рамок с повышенными теплозащитными характеристиками (рис. 3.1.9).

Согласно данным европейских нормативных документов для стеклопакетов большой площади конструкция дистанционной рамки не оказывает заметного влияния на общие теплозащитные характеристики стеклопакета (величину приведенного сопротивления теплопередаче — см. раздел 4.1.2).

Вместе с тем, очевидно, что она играет важнейшую роль для устранения возможности локального промерзания пакета по контуру, а также с точки зрения работы стеклопакета под действием силовых нагрузок, в значительной степени определяя его простран-



1 — стекло; 2 — межстекольный объём, заполненный газом; 3 — стеклянная вставка; 4 — прозрачный силикон

1 — дистанционная рамка; 2 — влагопоглотитель; 3 — первичный герметик (бутил); 4 — вторичный герметик (полисульфид/силикон); 5 — защитная тонировка (если необходимо)

1 — стекло; 2 — Межстекольный объём, заполненный воздухом или инертным газом; 3 — первичная бутиловая герметизация, совмещённая с влагопоглотителем; 4 — вторичная герметизация полисульфид

Рис. 3.1.9.

Различные типы дистанционных рамок для стеклопакетов

а) дистанционная рамка из стеклопластика;

б) дистанционная рамка из алюминия;

в) дистанционная рамка типа TPS (thermoplastic spacer)

ственную жёсткость и краевые условия при изгибе стеклянных пластин. В этом контексте, имеет смысл привести краткое описание некоторых технических решений дистанционных рамок нового типа, предлагаемых производителями на отечественном рынке.

Так называемые дистанционные рамки типа «теплый край» выполняются из пластика, армированного тонкой металлической лентой из фольги (рис. 3.1.10). Рамка заполняется осушителем (силикагелем) аналогично традиционным дистанционным рамкам. Герметизация стеклопакета производится в две стадии, аналогично традиционному решению с алюминиевой рамкой.

Дистанционная рамка типа TPS (thermoplastic spacer) выполняется из композитного материала, образуемого соединением бутила и влаго-поглотителя (рис. 3.1.11) и имеющего коэффициент теплопроводности в 1000 раз меньше алюминия. Осушитель содержится в бутиловом среднике и вводится в пространство между стеклами на автоматизированной линии в одну стадию, одновременно с герметизирующим наружным контуром.

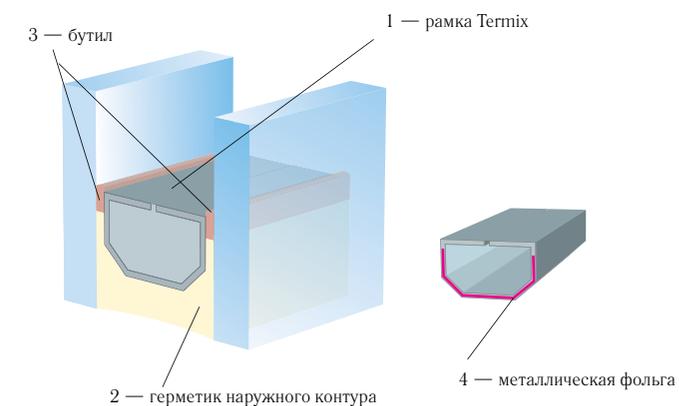


Рис. 3.1.10.

Принципиальное конструктивное решение стеклопакета с дистанционной рамкой из ПВХ, армированного фольгой

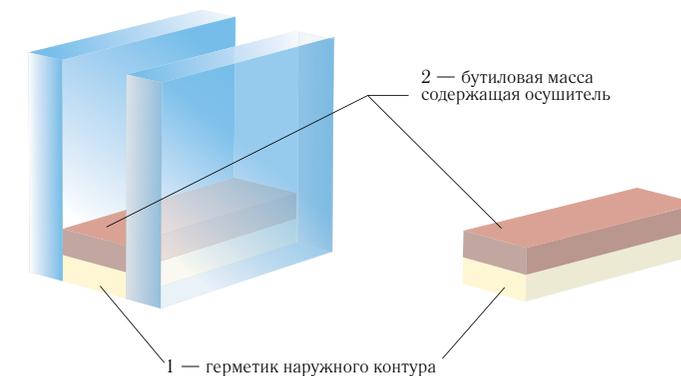


Рис. 3.1.11.

Принципиальное конструктивное решение стеклопакета с дистанционной рамкой типа TPS

Основным элементом системы герметизации стеклопакетов типа «Swiggle Strip» является эластичная лента, включающая герметик, гофрированную алюминиевую перемычку и осушитель (рис. 3.1.12). Лента «Swiggle Strip» совмещает функции дистанционной рамки, влагопоглопителя и герметика наружного шва. Для производства такого пакета необходим нагревательный пресс, осуществляющий адгезию стекла с лентой.

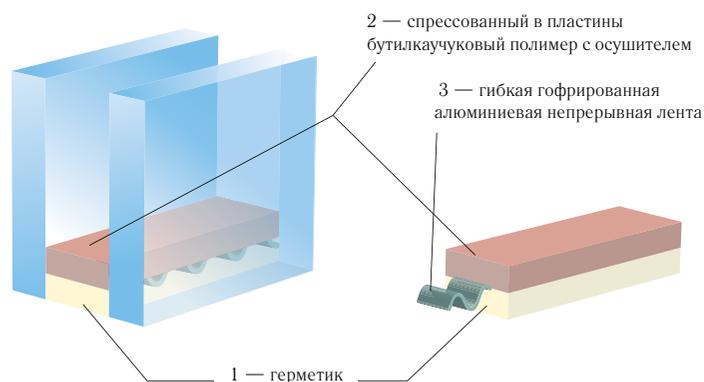


Рис. 3.1.12.
Принципиальное конструктивное решение стеклопакета с дистанционной рамкой типа Swiggle Strip

Дистанционная рамка из алюминия с термовставкой (рис. 3.1.13) содержит перемычку из пластмассы между двумя рамками из алюминия. Рамка заполняется осушителем аналогично традиционным дистанционным рамкам.

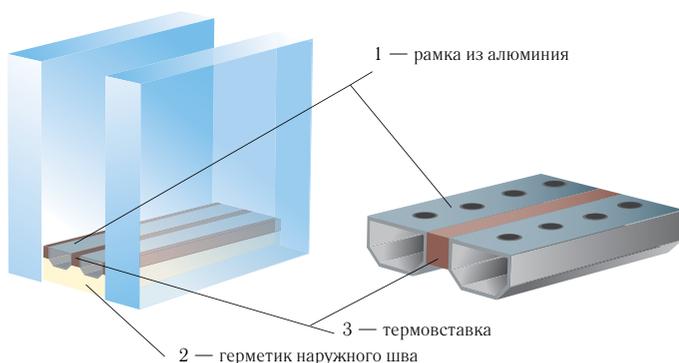
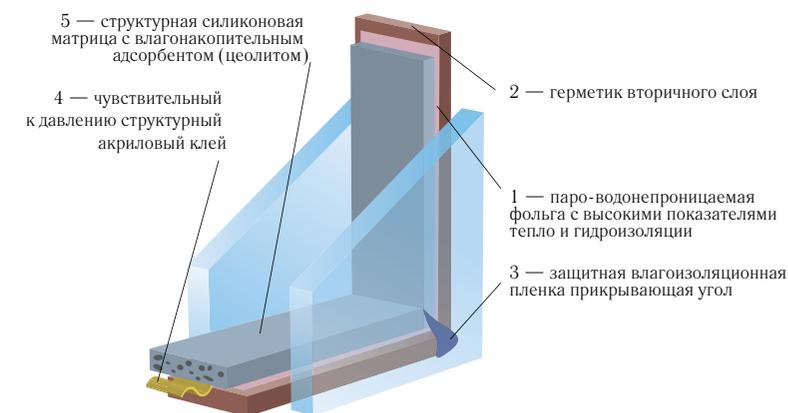


Рис. 3.1.13.
Принципиальное конструктивное решение стеклопакета с дистанционной рамкой из алюминия с термовставкой

Система герметизации стеклопакетов «Super Spacer System» (SSS) (рис. 3.1.14) основана на применении в качестве дистанционной рамки силиконового высокомолекулярного эластомера полученного посредством горячего отверждения, и заполненного осушителем. Отличительной особенностью такого типа герметизации является отсутствие каких-либо металлических и пластиковых вставок. Наряду с силиконовым герметиком, в системе Super Spacer, может быть применён герметик из эпидем-каучука.

Рис. 3.1.14.
Принципиальное конструктивное решение стеклопакета с системой герметизации Super Spacer System (SSS)



При описании элементов светопрозрачного заполнения необходимо особенно выделить стеклопакеты, предназначенные для приклеивания к элементам профильной системы в конструкциях структурного остекления. В разделах 3.2 и 4.7 будет показано, к этому типу остекления в Европе предъявляются строжайшие требования с точки зрения соблюдения технологии, обеспечивающей надёжную и безотказную работу конструкции.

Согласно EN 13022-1, конструкция стеклопакета для структурного остекления, аналогично описанным выше решениям, должна иметь два контура герметизации (рис.3.1.15). При этом в качестве герметика второго контура должны использоваться высокопластичные, прочные силиконовые герметики, устойчивые к воздействию УФ. Поскольку, величина адгезии силиконового герметика

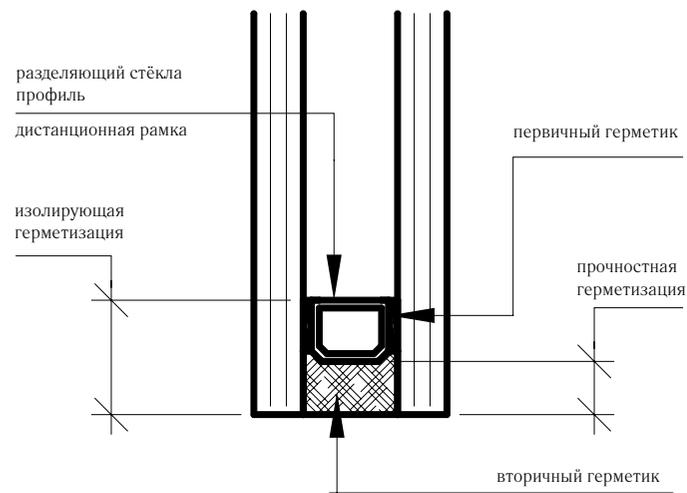


Рис. 3.1.15.
Принципиальное конструктивное решение стеклопакета для структурного остекления (EN 13022-1)

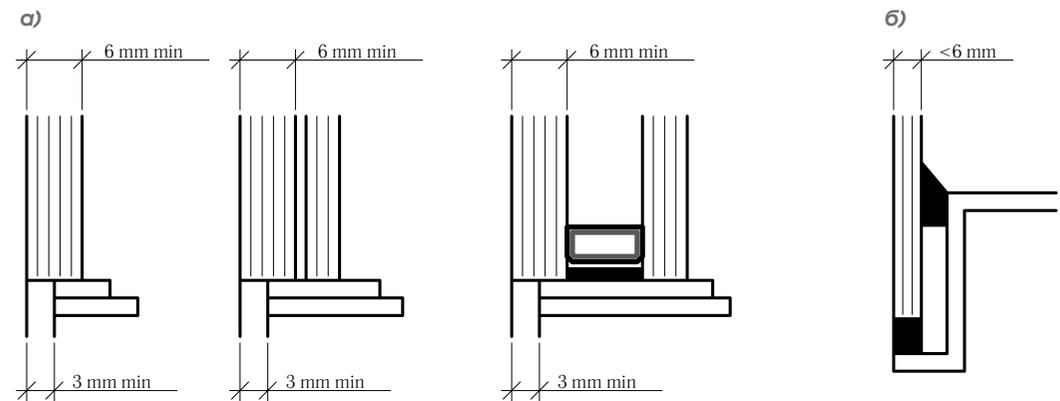


Рис. 3.1.16.
Минимальная наружная толщина стекла, многослойного стекла или стеклопакета для структурного остекления и схема его опирания на нижнюю страховочную опору.
а) при толщине наружного стекла более 6 мм;
б) при толщине наружного стекла менее 6 мм

зависит от влажности, в конструкции структурного остекления он должен быть надёжно защищён от всех видов увлажнения.

Согласно европейским нормативным документам, основным принципом проектирования структурного остекления, является недопустимость передачи нагрузки от собственного веса остекления на несущий клеевой слой. Это является определяющим условием для назначения геометрической формы стеклопакета (выпусков наружного стекла), глубины герметика второго контура, а также толщины наружного стекла, соответствующей расчётной схеме передачи нагрузки на страховочную опору через опорные подкладки (рис. 3.1.16). При отсутствии ограждающего герметика, опирание стекла происходит на полную толщину.

Величина глубины силиконового герметика второго контура в стеклопакете структурного остекления, согласно EN 13022-1, определяется из условия стабильности герметизирующего контура под действием сочетания ветровой и климатических нагрузок (см. разделы 4.3, 4.4, 4.7) и, соответственно зависит от схемы вклеивания стеклопакета в профильный элемент (рис. 3.1.17), толщины воздушной полости стеклопакета и соотношения толщин стёкол (рис. 3.1.18).

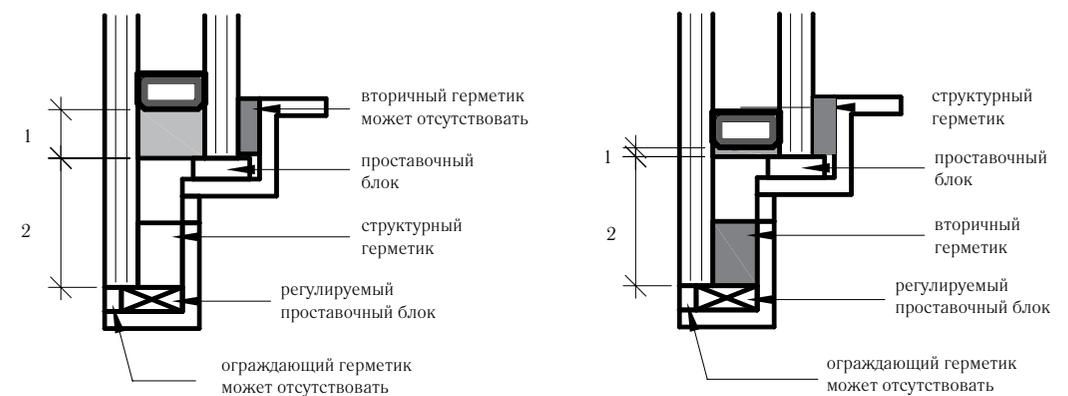


Рис. 3.1.17.
Конструктивные варианты вклеивания стеклопакета структурного остекления
а) приклеивание наружного стекла стеклопакета;
б) приклеивание внутреннего стекла стеклопакета
1 — глубина герметизации h
2 — выступ стекла

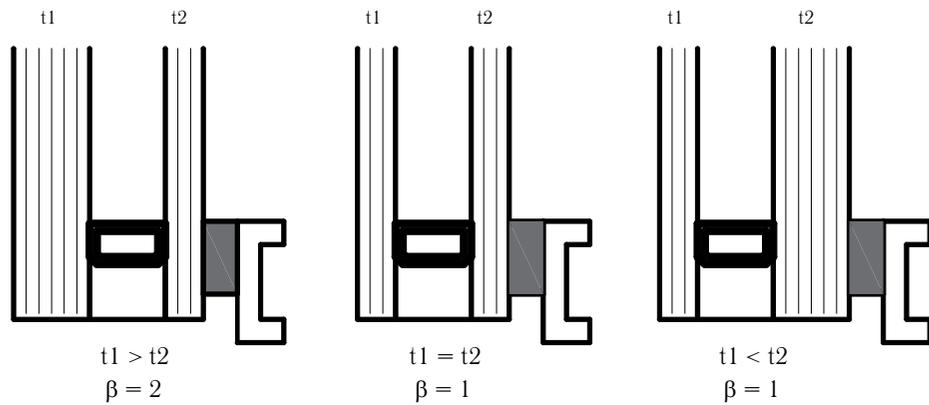


Рис. 3.1.18.

Расчётная схема к определению толщины второго герметизирующего слоя в стеклопакете структурного остекления.

Согласно EN 13022-1 для условий:

- соотношение высоты герметичного уплотнения h к ширине межстекольного расстояния d - $0,5 \leq h/d \leq 2$
- ширина межстекольного расстояния $d \geq 6$ мм
- разница геодезических высот между местом производства и и установки $\Delta a \leq 500$ м

В случае приклеивания наружного стекла пакета (рис.3.1.18а), глубина второго контура герметизации стеклопакета h принимается аналогично обычному механически закрепленному стеклопакету с силиконовым герметиком. В случае приклеивания внутреннего стекла, величина глубины герметизации h принимается не менее 8 мм и рассчитывается по формуле:

$$h = \frac{0,5 \times a \times P}{100 \times \sigma \times \beta} \quad (3.1.1)$$

где

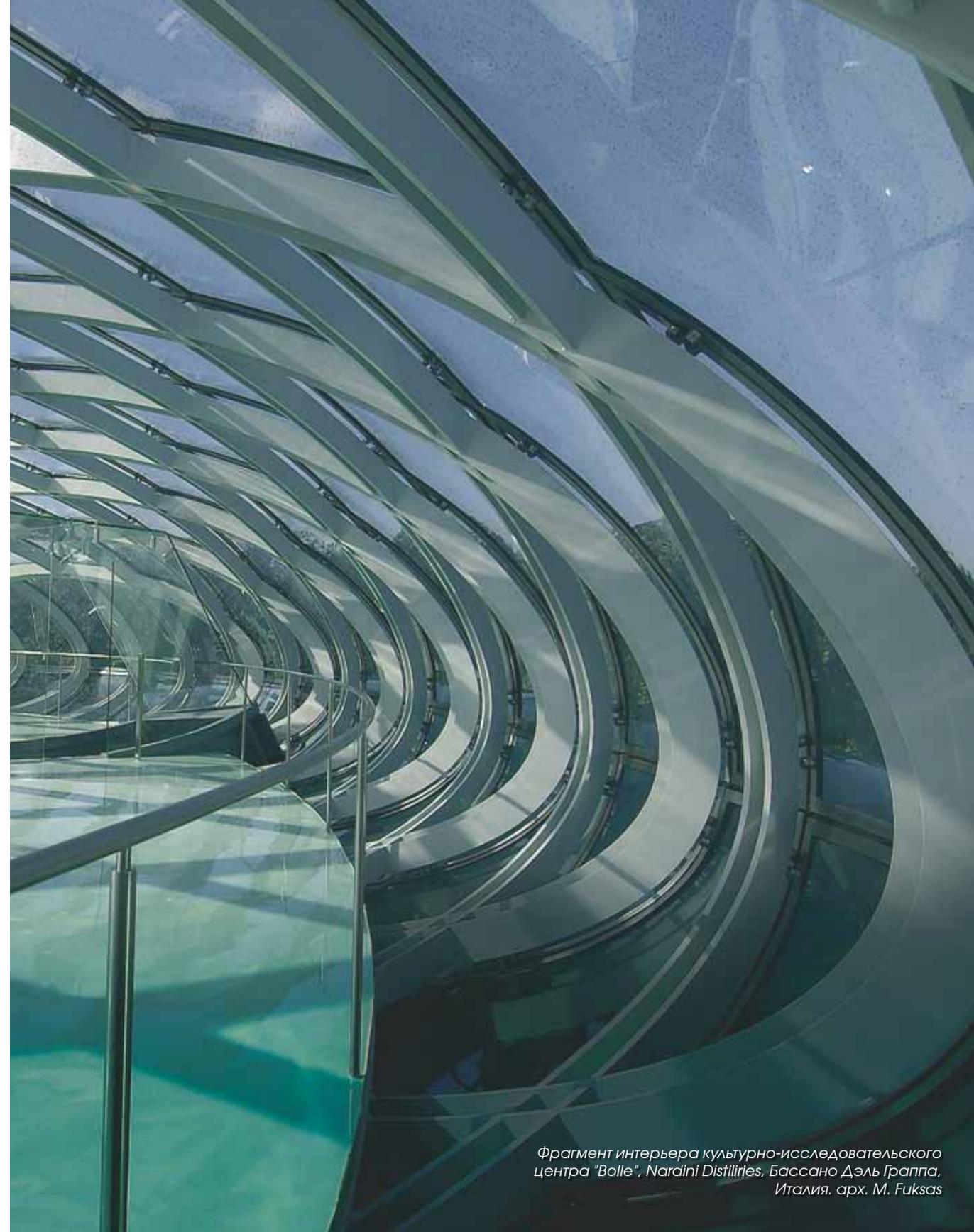
h — глубина герметизации стеклопакета, мм;

a — меньший размер стекла, м;

P — расчётное значение ветровой нагрузки, Па;

σ — допустимое напряжение в герметике, МПа;

β — коэффициент, принимаемый в зависимости от относительной толщины стекол пакета, согласно рис. 3.1.18.



Фрагмент интерьера культурно-исследовательского центра "Bolle", Nardini Distilleries, Бассано Дэль Граппа, Италия. арх. M. Fuksas

3.2. Фасадные и кровельные профильные системы.

Принцип построения и расчетные схемы

Несмотря на то, что светопрозрачное заполнение (стеклопакет) занимает основную долю площади светопрозрачной оболочки, её главные несущие функции, связанные с закреплением на каркасе здания, а также архитектурное формообразование целиком определяются возможностями профильной системы. На элементы профильной системы, кроме того, возложены такие принципиально важные функции как стабильность геометрии пространственной оболочки в целом и герметичность стыков элементов — под действием температурных напряжений, климатических воздействий и изменяемых во времени ветровых нагрузок.

Таким образом, понятие «профильной системы» играет определяющую роль в современной теории конструирования светопрозрачных фасадов и кровель. Спектр архитектурных, конструктивных и технологических возможностей современных профильных систем настолько широк, что их подробное описание и систематизация может занять несколько больших томов. Соответственно в рамках настоящей работы имеет смысл привести только самую общую классификацию и рассмотреть базовые предпосылки, используемые при построении расчётных схем и в инженерных расчётах.

Аналогично любой строительной технологии, базирующейся на принципах индустриального домостроения, под термином «профильная система» понимается определенная номенклатура изделий заводского изготовления, предназначенная для решения специализированных задач.

Разнообразие функциональных и технологических задач, которые могут быть решены при помощи той или иной профильной системы определяются номенклатурой системных профилей и материалом, из которого они изготавливаются. В рамках программы отдельного производителя, системы часто интегрируются между собой применительно к конкретной решаемой задаче.

Для изготовления конструкций навесных светопрозрачных фасадов наиболее часто применяются развитые профильные системы из алюминиевых сплавов (в распространённой терминологии называемые «алюминиевыми системами»), реже — системы из стали (для объектов с повышенными требованиями к прочности, огнестойкости и долговечности светопрозрачной оболочки); и комбинированные из клеёной древесины и алюминия — как правило, для элитных объектов невысокой этажности. Определённую конструктивную нишу, ограниченную остеклёнными фасадами небольшой площади и конструкциями ленточного остекления занимают профильные системы из ПВХ.

3.2.1. Классификация и архитектурно-композиционные возможности светопрозрачных фасадов.

Технология изготовления конструктивных элементов.

Конструктивные особенности профильных систем для фасадного остекления

Поступательное техническое совершенствование профильных систем, наблюдаемое на протяжении пяти последних десятилетий, привело к высокой степени индустриализации и унификации отдельных элементов, а также практически к единой идеологии построения, наблюдаемой у всех многочисленных производителей этих изделий по всему миру. Основу этой идеологии формируют технологические и конструктивные принципы, сложившиеся в начале 60-х годов, применительно к конструированию навесных стен. На современном этапе мы можем выделить **три основные группы навесных светопрозрачных фасадов, подразделяемых по конструктивному признаку и технологии возведения.**

Первую, и наиболее распространённую, группу формируют так называемые **стоечно-ригельные системы** (рис. 3.2.1.1а), предназначенные для создания пространственной фасадной оболочки из

отдельных стержневых элементов (профилей вертикальных стоек и горизонтальных ригелей), соединяемыми между собой под углом.

Ко второй группе относятся так называемые **элементные (или модульные) фасады**, чаще всего применяемые в высотном строительстве. Базовой конструктивной единицей (ячейкой) таких систем является неделимый рамный элемент — панель, чаще всего выполняемый на высоту в один или два этажа, полностью изготавливаемый в заводских условиях и доставляемый в собранном виде на стройплощадку (рис.3.2.1.1б).

Третью, самостоятельную группу, получившую распространение относительно недавно, образуют так называемые **спайдерные системы** (рис.3.2.1.1в), расчётная схема которых исключает опирание стекла или стеклопакета по контуру. Закрепление светопрозрачного заполнения на несущих конструкциях в таких фасадах осуществляется в нескольких точках при помощи специальных крепёжных элементов — спайдеров (от англ. — *spider* — паук).

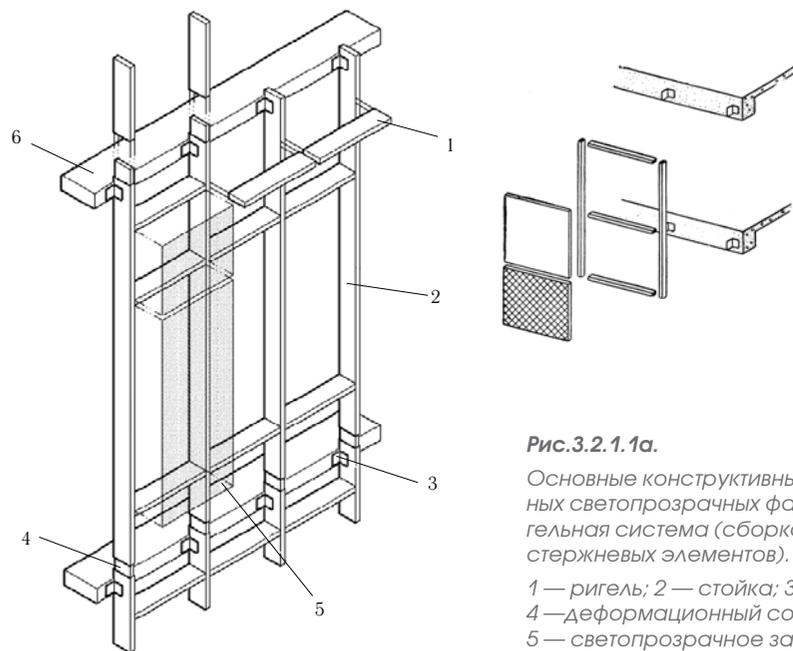


Рис.3.2.1.1а.
Основные конструктивные системы современных светопрозрачных фасадов. Стоечно-ригельная система (сборка фасада из отдельных стержневых элементов).
1 — ригель; 2 — стойка; 3 — кронштейн;
4 — деформационный соединитель;
5 — светопрозрачное заполнение;
6 — междуэтажное перекрытие

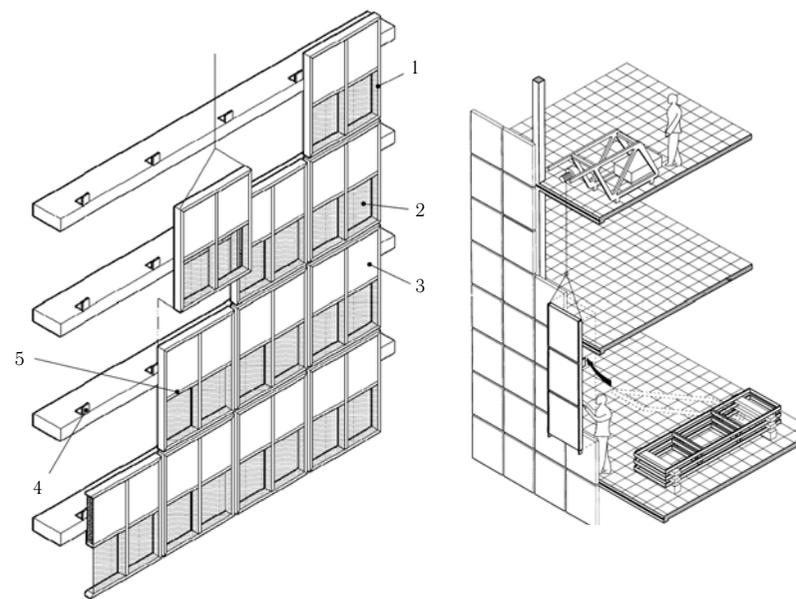


Рис.3.2.1.1б.
Основные конструктивные системы современных светопрозрачных фасадов. Модульный (элементный) фасад (сборка фасада из рамных элементов заводского изготовления).
1 — модуль (элемент); 2 — светопрозрачное заполнение; 3 — непрозрачное заполнение; 4 — кронштейн; 5 — шпрусса (ребро жёсткости)

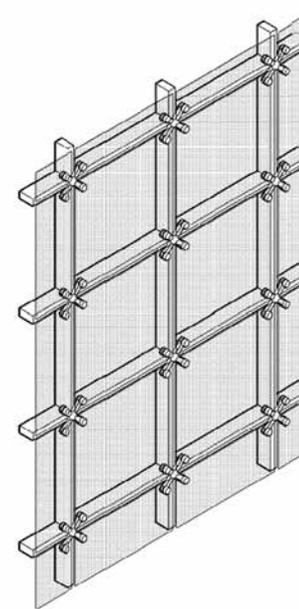


Рис.3.2.1.1в.
Основные конструктивные системы современных светопрозрачных фасадов. Спайдерное остекление



Стоечно-ригельные и модульные фасады дополнительно подразделяются **по технологии закрепления светопрозрачного заполнения (стеклопакета) на элементах профильной системы на стандартные** (с механическим закреплением стеклопакетов) и **структурные** (с клееным стеклопакетом).

В распространённой терминологии, кроме того, системы алюминиевых профилей для изготовления светопрозрачных конструкций, принято подразделять на «холодные», предназначенные для остекления неотапливаемых помещений (балконов и лоджий, входных тамбуров, витрин и др.) и «тёплые» с относительно высокими показателями тепловой защиты, достаточными для выполнения требований, предъявляемых при их установке в отапливаемых жилых и административных зданиях.

В **стандартных стоечно-ригельных системах** сетка образующих профильных элементов явно читается на фасаде; она создает определенное членение фасадной плоскости и является важным фактором в формировании общего композиционного и цветового решения (рис. 3.2.1.2).

Профильные системы из алюминиевых сплавов для изготовления «тёплых» стандартных стоечно-ригельных фасадов (с механическим закреплением стеклопакетов) образуются так называемыми «профильными системами с терморазрывом», состоящими из внутренней несущей части (основного профиля) и наружных прижимных элементов, за счёт которых осуществляется закрепление стеклопакетов в конструктивной ячейке (рис. 3.2.1.3). Наружная и внутренняя части соединяются термоизолирующей вставкой (в некоторых источниках — «термовставка» или «термомост») из низкотеплопроводного композитного материала. Наличие термовставки позволяет избежать сквозного локального промерзания конструкций по стенкам профиля вследствие высокой теплопроводности алюминия, а также в местах установки крепежных винтов, фиксирующих наружную прижимную планку.

Ширина, геометрическая конфигурация и материал термоизолирующей вставки зависит от фирмы-изготовителя. В профильных системах компании SCHÜCO применяются термовставки из поли-

амида, политермида, пористого полипропилена, полиакрилонитрила и цельно-ячеистого полиэтилена с плотностью 25–33 кг/м³. Выбор типа и материала термоизолирующих вставок определяется заданием на проектирование светопрозрачной оболочки по требованиям тепловой защиты, значениям действующих горизонтальных нагрузок и долговечности.

Форма сечения и материал внешней декоративной планки и внутреннего профиля стойки и ригеля создают не только дополнительные возможности разнообразных решений композиций фасада и интерьеров, но и оказывают влияние на некоторые технические свойства конструкций. Так для получения повышенных теплозащитных показателей применяют пластиковые прижимные планки, а для улучшения показателей взломоустойчивости или огнестойкости — прижимные планки из нержавеющей стали.

Заполнение отдельных ячеек (полей), образуемых перекрестными профильными элементами, может быть как светопрозрачным (стеклопакеты или многослойное стекло), так и непрозрачным. Непрозрачные участки с соответствующей декоративной облицовкой (композитный материал типа Alucobond, матированное стекло и др.) включаются в композицию фасада согласно архитектурному решению и могут быть утеплёнными или неутеплёнными. При проектировании зданий в климатических условиях России, непрозрачные утеплённые зоны со слоем эффективного утеплителя за декоративной облицовкой обычно располагаются в уровне междуэтажных перекрытий и дополнительно выполняют функцию противопожарных поясов (см. раздел 4.6.2).

Для исключения проникновения дождевой или конденсатной влаги в помещение, в конструкциях стоечно-ригельных фасадов предусматривается специальная система водоотвода, характерным отличием которой является вентилирование дренажных каналов и фальцев профильных элементов. В фасадных системах SCHÜCO используется принцип трёхуровневого отвода конденсата, запатентованный в Европе. Конструктивно указанный принцип осуществляется за счёт расположения водоотводящих каналов стоек и ригелей

в плоскостях, параллельно смещённых относительно поверхности фасада (рис. 3.2.1.4). Образующийся конденсат отводится с вышележащих водоотводящих каналов ригелей в нижележащие стоечные водоотводящие каналы, и затем контролируемо отводится на нижележащий этаж, где по такому же принципу вода отводится далее вниз.

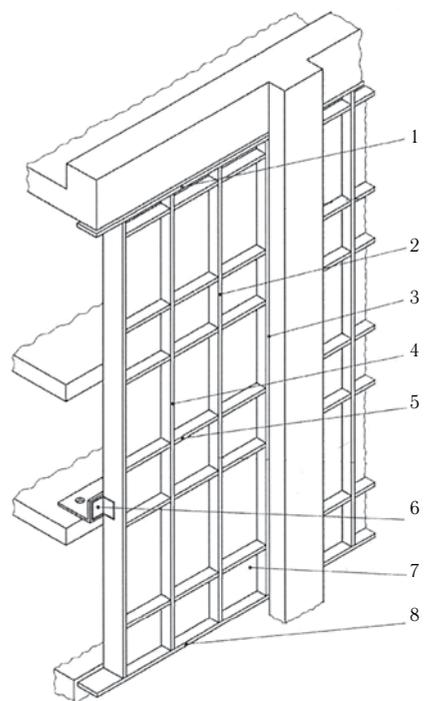


Рис.3.2.1.2.

Конструктивная схема и общий вид стандартного стоечно-ригельного фасада.

1 — верхний контурный ригель (примыкание к парапету и кровле); 2 и 4 — основной вертикальный несущий элемент — стойка; 3 — боковая вертикальная стойка (примыкание к непрозрачным участкам наружных стен, внешним пилонам и др.); 5 — горизонтальный несущий элемент — ригель; 6 — элемент крепления на междуэтажном перекрытии (кронштейн, опорная пластина и др.); 7 — заполнение конструктивной ячейки; 8 — нижний контурный ригель

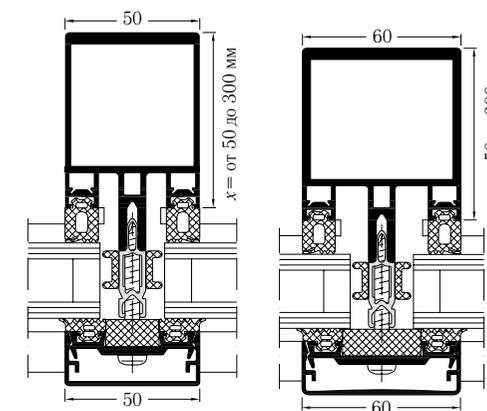
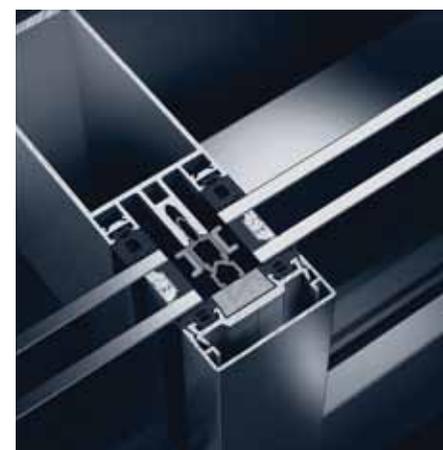
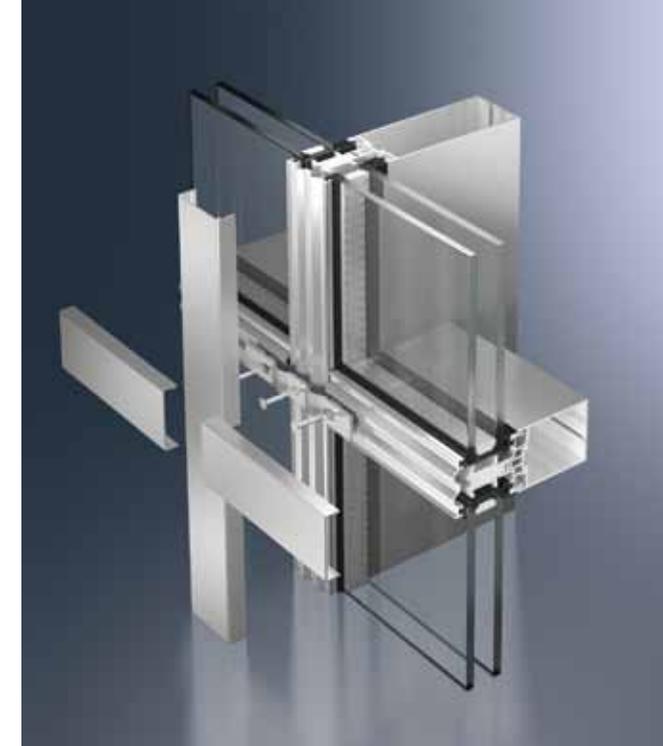
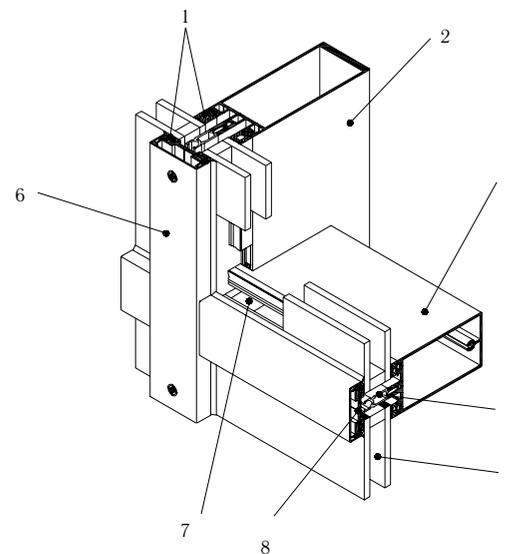


Рис.3.2.1.3.

Конструктивное решение «тёплых» стоечно-ригельных фасадов с комбинированными алюминиевыми профилями.

Системы стоечно-ригельных фасадов Schüco FW 50+/FW 60+. HI. Общий вид и сечение по вертикальной стойке.

1 — уплотнители стекла; 2 — профиль стойки (внутренний несущий профиль); 3 — профиль ригеля (внутренний несущий профиль); 4 — термоизолирующая вставка; 5 — стеклопакет; 6 — наружная декоративная планка; 7 — опорная подкладка под стеклопакет; 8 — прижимная планка

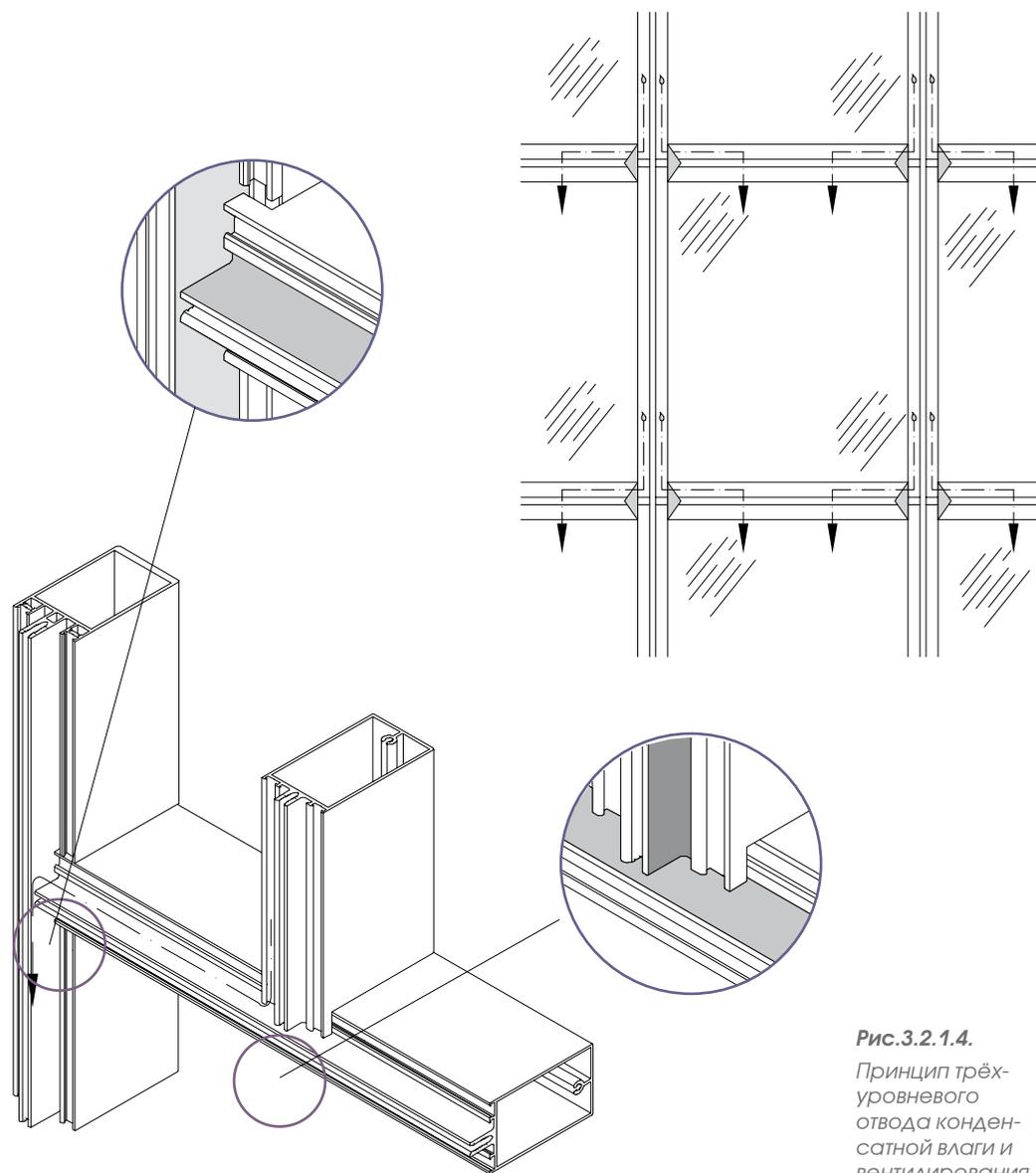


Рис.3.2.1.4.
 Принцип трёх-
 уровневового
 отвода конден-
 сатной влаги и
 вентилирования
 дренажных
 каналов в сто-
 ечно-ригельных
 фасадных си-
 стемах Schüco

Стойчно-ригельные фасады со структурным остеклением позволяют создать специфический архитектурный облик здания за счёт создания сплошной гладкой поверхности остекления с минимально выраженным членением. В отличие от схемы стандартного фасада, элементы стойчно-ригельной системы структурного остекления полностью находятся за плоскостью остекления и не заметны в фасадной композиции (рис. 3.2.1.5).

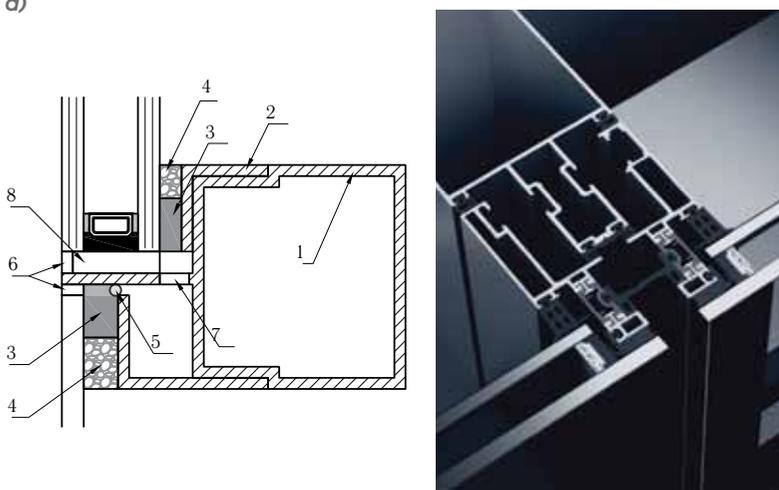
Разновидность такого решения представляют фасады с полуструктурным остеклением (рис. 3.2.1.6), характерной особенностью которых являются видимые рамные элементы крепления с наружной стороны только в вертикальной или только горизонтальной плоскости. Если в стандартном стойчно-ригельном фасаде поля заполнения визуальны и конструктивно разделяются декоративными планками, то в структурном и полуструктурном фасаде функцию визуального разделителя выполняет внешний структурный шов.

По технологии заполнения различают так называемые «мокрый» и «сухой» структурный шов. Технология «мокрого шва» предполагает заполнение пространства между стеклопакетами специальным атмосферо-стойким герметиком, устойчивым к УФ (DOW CORNING 791, DOW CORNING 756, DOW CORNING 797, DOW CORNING 795, Sikasil WS-305, Sikasil WS-605 S) обычно чёрного цвета. В технологии «сухого шва» герметизация стеклопакетов производится при помощи резиновых уплотнителей из EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer), т.е. из этилен-пропиленовый каучука различной формы — например, U-образной, вогнутой вовнутрь или выпуклой наружу (см. рис. 3.2.1.6).

В современной практике изготовления светопрозрачных конструкций под термином «структурное остекление» понимают все конструктивные решения, предполагающие закрепление стеклопакета на рамном или створочном профиле при помощи специального клея на основе силикона, имеющего очень высокие показатели устойчивости к воздействию УФ и адгезии к материалам приклеивания (стекло с одной стороны и алюминий или сталь — с другой).



а)



б)

Рис.3.2.1.5.

а) Принципиальное конструктивное решение и общий вид фасадов со структурным остеклением.

1 — каркас; 2 — приклеенная опорная рама; 3 — структурный клей;
4 — разделительная и поддерживающая лента; 5 — ограничительный шнур;
6 — уплотнение; 7 — дренажное отверстие; 8 — установочный блок

б) Системы структурного остекления Schüco SFC 85 SG

Рис.3.2.1.6.

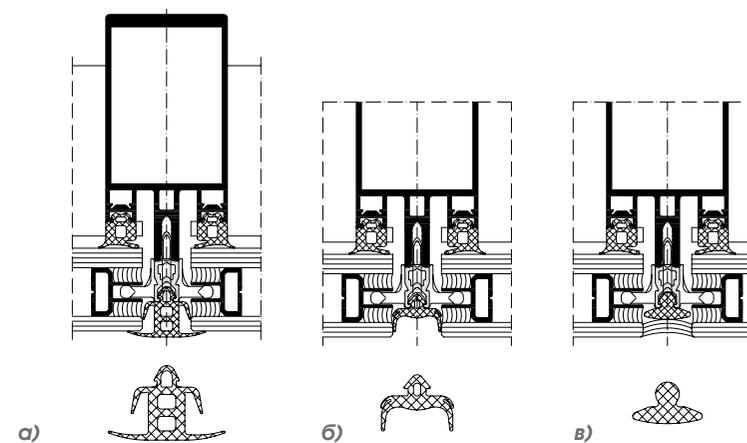
Конструктивное решение профильных систем для структурного остекления.

Сечения по вертикальной стойке фасадной системы структурного остекления Schüco FW 50+ SG/ FW 60+ SG

а) «сухой» шов, плоский уплотнитель

б) «сухой» шов, вогнутый U-уплотнитель

в) «мокрый» шов, герметик



а)

б)

в)

Для структурного остекления в европейских странах установлены строжайшие ограничения в области безопасности (см. также разделы 3.1 и 4.7), предусматривающие жёсткий контроль за соблюдением технологии вклеивания и используемых материалов — недеформируемой рамки стеклопакета, определённого типа герметика, стекла с определённым видом обработки кромок, профиля со специальной анодированной поверхностью. Европейскими нормативами оговаривается, что вклеивание стекла должно производиться строго в заводских условиях специально аттестованным персоналом. Приклеивание осуществляется в соответствии с техническими инструкциями ETA. Технический допуск ETA является неотъемлемой частью рабочей документации, все работы по вклеиванию регламентируются этим документом.

Изготовитель конструкций структурного остекления обязан соблюдать строгие требования по использованию и подготовке к переработке профилей, предназначенных для вклеивания стеклопакета. Во время перевозки, хранения и переработки профилей необходимо предохранять поверхности от любого рода воздействий, способных привести к снижению адгезии поверхности, на которую будет приклеиваться стеклопакет — механических повреждений (царапин и пр.) и химического воздействия.

Приклеивание стеклопакета к анодированной поверхности должно осуществляться в течение 6 месяцев после анодирования

профиля. Определяющим фактором является дата производства, проставленная на профильной маркировке. Изготовитель конструкций предупреждает об этом сроке. После его истечения, профили не могут быть использованы для изготовления конструкций структурного остекления, поскольку за это время происходит потеря адгезионных свойств поверхности.

При проектировании зданий с применением фасадных систем структурного остекления обязательно оговаривается максимально допустимая положительная и отрицательная ветровая нагрузка и допустимый наклон фасада по отношению к горизонту. Обязательными элементами системы, удерживающими заполнение является клеевой слой, опоры и держатели стекла. При необходимости устанавливаются дополнительные страховочные опоры, обеспечивающие защиту от выпадения при повышенных ветровых нагрузках. (рис. 3.2.1.7) Таким образом, основным принципом проектирования структурного остекления является недопустимость передачи нагрузки от собственного веса остекления на несущий клеевой слой.

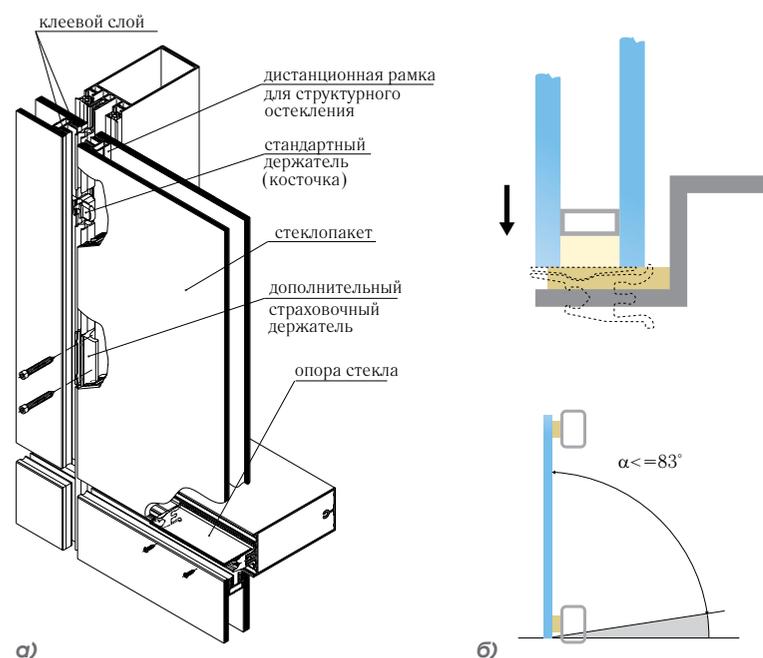
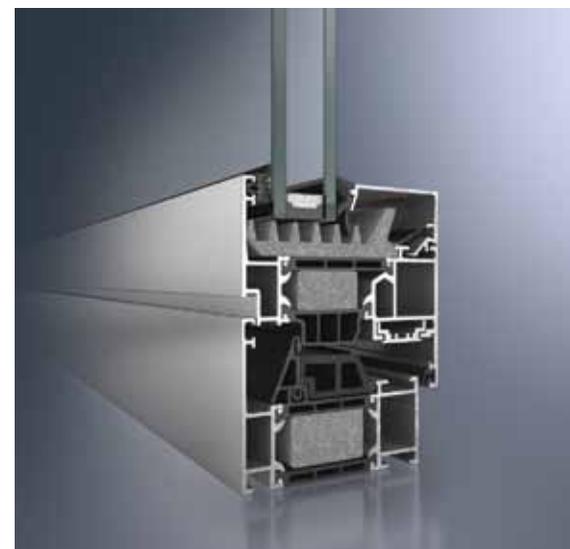
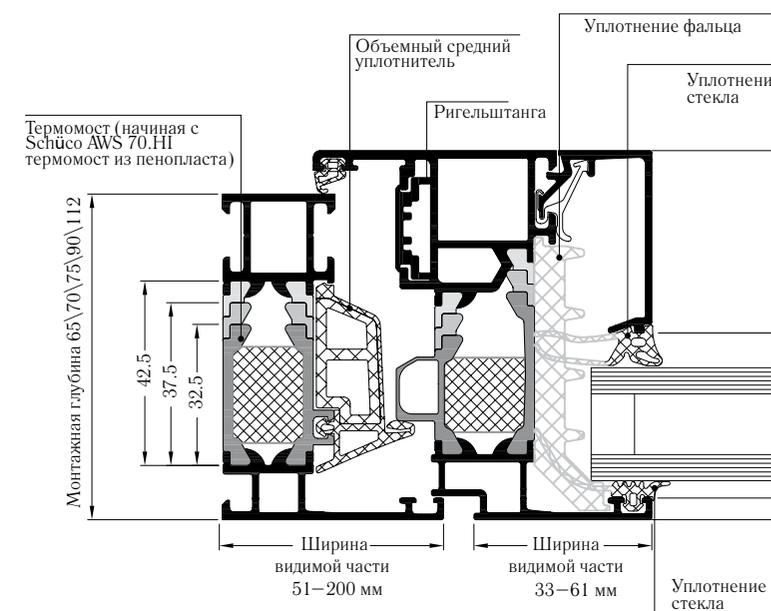


Рис. 3.2.1.7. Базовые требования к конструкциям фасадного остекления (согласно EN 13022-1).
а) недопустимость передачи нагрузки от собственного веса остекления на несущий клеевой слой — обязательное наличие нижней страховочной опоры; расположение фасадной плоскости в пределах угла 7-90 град. по отношению к горизонтали

Независимо от технологии закрепления стеклопакета (механическое или структурное клеивание), в конструктивные ячейки стоечно-ригельного фасада могут быть вставлены **открывающиеся окна**. Аналогично стандартным стоечно-ригельным системам, по конструктивному решению профильные элементы для открывающихся окон представляют собой комбинированные профили с термовставками. Для повышения теплозащитных качеств оконных профилей, в пространство между термовставками вставляется полиуретановый вкладыш (рис.3.2.1.8).

Рис. 3.2.1.8. Принципиальное конструктивное решение «тёплых» оконных профилей из алюминиевых сплавов. Оконные профильные системы Schüco AWS



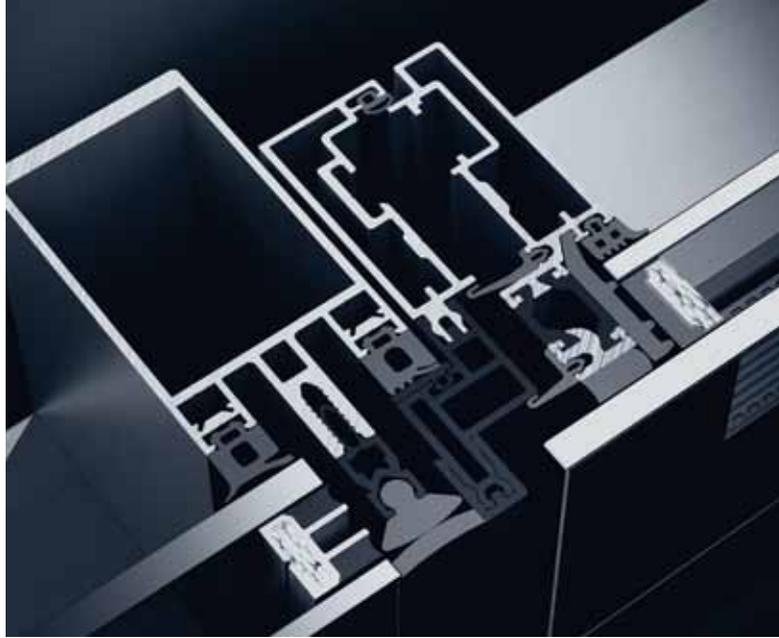


Рис.3.2.1.9.
Интеграция открывающихся окон в стоечно-ригельные фасады. Фасад структурный Schüco FW50+ SG («мокрый» шов) со встроенным окном Schüco AWS 102

Все крупные производители профилей для светопрозрачных фасадов, как правило, выделяют оконные конструкции в отдельные системы, комбинируемые с профильными элементами основного фасада (рис. 3.2.1.9), и позволяющие реализовать разнообразные конструктивные варианты открывающихся элементов, адаптированных по форме, цвету и типу открывания к общему архитектурно-композиционному и конструктивному решению светопрозрачной оболочки.

Современные системы фурнитуры для алюминиевых окон позволяют реализовать различные режимы открывания. С точки зрения новаторства и дизайна можно говорить о фурнитуре различных типов — видимой, накладной или скрытой, т.е. размещенной внутри камер профиля. Помимо привлекательности для архитекторов, скрытая фурнитура имеет высокую степень защищенности от внешних климатических воздействий и, следовательно — обладает повышенной долговечностью и надежностью (рис. 3.2.1.10).

По типу управления современные системы фурнитуры могут быть классифицированы на механическую (ручное управление открыванием-закрыванием окна) и мехатронную, осуществляющую открывание-закрывание окон под управлением централизованных систем автоматики. Обязательным требованием для использования мехатронной фурнитуры в строительных изделиях является наличие у неё запрограммированной функции защиты от защемления.



Рис. 3.2.1.10.
Скрытая механическая оконная фурнитура Schüco Avan Tec

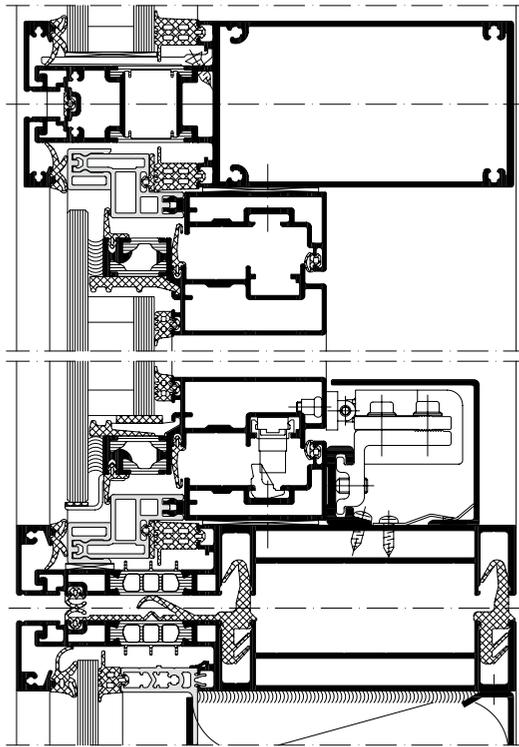
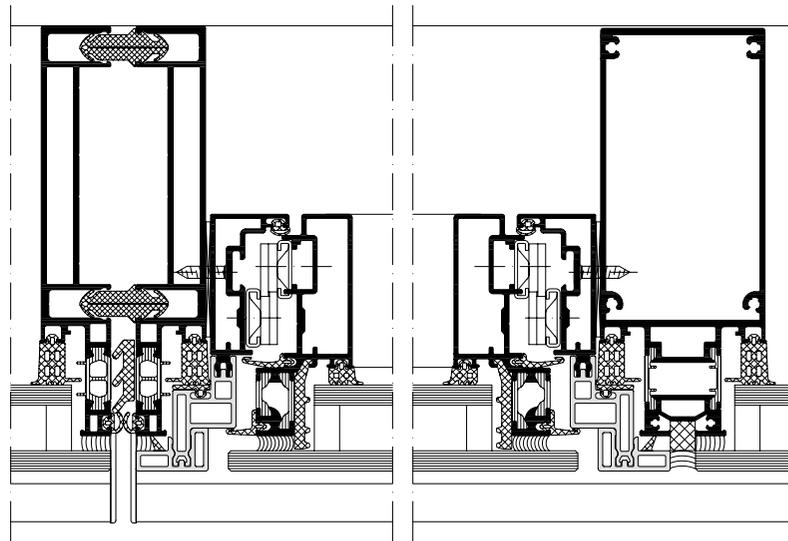


Рис. 3.2.1.10.
 Параллельно-отставные окна наружного открывания. Оконные системы Schüco AWS



Таким образом, в фасадную конструкцию могут быть интегрированы окна любых типов открывания — поворотные, поворотно-откидные, верхне-подвесные, средне-подвесные и т.д. В последнее время наибольшую популярность получили параллельно-отставные окна наружного открывания (рис. 3.2.1.11). При применении в высотных зданиях такая схема дополнительно обеспечивает эффективное восприятие ветровых нагрузок оконной фурнитурой.

Возможности формообразования фасадных оболочек (создание угловых секций, величина поворотного угла и др.) определяется ассортиментным набором артикулов профильной системы. Чем более развита в ассортиментном плане и тщательно проработана технологически профильная система, тем большие возможности имеет архи-

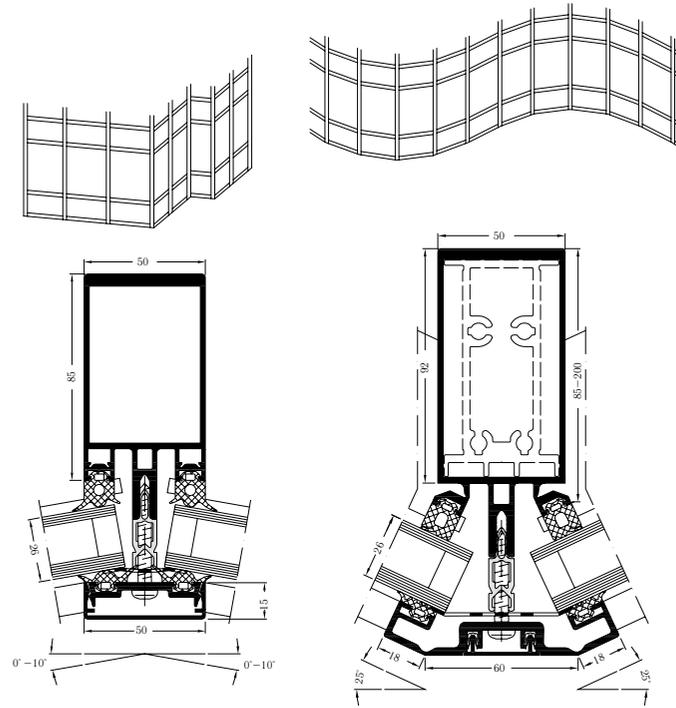
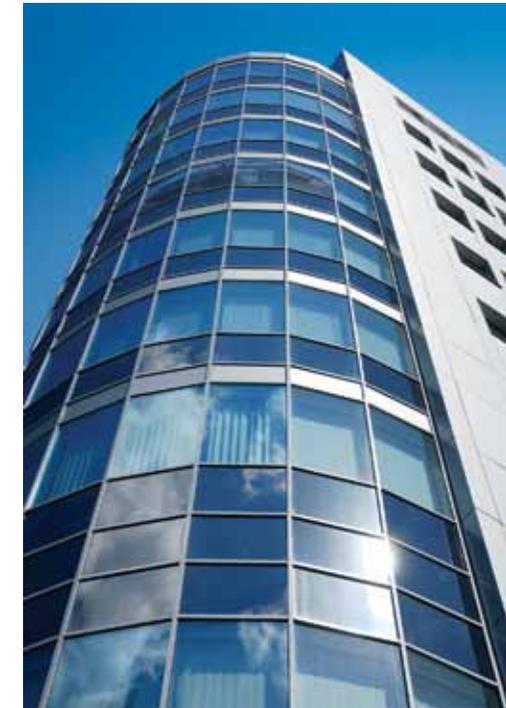


Рис. 3.2.1.11.
 Формообразующие возможности систем стоечно-ригельных фасадов. Примеры конструктивного решения внешнего и внутреннего угла сегментации. Системы Schüco FW 50+ \ FW 60+



тектор, проектирующий светопрозрачные оболочки на её основе. Например, для проектирования сложного в плане (сегментированного) фасада, необходимо использование ригелей и стоек с переменными углами (внешним и внутренним углом сегментации) (рис. 3.2.1.11).

Независимо от технологии закрепления светопрозрачного заполнения (стандартная или структурная), общая конструктивная идеология стоечно-ригельного фасада позволяет реализовать ни с чем не сравнимую гибкость в архитектурных решениях, удобство в транспортировке и обслуживании, а также высокую степень ремонтопригодности.

Вместе с тем, стоечно-ригельные фасады отличаются относительно невысокой степенью заводской готовности. Чаще всего на стройплощадку такой фасад доставляется в виде отдельных профилей, нарезанных по соответствующим размерам, дополнительная подгонка которых осуществляется при монтаже. Для снижения риска ошибки стеклопакеты на такой фасад, как правило, заказываются по окончании полного монтажа профилей после проведения фактических замеров ячеек и составления исполнительной схемы.

Монтаж стоечно-ригельных фасадных систем зачастую отличается достаточно большими сроками выполнения работ, и часто сопровождается невысоким качеством сборки, приводящим к многочисленным проблемам при эксплуатации. Поскольку монтаж стоечно-ригельной системы и установка заполнений, возможны только снаружи здания (со строительных лесов или вышки), технология его возведения в значительной степени зависит от человеческого фактора (квалификации монтажника), погодных условий и др. (рис. 3.2.1.12).

Очевидно, что фактор эксплуатационной предсказуемости и надёжности играет немаловажную роль в современной конструктивной тенденции, наблюдаемой у многих крупных производителей профильных систем, и заключающейся в переходе от поэлементной стоечно-ригельной системы навесной оболочки к большеразмерным рамным элементам (модулям), имеющим 100 % заводскую готовность.

Базовой конструктивной единицей (модулем) таких фасадов является неделимый рамный элемент — панель, чаще всего выполняемый на высоту в один или два этажа, полностью изготавли-



Рис. 3.2.1.12.

Низкое качество сборки стоечно-ригельного фасада приводит к многочисленным проблемам при эксплуатации

ваемый в заводских условиях и доставляемый в собранном виде на стройплощадку (рис. 3.2.1.13). Модуль изготавливается из системных профилей и закрепляется (навешивается) снаружи на выступающих консолях перекрытий. При необходимости панели могут выполняться высотой на два этажа и закрепляться на перекрытиях по схеме с консольным выпуском. В этом случае стыковка панелей по горизонтали осуществляется в уровне, соответствующем высоте подоконника и под потолком в уровне перекрытия.

В качестве внутреннего заполнения рамы могут быть использованы стеклопакеты, непрозрачные элементы или их комбинации, а также открывающиеся окна. Стеклопакет в раме модульного фасада может быть закреплен механически при помощи наружных штапиков или быть вклеенным по всему периметру в варианте структурного остекления (рис. 3.2.1.14). Обязательным условием проектирования рамных элементов с различным заполнением является наличие горизонтальных ребер жёсткости, располагаемых в местах стыковки заполнений в соответствии с архитектурно-композиционным решением.

В месте примыкания панелей друг к другу по вертикали образуются так называемая **разрезная стойка** (см. рис. 3.2.1.14). Для каждого из примыкающих элементов (полустойки) предусматривается сложная система уплотнений из эластичного резиноподобного материала, компенсирующая температурное расширение рамных

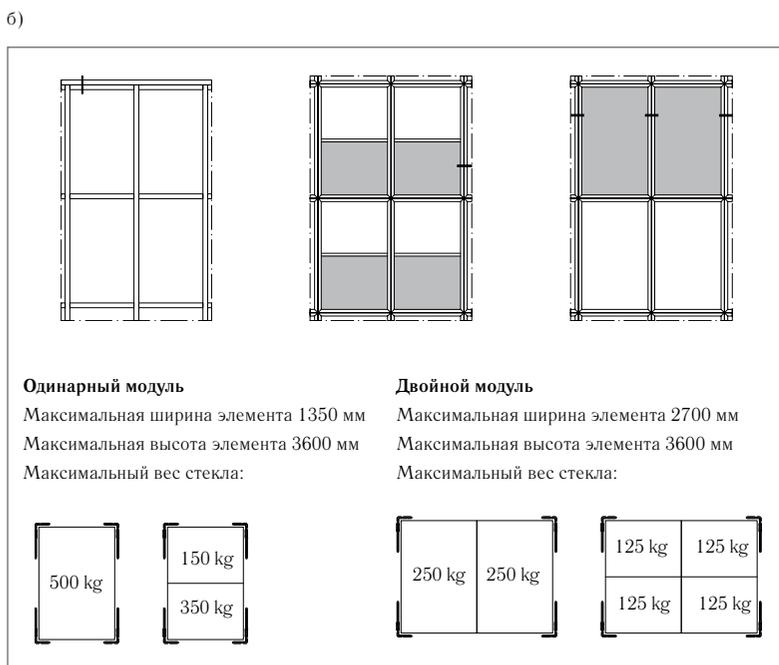
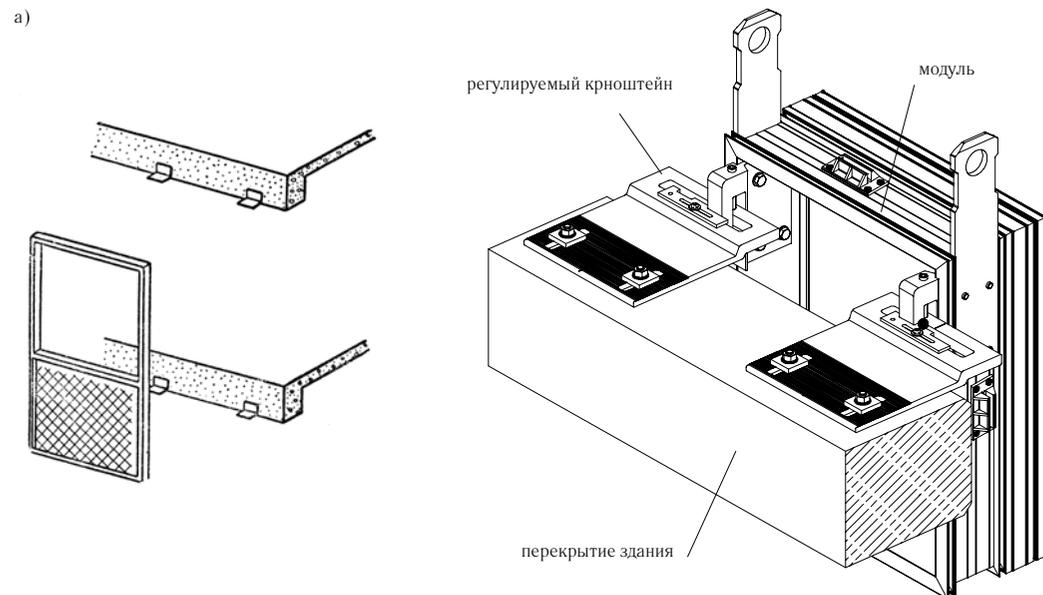


Рис.3.2.1.13.
 Принципиальное конструктивное решение элементного фасада (модульного фасада).
 а) закрепление модуля на междуэтажных перекрытиях;
 б) возможные варианты модульных элементов и ограничения по максимально допустимым размерам (система Schüco USC 65)

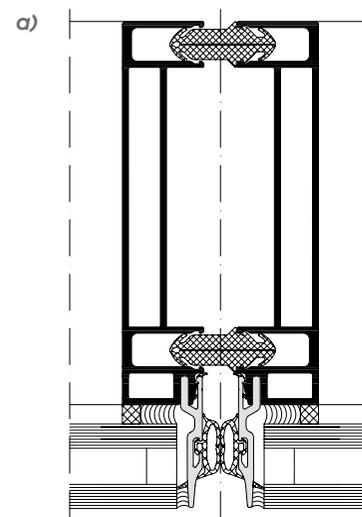
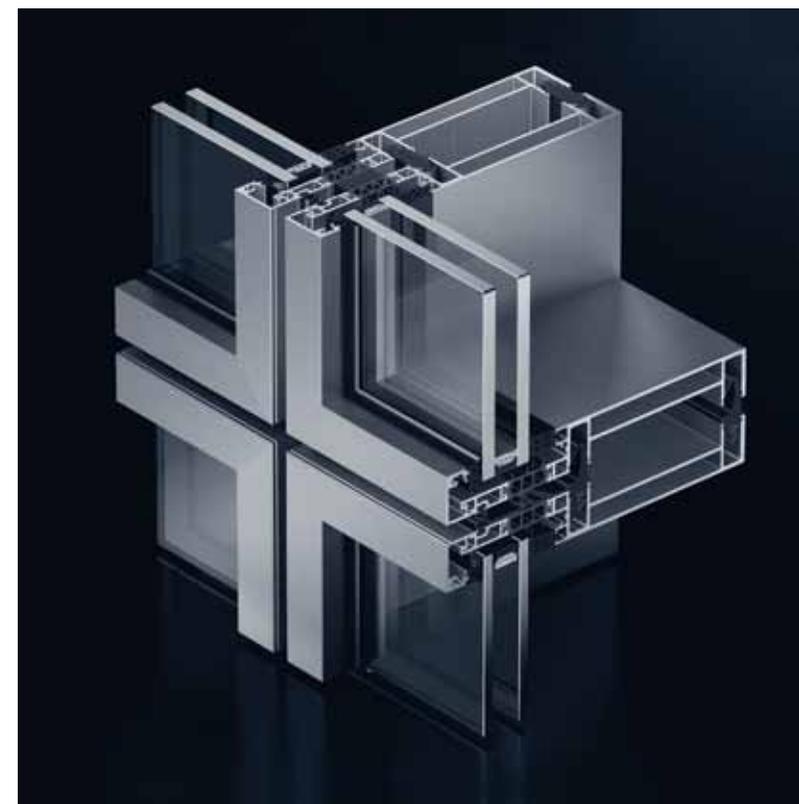
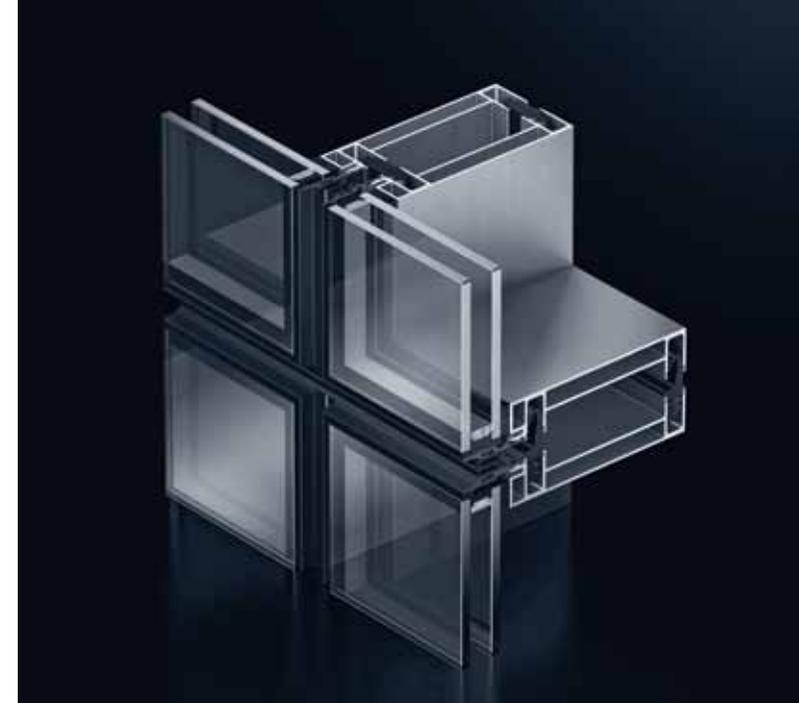
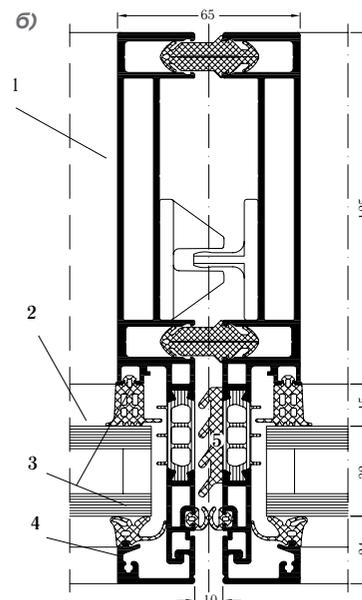


Рис. 3.2.1.14.
 Конструктивное решение профильной системы для элементного фасада.
 а) фасадная модульная система структурного остекления Schüco UCC 65
 б) фасадная модульная система с механическим закреплением стеклопакета Schüco USC 65
 1 — рамный профиль; 2 — стеклопакет; 3 — уплотнитель стекла; 4 — штапик; 5 — термо вставка

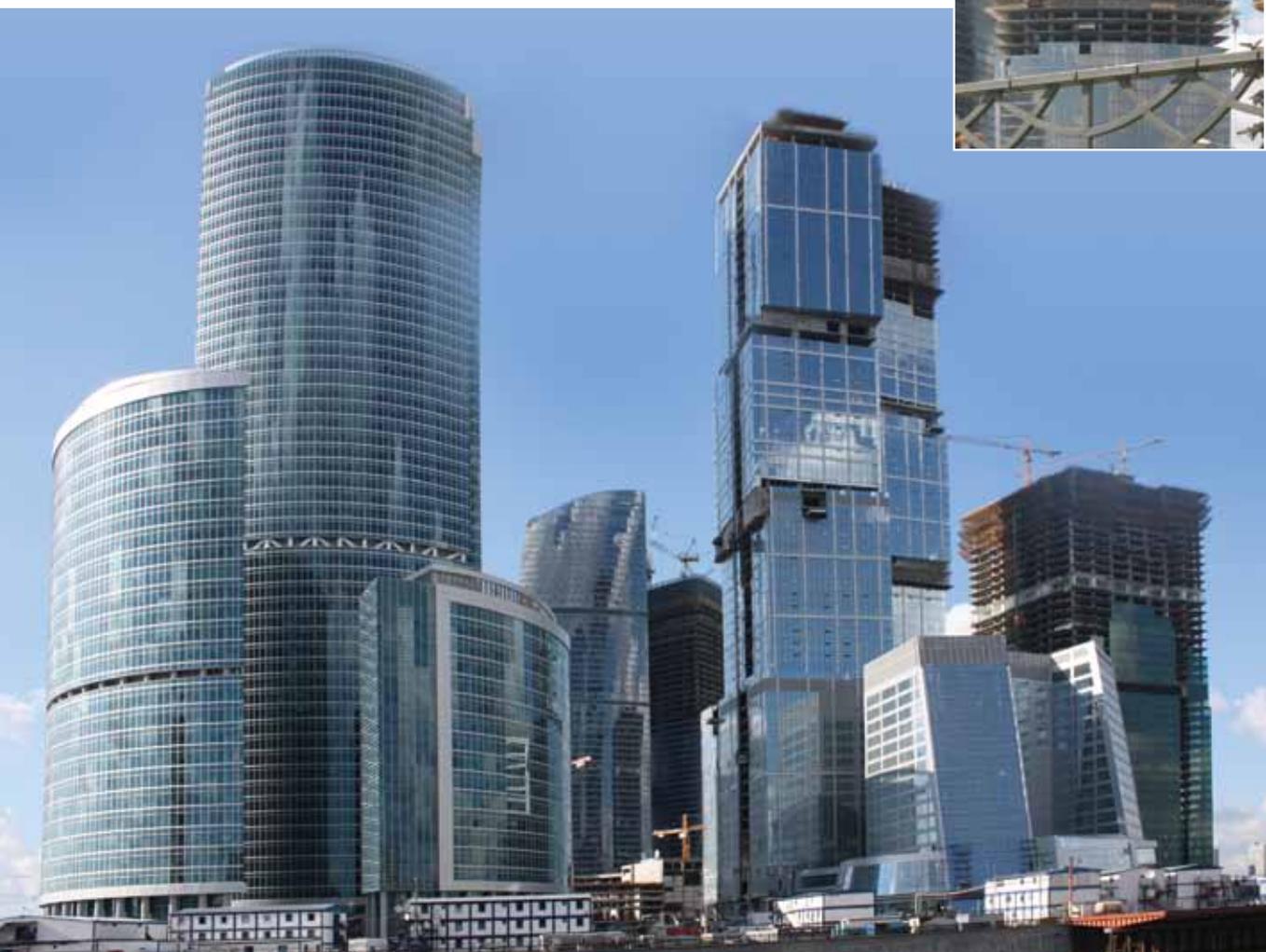


элементов и защищающая стык от продувания и проникновения влаги при дожде. Аналогично собственная система уплотнений предусматривается и для горизонтального элемента — рамного ригеля.

Модульные фасады, имеющие высокую степень заводской готовности удобны для выполнения фасадных оболочек большой площади, формируемых однотипными архитектурными модулями с повторяющимся рисунком, особенно в зданиях высокой этажности. За счёт высокой степени индустриализации модульный (элементный) фасад отличается более высоким итоговым качеством готовой фасадной конструкции при гораздо более коротких сроках монтажа. Навешивание модулей (т.е. непосредственно поэлементный монтаж) осуществляется изнутри здания, без возведения лесов при помощи стандартных строительных кранов (рис. 3.2.1.15).

Рис. 3.2.1.15.

Монтаж панелей модульных светопрозрачных фасадов высотного комплекса Москва-Сити



Модульные фасады представляют собой перспективное технологическое решение. Вместе с тем, на сегодняшний день их применение пока еще ограничено определенными функциональными рамками. В частности модульный фасад по всем показателям уступает стоечно-ригельному в части архитектурного формообразования.

В силу специфического принципа водоотвода, эта конструктивная идеология неприменима для устройства кровельного остекления. Серьёзным недостатком модульного фасада является низкая ремонтопригодность. В случае повреждения одного из модулей готового фасада, он не подлежит ремонту. Существующие на сегодняшний день технические решения предусматривают замену испорченных заполнений модуля (стеклопакетов), но не самого модуля.

3.2.2. Расчётные схемы стержневых фасадных оболочек. Основные критерии инженерных расчётов. Выбор сечений профильных элементов

При построении расчётных схем стоечно-ригельных фасадов выделяют **основные** и **второстепенные** несущие элементы. Под **основными** понимаются элементы, непосредственно закрепляемые на несущем каркасе, воспринимающие действующие нагрузки в пределах участка между точками крепления и передающие их на несущий каркас здания. **Второстепенные** элементы, участвуют в формировании пространственной жесткости навесной оболочки и перераспределяют воспринимаемые нагрузки в пределах ответственного участка (конструктивной ячейки) на основные элементы.

В подавляющем большинстве случаев в качестве основных рабочих элементов принимаются стойки, закрепляемые на междуэтажных перекрытиях и рассчитываемые по схеме шарнирно — опертой балки на двух опорах в разрезном — при высоте стойки на 1 этаж; или неразрезном варианте — при высоте стойки на 2 этажа (рис. 3.2.2.1).

Несущий каркас здания, предназначенный для закрепления светопрозрачного навесного фасада обычно проектируется

$$\text{erf.}I_x = \frac{q \times L^4}{185 \times E \times f} [\text{см}^4]$$

$$\text{erf.}W_x = 70,4 \times q \times L^2 [\text{см}^3]$$

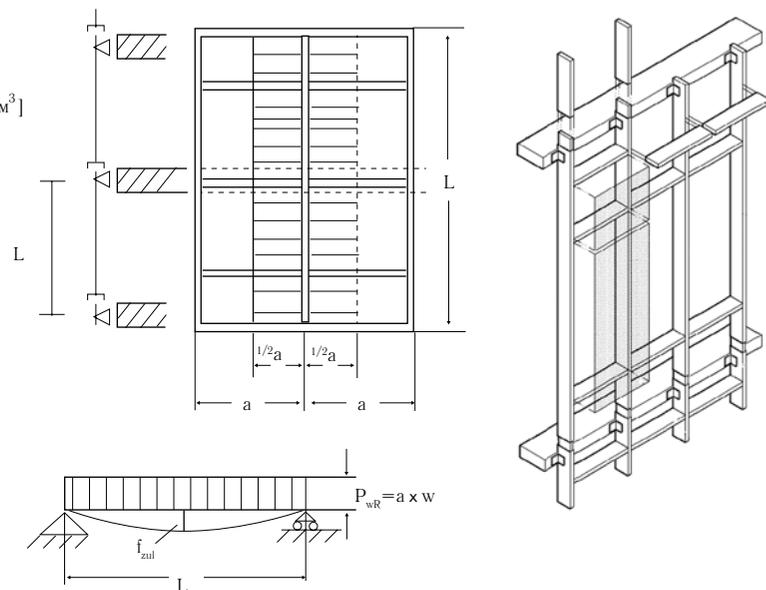
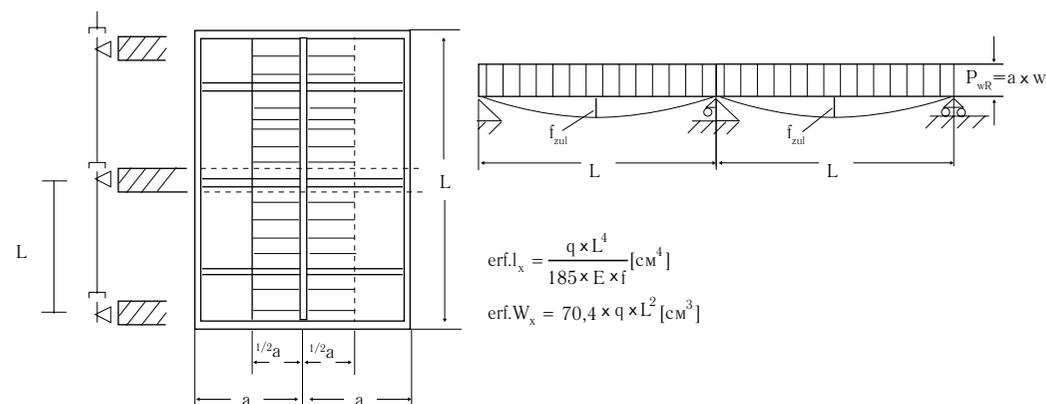


Рис. 3.2.2.1а.

Закрепление основных элементов (вертикальных стоек) навесного стоечно-ригельного фасада по схеме однопролетной балки на двух опорах.



$$\text{erf.}I_x = \frac{q \times L^4}{185 \times E \times f} [\text{см}^4]$$

$$\text{erf.}W_x = 70,4 \times q \times L^2 [\text{см}^3]$$

Рис. 3.2.2.1б.

Закрепление основных элементов стоечно-ригельного навесного фасада по схеме двухпролетной неразрезной балки.

Профиль вертикальной стойки длиной на 2 этажа дополнительно закрепленный на междуэтажном перекрытии (в центре расчетного пролета)

с перекрытиями, имеющими небольшой консольный выступ за наружную грань колонн или внутренних несущих стен. Это удобно для закрепления несущих кроштейнов на перекрытиях и, соответственно, облегчает монтаж навесной стены.

Вертикальное расположение основных элементов стоечно-ригельного фасада эффективно с точки зрения назначения размеров элементов и выбора профиля их сечений. Вертикальные элементы рассчитывают на нормальные (как правило, растягивающие) усилия, действующие вдоль оси стержня и на плоский изгиб (рис. 3.2.2.2). Поскольку вертикальные стоечные элементы имеют малый собственный вес, основное значение имеют изгибающие нагрузки в основном от действия ветра (см. раздел 4.4.). Сечения основных вертикальных элементов (стоек), таким образом, должны обладать достаточным моментом сопротивления и моментом инерции только в плоскости изгиба. Наиболее хорошо работают профили, имеющие большую конструктивную высоту сечения в плоскости, нормальной к поверхности стены. На этой конструктивной предпосылке базируется ассортимент артикулов всех развитых систем стоечно-ригельных фасадов, имеющих большой ассортимент стоечных профилей с различными моментами инерции в рабочей плоскости для зданий различной этажности, возводимых в различных ветровых районах (см.рис. 3.2.2.2).

При условии вертикального расположения основных элементов, горизонтальные ригели рассчитываются на плоский изгиб под действием собственного веса и веса стеклопакетов или непрозрачных филенок по схеме шарнирной балки на двух опорах, принимаемых согласно рис. 3.2.2.3. Точки приложения сосредоточенной нагрузки от веса стеклопакета соответствуют местам расположения опорных подкладок под стеклопакет, жестко фиксируемых в ригельном профиле (см.поз.7 рис. 3.2.1.3). Таким образом, исключается передача опорных реакций на углы стеклопакета, где имеет место наибольшая концентрация локальных напряжений.

Горизонтальный вариант расположения основных элементов, закрепляемых на перекрытиях или вертикальных промежуточных опорах (колоннах или стойках фахверка) применяется

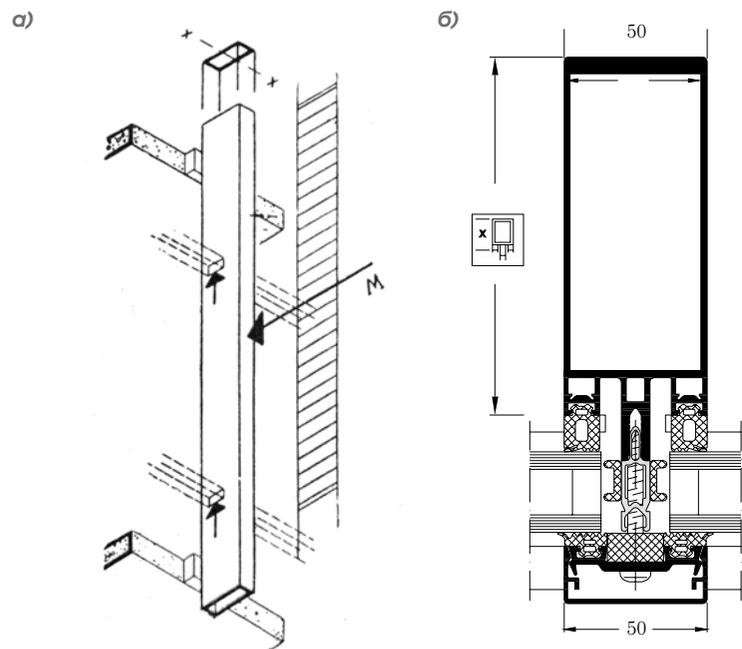
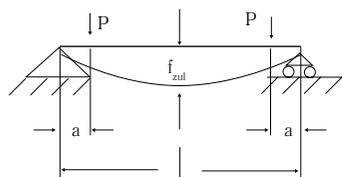
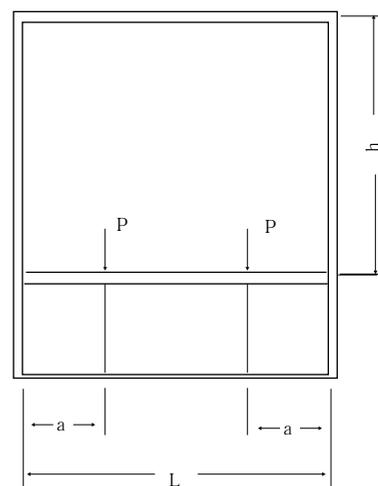


Рис. 3.2.2.2.
Условия пространственной работы основных вертикальных элементов стоечно-ригельного фасада.

а) Изгиб в одной плоскости (плоский изгиб) под действием горизонтальной (ветровой) нагрузки;

б) стоечные профили с различным моментом инерции как неотъемлемый элемент профильной системы для навесных фасадов. Система Schüco FW 50+ HI



$$P = \frac{h \times L}{185 \times E \times f} q_G (3L^2 - 4a^2) \text{ [kN]}$$

$$I_y = \frac{(P \times a)}{(24 \times E \times f_{zul})} \times (3L^2 - 4a^2) + \frac{(1,88 \times R_G \times L^4)}{f_{zul} \times 10^8} \text{ [cm}^4\text{]}$$

Рис. 3.2.2.3.
Расчетная схема горизонтального ригеля при вертикальном расположении основных элементов стоечно-ригельного фасада

в стоечно-ригельных фасадах крайне редко в силу неэффективных условий работы профильных элементов и непредсказуемого распределения напряжений по навесной оболочке. В противовес схеме с вертикальными несущими элементами, где имеет место раздельное восприятие вертикальных и горизонтальных нагрузок, т.е. стойки воспринимают нагрузку от ветра, а ригели от собственного веса стеклопакетов, схема с несущими ригелями предполагает сложное нагружение горизонтальных элементов с изгибом в двух плоскостях (рис. 3.2.2.4).

Наиболее пригодными к таким условиям нагружения являются коробчатые профили квадратного сечения, обладающие примерно равными моментами сопротивления и моментами инерции в обеих плоскостях. В ассортименте производителей системных профилей они, как правило, встречаются в весьма ограниченных артикулах.

Определяющую роль в фактической пространственной работе навесной стоечно-ригельной оболочки играют узлы соединения стержневых элементов, учитываемых в расчётных схемах как шарнирные (рис. 3.2.2.5). При изготовлении конструкции технологические размеры ригеля принимаются с учётом температурных зазоров, обеспечивающих его свободную подвижку при температурном расширении. Ригель может быть прикреплён к стойке через винтовой

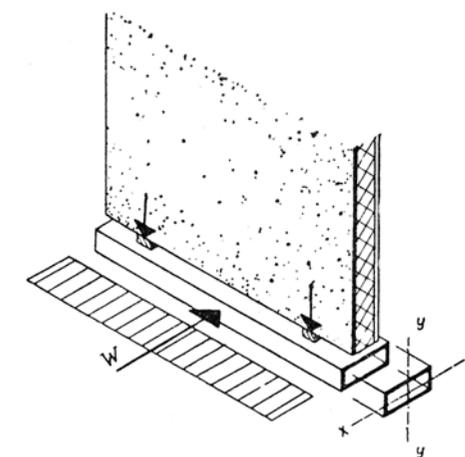


Рис. 3.2.2.4.
Условия пространственной работы основных горизонтальных элементов стоечно-ригельного фасада. Сложный изгиб под действием ветровой нагрузки и собственного веса

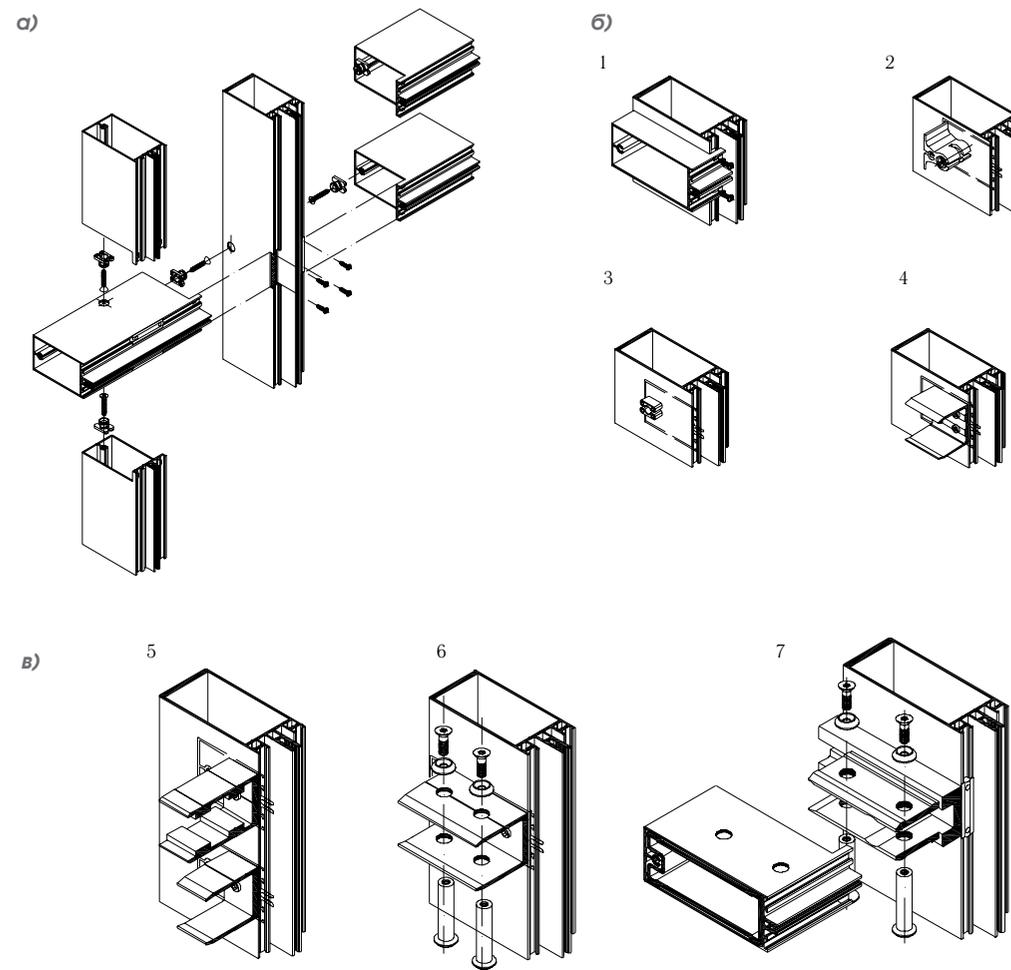


Рис. 3.2.2.5.

Конструктивное решение узлов соединения стержневых элементов в стоечно-ригельном фасаде. Системы Schüco FW 50+ \ FW 60+

а) Присоединение горизонтального ригеля к основной вертикальной несущей стойке и вспомогательной (промежуточной) вертикальной стойке к ригелю (слева).

Типы Т-соединителей.

б) Стандартные Т-соединители: 1 — Т-соединение на шурупах; 2- пружинный Т-соединитель; 3 — кнопочный Т-соединитель; 4 — профильный Т-соединитель

в) Т-соединители для повышенных нагрузок: 5 — профильный усиленный Т-соединитель; 6 — профильный Т-соединитель со втулкой; 7 — Т-соединитель для особо высоких нагрузок

канал или через Т-соединитель. Для обеспечения герметичности соединения, принимающий паз уплотнителя ригеля соединяется внахлест с принимающим пазом уплотнителя стойки.

При проектировании фасадов со структурным остеклением, в расчёте учитывается дополнительная страховочная опора, поддерживающая стеклопакет в нижней точке и в обязательном порядке входящая в состав профильной системы для структурного остекления (см. рис. 3.2.1.7).

Определение проектных размеров элементов структурного остекления в Европе производится на основании документа ETAG 2002 (European Technical Approval for Bonded Glass Constructions). Согласно указанному документу, при размере конструктивной ячейки фасада со структурным остеклением свыше 1,5 x 2,5 м, должны быть обязательно проведены дополнительные прочностных расчётов на действие сочетания ветровой и климатической нагрузок по условию недопустимости разрушения герметизирующего контура стеклопакета и герметика по периметру вклеивания стеклопакета в раму (см. гл. 4). Дополнительно должна быть учтена несущая способность элементов профильной системы, определяемая на основании принятой расчётной схемы, принцип построения которых описан выше.

В существующей практике проектирования стоечно-ригельных фасадов, выбор требуемых прочностных характеристик (моментов инерции) основных и второстепенных профилей (стоек и ригелей), а также комбинаций их артикулов осуществляется на основании так называемого элементного статического расчёта, методика выполнения которого определяется соответствующими европейскими и североамериканскими нормативными документами. Основным критерием этого расчёта является величина максимально допустимого прогиба вертикальных и горизонтальных профильных элементов.

Указанные величины допустимых прогибов принимаются из условия недопустимости избыточной инфильтрации холодного воздуха, вызываемого сквозным продуванием фасада в местах сопряжения элементов (профилей и стеклопакетов). Вместе с тем, по поводу корректной оценки этой величины единого мнения у специалистов не существует. Так, в частности, в европейском нормативе

DIN EN 13830 «Навесные фасады» на протяжении длительного периода фигурировала величина допустимого прогиба вертикальной стойки, принимаемого не более 1/200 от расчетного пролета (расстояния между точками крепления), но не превышающего фиксированного значения, равного 15 мм; и величина максимального прогиба горизонтального ригеля не более 1/500 от расчетного пролета, но не превышающего 3 мм.

В новой пересмотренной редакции указанного стандарта были введены новые требования к величине допустимого прогиба, приведённые в табл. 3.2.2.1, базирующиеся на спецификациях Центра оконных и фасадных технологий (Centre of Window and Cladding Technology — CWCT), апробированных и подтверждённых результатами испытаний^[14].

Табл.3.2.2.1

Предельно допустимые прогибы конструктивных элементов
(согласно DIN EN 13830)

Рабочая длина пролёта	Предельно допустимый прогиб
0–3000 мм	1/200
3000–7500 мм	мм + 1/300
>7500 мм	1/250

В высказываниях европейских специалистов по этому поводу справедливо отмечается необходимость ухода прежде всего от фиксированных величин допустимых прогибов, поскольку практика показывает, что при длине пролёта более 3 м, могут возникать прогибы, значительно превышающие значения 3 мм и 15 мм, и которые в действительности не могут быть профессионально оценены^[14].

Вместе с тем, очевидно, что плотность стыковых соединений, прорабатываемых для профильных систем на уровне точной механики, в гораздо большей степени зависит не от прогиба каждого отдельного профильного элемента, а от разницы в прогибах горизонтальных ригелей и вертикальных стоек, имеющих различную схему загрузки. В тех случаях, когда моменты и инерции двух со-

единенных между собой конструктивных элементов и воспринимаемые ими нагрузки сильно отличаются друг от друга, разуплотнение стыков будет неизбежным. Таким образом, **при расчете стоечно-ригельных фасадов существует необходимость говорить не только об ограничении допустимых прогибов, но и о согласовании эксплуатационных прогибов отдельных элементов.**

Как показывает практика, спрогнозировать этот фактор на стадии проведения поэлементного прочностного расчёта для стандартного стоечно-ригельного фасада практически нереально; ровно настолько же в этом случае непредсказуемой будет погрешность, определяемая фактической работой каждого отдельного стержня.

Характер восприятия нагрузок рамным элементом модульного фасада принципиально отличен от стержневых элементов стандартного стоечно-ригельного фасада. Однако, в сложившейся практике назначения размеров сечений профилей применяется точно такой же элементный статический расчёт, где в качестве основного элемента принимается вертикальная полустойка. Принципиальным отличием при проектировании модульного фасада является дополнительный расчёт угловых соединений из условия восприятия монтажных нагрузок.

3.2.3. Основные конструктивные принципы проектирования светопрозрачных кровель. Кровельные профильные системы

В современных технологических решениях профильных систем из алюминия и стали в отдельную группу выделяются системы и подсистемы для кровельного остекления. Основным конструктивным отличием кровельных систем является принцип водоотвода, разрабатываемый с учётом того, что естественный сток воды затрудняется при уклоне менее 7–10 градусов. Для решения задачи проектирования малоуклонных (плоских) «стеклянных» кровель, в соответствующих профильных системах предусматривается специальная номенклатура уплотнений, стыковочных и герметизирующих деталей, отличная от систем, предназначенных для фасадного остекления.

В существующей европейской практике под термином «фасадное остекление» понимаются навесные светопрозрачные оболочки, располагаемые вертикально или под малым положительным или отрицательным углом к горизонту. Наклон наружу считается отрицательным, наклон внутрь здания — положительным. Вертикальным принято считать фасад, расположенный строго вертикально или отклоняющийся от вертикали на угол не более 15 градусов. Эти ограничения фактически определяют границы применимости профильных систем, предназначенных для фасадного остекления. В практической деятельности фасадные системы нередко применяются для изготовления скатных светопрозрачных кровель с большим уклоном, однако уклон кровли менее 10 градусов в данном случае считается критическим.

Характерным отличием профильных систем для светопрозрачных кровель, в частности, являются конструктивные элементы, предназначенные для обеспечения водоотвода с поверхности кровли и конденсатной влаги из подкровельного пространства — скошенные под углом прижимные планки, уплотнители с канавками для отвода конденсата, дополнительные герметизирующие ленты (рис. 3.2.3.2). При необходимости в конструкцию светопрозрачной кровли, могут быть интегрированы открывающиеся окна (рис. 3.2.3.3).

В отличие от навесных фасадных оболочек, воспринимающих значительные ветровые нагрузки, основную долю статической нагрузки на светопрозрачные кровли составляют собственный вес стеклопакетов, снег и лёд. Эта нагрузка воспринимается опорными профильными элементами — кровельными ригелями (в распространенной практической терминологии — стойками), перераспределяющими её на несущие конструкции покрытия (балки, фермы, структурные пространственные системы).

В зависимости от архитектурного решения, кровельные ригели соединяются между собой под прямым или произвольным углом, образуя прямоугольные, трапецевидные или треугольные ячейки, заполняемые стеклопакетами. Таким образом, при малом угле наклона кровли, стеклопакет шарнирно опирается по четырём сторонам. По мере увеличения угла наклона, происходит уменьшение го-

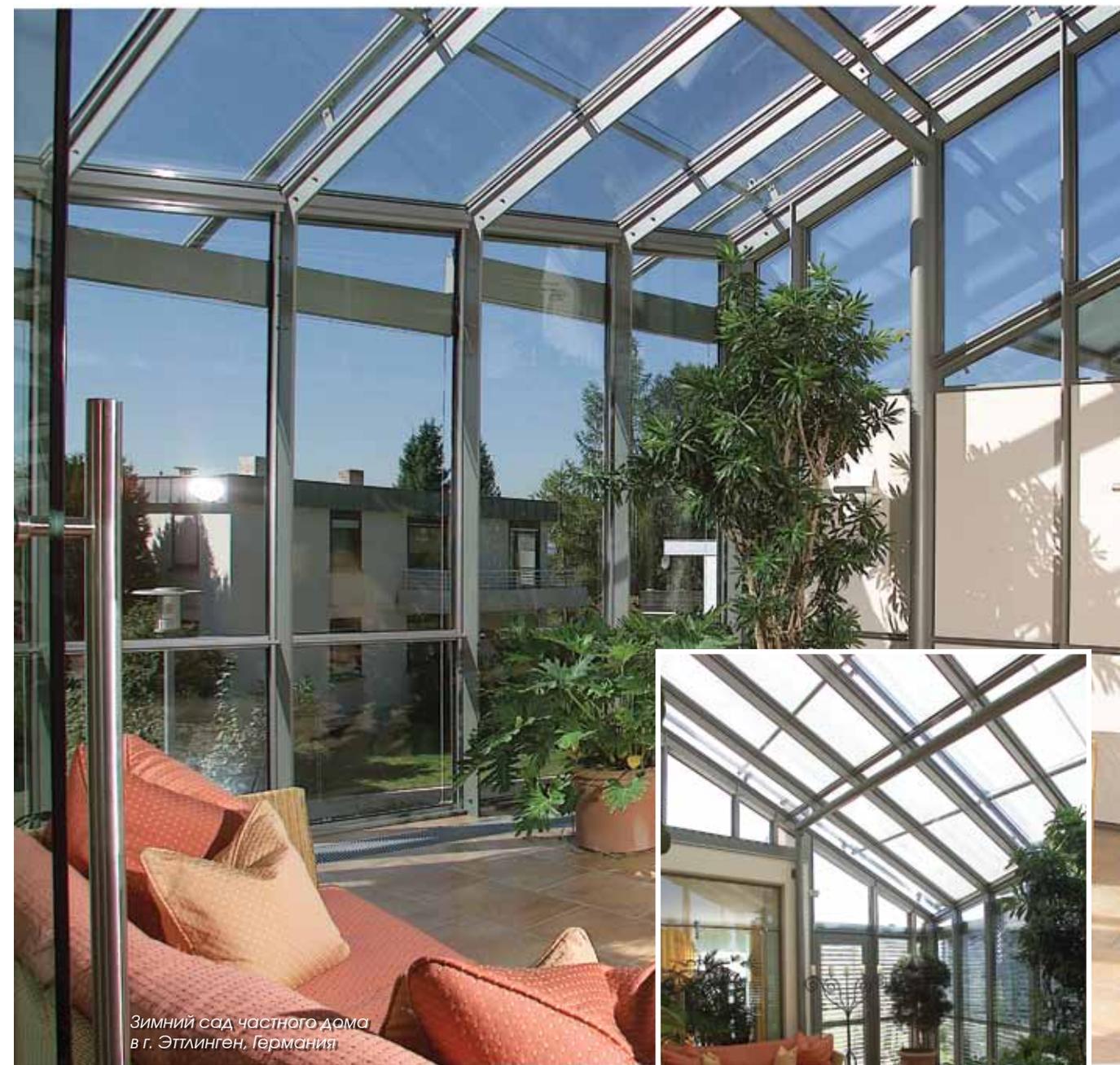


Рис. 3.2.3.1а.
Современные архитектурные решения светопрозрачных кровель. Скатные кровли зимних садов с большим уклоном



Светопрозрачное покрытие атриума офисного здания компании EON, г. Дюссельдорф, Германия. Арх. проф. Унгерс (Кельн)

Рис. 3.2.3.1б.

Современные архитектурные решения светопрозрачных кровель. Малоуклонные (плоские) большепролётные светопрозрачные покрытия гражданских зданий

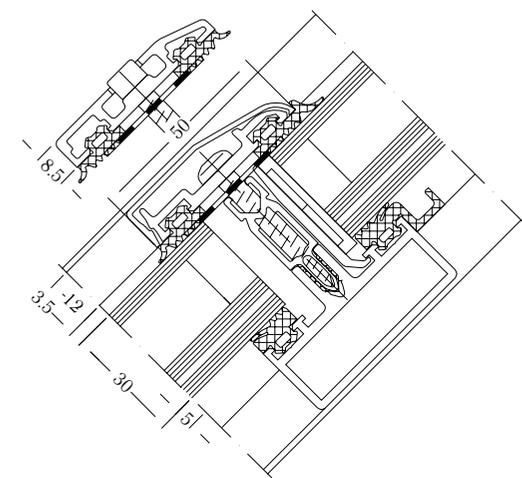
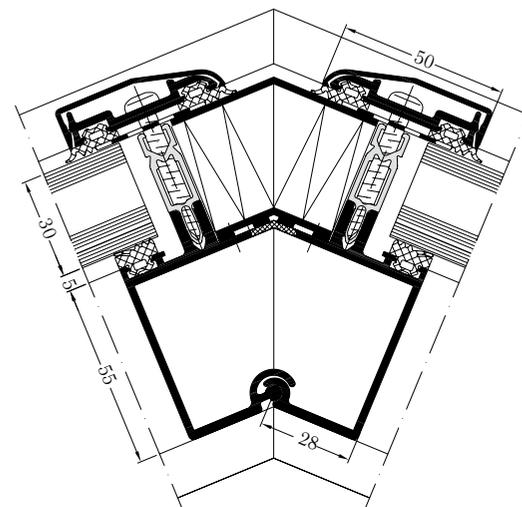


Рис. 3.2.3.2.

Конструктивные решения профильных систем для светопрозрачных кровель. Система Schüco SMC 50



ризонгальной составляющей нагрузки; основное опирание стеклопакета осуществляется внизу, а наиболее нагруженным элементом становится нижний ригель.

По сравнению с навесными фасадными оболочками, выбор схемы опирания ригелей и построение общей расчётной схемы светопрозрачного кровельного покрытия, часто является гораздо более сложной задачей в силу жёсткой привязки к существующим несущим конструкциям. В зависимости от их расположения, опорные кровельные ригели могут непосредственно закрепляться на несущих конструкциях покрытия по всей длине (накладные ригели) или опираться в нескольких точках по схеме шарнирной балки аналогично стоечно-ригельным фасадам (рис. 3.2.3.4). В этом случае несущие профильные элементы будут работать как прогоны, укладываемые на несущие конструкции (балки, фермы, структурные пространственные системы).

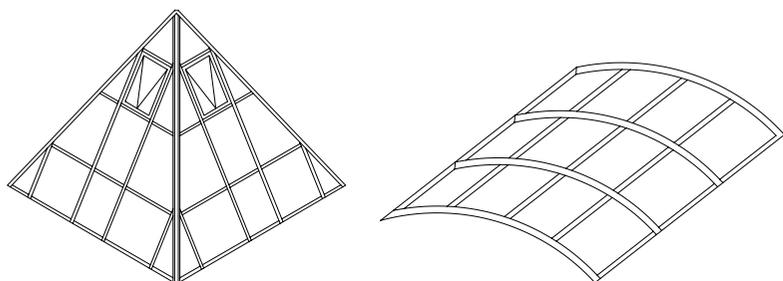


Рис. 3.2.3.3.

Открывающееся окно в светопрозрачной кровле. Система Schüco AWS 57 RO

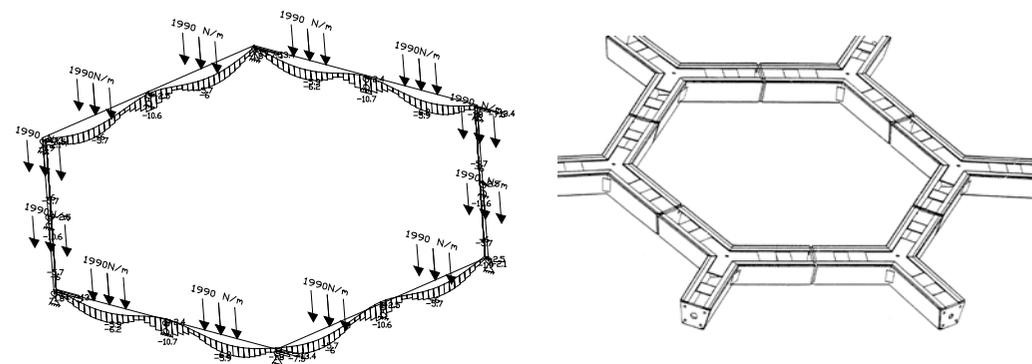


Рис. 3.2.3.4.

Расчётная схема опирания кровельных ригелей на шестигранные несущие конструкции купола Фуллера при реконструкции светопрозрачного покрытия служебного здания МИД РФ

3.2.4. Профильные системы из стали

В настоящее время, наряду с профильными системами из алюминиевых сплавов, все более широкое применение в светопрозрачных фасадах и кровлях находят профильные системы из окрашенной и нержавеющей стали. Благодаря более высоким прочностным характеристикам стали, по сравнению с алюминием, стальные профильные элементы имеют относительно небольшие сечения, в общей композиции фасадной оболочки выглядят зрительно лёгкими и изящными (рис. 3.2.4.1).

Сталь прочна и устойчива к механическим повреждениям, имеет гораздо более низкие по сравнению с алюминием коэффициенты теплопроводности и температурного расширения. При применении в большепролётных светопрозрачных кровлях, не возникает

Рис. 3.2.4.1.

Здания со светопрозрачными фасадами и кровлями на основе стальных профильных систем.

Стальная фасадная профильная Schüco Jansen VISS

опасности электрохимической коррозии (см. раздел 2.1) и значительных по величине температурных напряжений в светопрозрачной оболочке, вследствие разницы характеристик материалов несущих конструкций и профильной системы. Важным преимуществом стальных систем является возможность сварки профильных элементов, за счёт чего появляется возможность проектирования расчётных схем на основе жёстких рамных элементов (рис. 3.2.4.2).

Все это делает профильные системы из стали привлекательными для проектирования светопрозрачных оболочек, обладающих высокой пространственной жёсткостью, для применения в ответственных сооружениях — на объектах с интенсивным людским потоком, в промышленных сооружениях, школах и больницах, спортивных и развлекательных комплексах, вокзалах и аэропортах.



Стадион в г. Линц, Австрия,
арх. бюро Hinterwirth Architekten
Ziviltechniker OG (г. Гмунден, Австрия)



Апартаменты
в г. Лейпциг, Германия, арх. бюро
Gregor Fuchshuber und Partner



Центр «Подводный мир»,
г. Шремс, Австрия, арх. бюро AHS
ARCHITEKTEN ZT GmbH (Австрия)

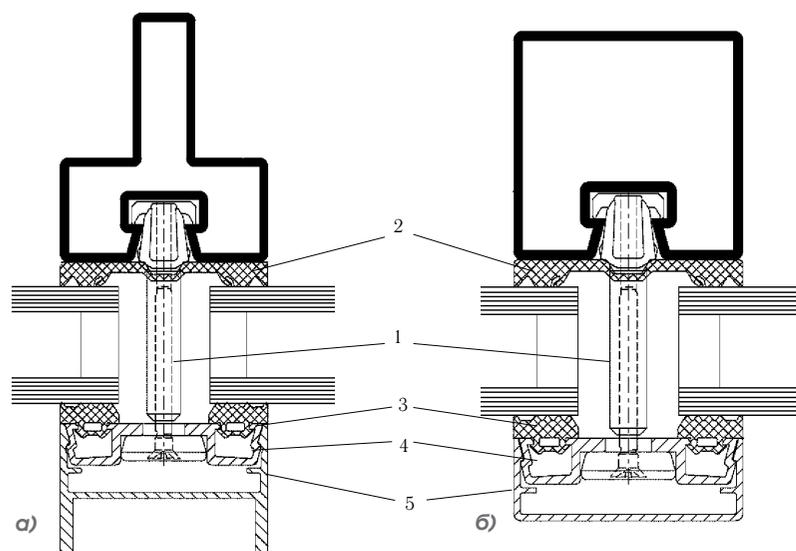


Рис. 3.2.4.2.

а) Фасадная система Schüco Jansen VISS TV с фигурной стойкой

б) Фасадная система Schüco Jansen VISS TV со стандартной стойкой

1 — изоляционная кнопка; 2 — внутреннее уплотнение; 3 — наружное уплотнение; 4 — прижимной профиль; 5 — декоративная крышка

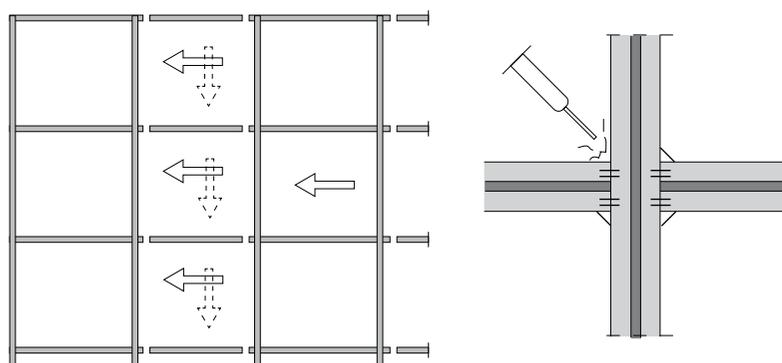


Рис. 3.2.4.3.

Соединение стоек и ригелей стальной профильной системы в единую жёсткую раму при помощи сварки

3.3. Элементы дополнительной солнцезащиты

При наличии широкого спектра технических возможностей, связанных с формированием микроклимата помещений за остеклёнными стенами и реализуемых сегодня на стадии производства и обработки стекла (см. раздел 2.2.8), при проектировании светопрозрачной оболочки здания необходимо понимать, что эти возможности пока ещё далеко не безграничны. Как отдельная стеклянная пластина, так и стеклопакет, пока ещё не стали технологическим чудом, позволяющим обеспечить уровень защиты внутреннего пространства здания от внешних факторов, адекватный наружным стенам из непрозрачных строительных материалов.

Так, далее в настоящей работе (см. главу 4) будет подробно показано, что наиболее проблемным вопросом при проектировании светопрозрачных конструкций и помещений за остеклёнными ограждениями, является летний эксплуатационный режим, когда конструкции остекления подвергаются мощному воздействию коротковолнового теплового излучения Солнца. В настоящее время у европейских строительных инженеров и архитекторов существует достаточное понимание того, что проблема перегрева остеклённых помещений, вызываемая сложными процессами теплообмена, рассмотренными в разделе 4.1.3, в большинстве случаев не может быть эффективно решена в рамках конструктивных возможностей остекления, ограниченных использованием различных солнцезащитных стёкол и их комбинаций.

Наряду со сложностью нестационарных процессов теплообмена через остекление в летнее время, задача дополнительно осложняется высокой чувствительностью тонких стеклянных пластин к воздействию температур. Из материалов раздела 2.2.8, нетрудно увидеть, что доля поглощаемой тепловой энергии Солнца в диапазоне ближнего ИК излучения весьма высока для всех солнцезащитных стёкол, независимо от технологии изготовления. И как показывает опыт экспертных обследований, кратко рассмотренный в разделе 4.7, создание какого-либо препятствия для мощного теплового

излучения Солнца в виде экрана, функционально совмещаемого со стеклянной пластиной (окрашенное в массу солнцезащитное стекло, нанесение покрытия из оксидов металлов, наклеивание плёнки), неизбежно связано с риском возникновения в стекле неравномерных и труднопрогнозируемых температурных напряжений, вызываемых эффектом поглощения оксидами металлов коротковолнового солнечного тепла.

Дополнительное затенение фасада современными солнцезащитными устройствами, позволяет обеспечить не только возможность регулируемого поступления солнечного тепла в помещение, но и решить такие принципиальные задачи, как повышение общей внешней эстетики сооружения и обеспечение более мягкого температурного режима эксплуатации наружного стекла за счёт снижения и выравнивания напряжений, вызванных воздействием высоких летних температур.

Зарождение идеи дополнительного затенения оконных проёмов в жарком климате относится к Древней Греции, где впервые были применены ставни. А выход систем солнцезащиты на уровень промышленного производства традиционно связывается с именем американского промышленника Джона Хэмптона, который в июле 1841 года запатентовал производство жалюзей.

В современной строительной практике под общим термином «системы дополнительной солнцезащиты» понимаются устройства или конструктивные средства защиты зданий и сооружений от негативного воздействия инсоляции (прямые солнечные лучи), вызывающего перегрев помещений или ослепление находящихся в нём людей отражённым светом (от поверхности водоёма, зеркального остекления соседнего здания и т.д.).

При возведении современных зданий со светопрозрачными фасадами, как правило, используются два основных принципа устройства солнцезащиты, которые могут быть условно определены по месту расположения солнцезащитных устройств (экранов) в здании. А именно: 1) внутренняя солнцезащита; 2) наружная солнцезащита. Расположение солнцезащитных устройств оказывает существенное влияние на эффективность защиты помещения



от теплового воздействия инсоляции, что определяется характером процессов теплообмена, происходящих при действии солнечного излучения в системе стеклопакет + солнцезащитный экран, подробно рассмотренных в разделе 4.1.3.

Как показывает практический опыт, относительно простые и дешёвые решения внутренней солнцезащиты, традиционно используемые в российских зданиях (рис. 3.3.1), являются наименее эффективными как с точки зрения защиты от перегрева помещений, так и непосредственно конструкций остекления (см. раздел 4.1.3). К солнцезащитным устройствам такого типа относятся различные типы штор, жалюзи и маркиз, изготавливаемых на основе прочных тканевых материалов, устойчивых к воздействию УФ или тонких ламелей из ПВХ или алюминия.

Управление внутренними солнцезащитными экранами (открытие-закрывание) чаще всего осуществляется децентрализованно за счёт ручных или электрических приводов пользователем конкретного помещения в зависимости от его субъективных ощущений на протяжении суток. В относительно небольших остеклённых помещениях кафе или зимних садов такой подход является достаточно оправданным, позволяя мобильно изменять не только условия микроклимата, но и интерьер в зависимости от времени суток и пожеланий пользователя (рис. 3.3.2). Однако при больших площадях фасадного остекления, особенно в офисных зданиях, возможность произвольного закрытия внутренних штор и жалюзи приводит к потере зрительной лёгкости и прозрачности; теряется строгость форм и единство стиля (см. рис. 3.3.1).

Гораздо больше архитектурных, композиционных и функциональных возможностей создаёт применение систем наружной солнцезащиты, предлагаемых в широком конструктивном ассортименте многочисленными производителями по всему миру. Разнообразие дизайнерских и конструктивных решений систем наружной солнцезащиты настолько велико, что их применение для каждого строительного объекта представляет собой фактически индивидуальный проект. Поэтому в настоящем разделе имеет смысл привести некоторую общую классификацию, проиллюстрированную примерами

Рис. 3.3.1.
Общий вид административно-офисного здания с полностью остеклёнными фасадами и внутренней солнцезащитой, г. Москва



включения солнцезащитных устройств в архитектурный облик здания, а также проанализировать целесообразность использования этих систем в различных климатических районах РФ.

Наиболее простым вариантом наружной солнцезащиты являются так называемые **пассивные системы**, жёстко закрепляемые на фасадах здания с отсутствием какой-либо функции управления. Конструкции такого типа, представляющие собой крупногабаритные козырьки и экраны хорошо знакомы отечественным инженерам и архитекторам, имеющим опыт проектирования на территории жарких климатических зон бывшего СССР (Узбекистан, Таджикистан и др.). В современных фасадных технологиях элементы пассивной солнцезащиты, как правило, проектируются в виде ламельных систем с вертикальным или горизонтальным расположением ламелей, выполняемых из тонкостенных алюминиевых профилей или солнцезащитного стекла. В зависимости от конструктивного решения фасада, ламели пассивной солнцезащиты неподвижно закрепляются на несущих конструкциях или элементах профильной системы (рис. 3.3.3).

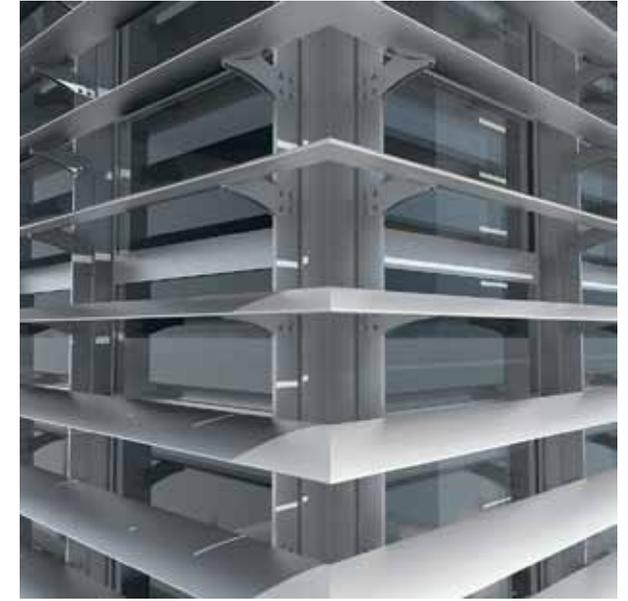
Помимо основного критерия снижения теплового воздействия инсоляции, методика расчёта которого рассмотрена в разделе 4.1.3, ламельные системы наружной солнцезащиты должны быть рассчитаны на действие ветровой нагрузки и собственного веса. Прочностные



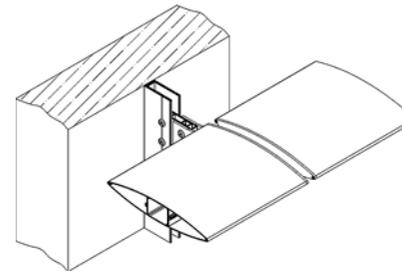
Рис.3.3.2.

Варианты конструктивных решений внутренних солнцезащитных устройств помещений кафе и бассейна

а)



б)



в)

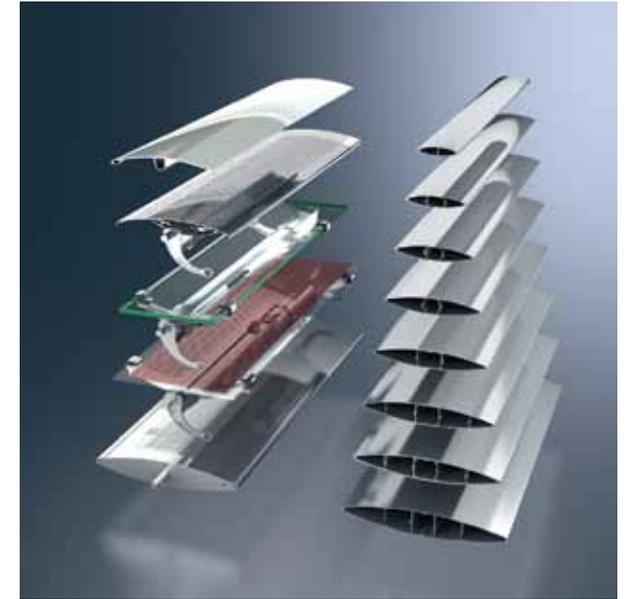


Рис.3.3.3.

Варианты закрепления ламелей пассивной солнцезащиты Schüco ALB

а) на элементах профильной фасадной системы

б) на несущих конструкциях здания.

в) виды ламелей Schüco ALB

свойства ламелей определяются из условия равномерно нагружаемой однопролётной балки на двух опорах с закреплением, приближённо принимаемым в расчётах по схеме жёсткой заделки.

Согласно европейскому нормативу DIN EN 13659, расчётное значение ветровой нагрузки, действующей на ламельные системы, принимается с повышающим коэффициентом надёжности $\gamma = 1,5$ (см. также раздел 4.4 – ветровые нагрузки) по условию недопустимости потери экраном функциональных свойств (избыточных прогибов или выгиба ламелей из плоскости), разрушения экрана и падения его отдельных частей вниз.

Системы пассивной солнцезащиты относительно недороги с точки зрения единовременных затрат. Однако фиксированное расположение экрана, существенно ограничивает эффективность использования наружной солнцезащиты, не только по отношению к углу падения прямых солнечных лучей на фасад здания в разное время суток, но и непосредственно с точки зрения полезной функциональной нагрузки.

В частности, среди российских инженеров существует устойчивое убеждение о бесполезности применения солнцезащитных устройств на средних и северных широтах. Вместе с тем, общеизвестно, что прямые солнечные лучи от низкого солнца, падающие практически под прямым углом на здания в течение полярного дня на широтах севернее С-Петербурга, вызывают не меньший тепловой дискомфорт, чем лучи высокостоящего солнца, скользящие по фасаду в южных широтах (рис. 3.3.4). Основной проблемой проектирования, в данном случае, является относительно короткий временной этап в годовом цикле эксплуатации здания, когда солнцезащита необходима. Очевидно, что ее наличие в зимнее время в указанных регионах, нежелательно не только с точки зрения потерь естественной освещённости, но и эксплуатационных проблем, связанных со снеговой нагрузкой и обледенением.

Обозначенные проблемы решаются при использовании так называемых систем **активной солнцезащиты**. Принципиальным отличием таких систем является наличие автоматизированного управления, позволяющего изменять функциональные свойства

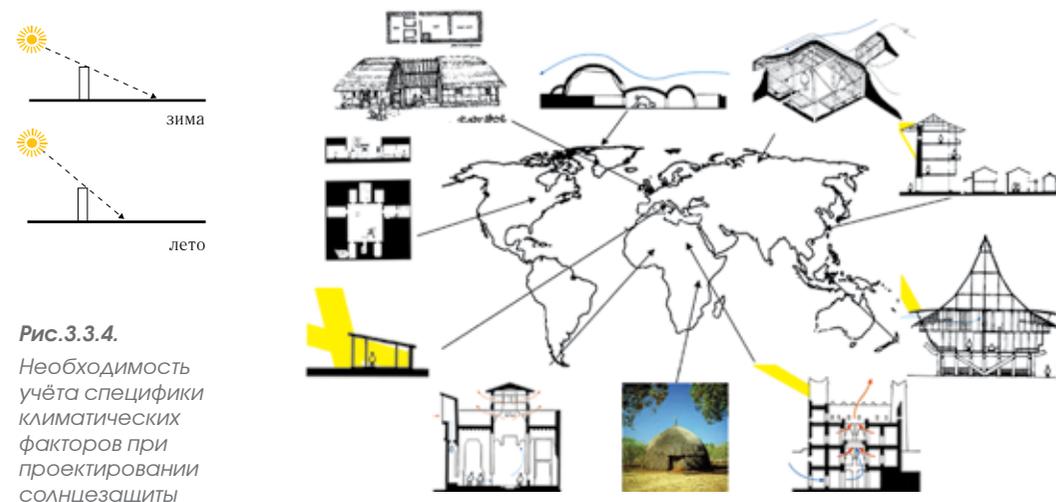


Рис. 3.3.4.
Необходимость учёта специфики климатических факторов при проектировании солнцезащиты

экрана, или полностью убирать его с фасада здания при кратковременном или длительном изменении погодных условий.

Наименьшей мобильностью обладают ламельные системы, где основная функция автоматического управления заключается в регулировке угла наклона ламелей за счёт их поворота вокруг центральной оси при изменении угла падения солнечных лучей на фасад здания (положения солнца на небосводе) (рис. 3.3.5). В зависимости от архитектурно-конструктивного решения ламельного экрана, ось вращения ламелей может быть соответственно горизонтальной и вертикальной.

Гораздо более мобильными являются автоматически управляемые системы активной наружной солнцезащиты рулонного типа, к которым традиционно относят полностью сворачивающиеся рулонные жалюзи (рольставни) и вертикальные маркизы (рис. 3.3.7). Рулонные конструкции могут полностью сворачиваться при получении соответствующего сигнала с наружной метеостанции, устанавливаемой на здании, и оборудуемой датчиками дождя, ветра и температуры.

При сильном штормовом ветре срабатывает аварийный сигнал, и привод сворачивает и убирает в короб жалюзи. Стопорный электропривод, устанавливаемый в системах такого типа срабатывает



а)

Рис.3.3.5.

Системы активной солнцезащиты с автоматически управляемым углом наклона ламелей вокруг горизонтальной оси при изменении положения солнца. Системы Schüco ALB. Ламели с интегрированными фотогальваническими модулями.

а) закрепление ламели на центральной оси вращения;

б) управление при помощи скрытого электрического привода, монтируемого внутри стойки профильной системы



б)

Рис.3.3.6.

Системы активной солнцезащиты Schüco ALB с поворотными ламелями как выразительный элемент архитектурной композиции



Административное здание,
г. Стокгольм, Швеция,
арх. бюро Reflex Arkitekter AB



Спа-комплекс в г. Тиволи, Италия, арх. бюро
3C+T Studio Associato Capolati Cavalli

при низкой температуре рабочего воздуха при получении сигнала с датчика температуры и позволяет избежать повреждения экрана в сильные морозы при непроизвольном использовании.

Помимо высокой функциональной гибкости и адаптируемости, рулонные системы активной солнцезащиты, обладают широким спектром архитектурно-дизайнерских и конструктивных возможностей. Так системы наружной солнцезащиты Schüco СТВ (рис.3.3.8), характеризуются не только запатентованной каплевидной формой анодированной алюминиевой микроламели, обеспечивающей эффективное затенение даже от низкого солнца, но и специфической конструкцией короба, с возможностью скрытого расположения в уровне междуэтажных перекрытий в зданиях с панорамным остеклением на всю высоту этажа.

Рис.3.3.7.

Общий вид здания наружными солнцезащитными жалюзи в полностью закрытом положении



Рис.3.3.8.

а) каплевидная форма микроламелей Schüco СТВ

б) Автоматически управляемая наружная солнцезащита Schüco СТВ, интегрированная в конструкцию фасада в зоне междуэтажного перекрытия

в) Общий вид ламелей Schüco СТВ и фасада Schüco FW 50+ с частично закрытыми рулонными экранами с навесной конструкцией короба, визуально выступающего за плоскость фасада





Здание телецентра «Останкино», Москва 1964–1970 гг.
Арх. Баталов Л.И., инж. — Ренард Б.Б., Гиршгорн С.О.

Нагрузки и воздействия на светопрозрачные наружные оболочки зданий и сооружений. Формирование микроклимата помещений и напряжённого состояния ограждающих конструкций

- 4.1. Специфика энергообмена через остекление. Селективное пропускание излучения. Формирование микроклимата за остеклёнными ограждениями.
- 4.2. Воздействие внешнего шума на светопрозрачные фасады. Звукоизоляционные характеристики светопрозрачных конструкций.
- 4.3. Климатические нагрузки от перепадов давлений и температур в стеклопакетах.
- 4.4. Ветровые нагрузки
- 4.5. Снеговые нагрузки
- 4.6. Эксплуатационные и аварийные нагрузки
- 4.7. Расчётные схемы и пространственная работа стеклопакетов. Формирование напряжённого состояния стеклянных пластин. Разрушение стекла

Here is a systematized theoretical review of special loads, which must be considered while constructing a building with a light transparent envelope. It's based on the complex analysis of the foreign normative documents and the author's expert experience and research projects for more than 10-years of Russian "glass architecture" history. This includes such aspects as: the energy exchange through the glazing in winter and summer period, sound insulation, internal (climate) loads in IGU's, wind and snow loads. The aspects of fire protection and exploitation security of glass envelopes are also considered. A special attention is spared for the load combinations and glass breakage conditions, including the structural glazing.

Введение

Здания и сооружения с полностью остеклёнными стенами и кровлей подвержены действию всех природных и техногенных факторов, аналогичных традиционным зданиям, доля наружного остекления которых ограничивается стандартными оконными проёмами. Вместе с тем, здания такого типа имеют определённую специфику с точки зрения восприятия действующих нагрузок и формирования напряжённого состояния в конструкциях наружной оболочки.

В этом контексте наиболее правильно рассматривать некоторую группу дополнительных нагрузок и их сочетаний, имеющих место в зданиях со светопрозрачными фасадами и/или большепролётными светопрозрачными кровлями, и в целом не характерных для традиционных зданий или же проявляющихся в них локально без риска потери эксплуатационных свойств или несущей способности. Очевидно, что это утверждение относится в первую очередь к элементам оконных конструкций, незначительного по площади панорамного остекления и т.п.

Принципиальным отличием вышеупомянутых зданий от традиционных строительных систем является наличие некоторой сплошной светопрозрачной оболочки фасада и (или) кровли, формируемой из отдельных конструктивных элементов. К основным дополнительным нагрузкам, возникающим в таких сооружениях, относятся:

1. Климатические нагрузки от перепадов давлений и температур в герметичных стеклопакетах, переменные по знаку (зима-лето) и во времени, определяющие начальное напряжённое состояние стёкол пакета с момента его монтажа на объекте, а также разрушающие циклические напряжения в краевой зоне стеклопакета по контуру герметизации.

2. Прерывистые, изменяемые во времени, пульсационные ветровые нагрузки, сочетаемые с ростом микротрещин, вследствие поверхностной коррозии стекла.

3. Ураганные ветровые нагрузки кратковременного характера, приводящие к мгновенному разрушению стеклянных пластин и узлов креплений конструктивных элементов наружной оболочки.

4. Трудно прогнозируемые температурные напряжения в стержневых профильных элементах сложного сечения, образующих светопрозрачную оболочку.

5. Снеговая нагрузка и обледенение, вызывающие кратковременную частичную потерю функции естественной освещённости, обеспечиваемую светопрозрачным покрытием в зимний период.

6. Дополнительные температурные напряжения в стеклянных пластинах, возникающие вследствие селективного пропускания стеклом различных видов теплового излучения.

7. Быстроизменяемые во времени температурные напряжения в стеклянных пластинах, возникающие вследствие специфических физико-химических свойств стекла (резкое нагревание-охлаждение — термоудар и неравномерное нагревание стекла).

8. Труднопрогнозируемые локальные разрушающие напряжения в стеклянных пластинах, вызываемые технологическими дефектами стекла.

Несмотря на то, что на территории РФ уже возведено и эксплуатируется достаточное количество зданий с полностью светопрозрачными фасадами, а также атриумных зданий с большепролётными светопрозрачными покрытиями, по состоянию на сегодняшний день ни одна из перечисленных нагрузок не отражена в действующих отечественных нормативных документах на проектирование зданий, сооружений и их конструкций (СНиП). Имеющаяся российская нормативная база на светопрозрачные конструкции ограничена весьма малым перечнем государственных промышленных стандартов (ГОСТ) на оконные блоки и комплектующие.

Здесь нужно отметить, что при гораздо более длительном опыте возведения зданий со светопрозрачными конструкциями большой площади в США и Европе, аналогичная ситуация наблюдается и в нормативных документах этих стран. Так, в частности в [36] отмечается: «Необходимо понимать разницу между строительными изделиями и строительными конструкциями... Каждая страна пользуется национальными или европейскими стандартами, регламентирующие требования к изделиям. Так, например, стандарт EN 572 определяет требования к флоат-стеклу,

EN 12150 — к закалённому стеклу, EN 1863 — к термоупроченному стеклу и EN ISO 12543 — к ламинированному безопасному стеклу. В этих документах определены требования к процессу производства, размерам и допускам, а также к таким характеристикам изделия как, например, механическая прочность. Соответствие изделия стандарту должно быть подтверждено декларацией производителя или сертификатом соответствия аккредитованного центра. В европейской экономической зоне это обозначается маркировкой CE.

Под требованиями к строительной конструкции мы понимаем обеспечение необходимых условий монтажа и эксплуатации. В Европе не существует нормативных документов, регламентирующих подобные требования для строительных конструкций из стекла. А также документов, регламентирующих требования к проектированию и методам расчёта таких конструкций. Существует только несколько стандартов на национальном уровне. В Германии просто пользуются нормативами на вентилируемые фасады, а также нормами на безопасное остекление (TRLV и TRAV)».

Таким образом, мы можем увидеть очевидную необходимость в систематизации факторов, определяющих как непосредственно работу светопрозрачных оболочек, так и общие показатели надёжности и долговечности конструктивных схем зданий со светопрозрачными фасадами и кровлями. Это в свою очередь, не может быть сделано без относительно подробного описания физических процессов и явлений, имеющих место в светопрозрачной оболочке, и определяющих поведение конструкций при действии различных нагрузок, а также их сочетаний.

4.1. Специфика энергообмена через остекление. Формирование микроклимата за остеклёнными ограждениями

Уникальным свойством традиционного в бытовом понимании стекла, отличающим его от других строительных материалов, является прозрачность в видимом диапазоне спектра и селективное пропускание в других участках оптического диапазона. Для строительного проектирования в этом отношении наиболее важен учёт спектра излучения Солнца, а также спектра теплового излучения внутренних элементов здания. Взаимодействие указанных видов излучения является одним из ключевых факторов, определяющих принципиальное отличие зданий с большими площадями наружного остекления от традиционных зданий и ограждающих конструкций.

Несмотря на достаточный исторический опыт, кратко проанализированный в главе 1, и указывающий на постоянную эволюцию архитектурных и конструктивных решений зданий подобного типа, однозначное решение проблемы комфортности микроклимата помещений, располагаемых за светопрозрачными наружными ограждениями большой площади, не найдено до настоящего времени.

Определённую негативную роль в этом смысле, применительно к российским условиям, играет узкое понимание европейских концепций энергоэффективности (см. главу 5), в основном сводимое к общим количественным показателям энергетического баланса зданий и теплозащитных качеств конструкций. Тем не менее, как показывают результаты опросов, большинство людей в нашей стране, работающих в административных зданиях с остекленными фасадами или проживающих в квартирах с панорамным остеклением, почти круглогодично испытывают существенный дискомфорт, с связанным ощущением «холодной радиации» от стеклянных стен зимой и явлением «парникового эффекта» в летнее время.

Наиболее остро этот фактор проявился в условиях аномально жаркого лета 2010 года, поставившего перед российскими инженерами огромное количество вопросов, связанных с особенностями эксплуатации зданий в условиях высоких летних температур и, как

показывает мировой опыт, наиболее трудно решаемых для помещений за остеклёнными наружными ограждениями.

Наряду с проблемой перегрева помещения и очевидной неприменимостью теории теплоустойчивости, используемой для оценки летнего температурного режима непрозрачных ограждающих конструкций, в данном случае возникает необходимость учёта высокой чувствительности стеклянных пластин к воздействию температур с возникновением трудно прогнозируемых разрушающих напряжений и деформаций (см. разделы 2.2 и 4.7). Иными словами, — как нигде ещё в строительстве, мы можем увидеть очень тесную взаимосвязь процессов теплообмена, рассматриваемых в разделах строительной физики, и прочностных свойств конструкций, традиционно относимых к областям строительной механики, теории упругости и сопромата. Таким образом, применительно к светопрозрачным конструкциям, задачи и методы строительной физики, выходя за свои стереотипные рамки, и непосредственно связываются с прогнозированием механизмов разрушения стеклянных пластин и изготавливаемых из них стеклопакетов. В этом контексте необходимо также отметить сложность прогнозирования температурных напряжений и в стержневых профильных элементах сложного сечения с многокамерной структурой (см. раздел 3.2), обеспечивающих общую деформационную устойчивость светопрозрачной оболочки.

4.1.1. Земля и солнечная энергия. Энергообмен здания и наружной среды через светопрозрачные конструкции. Селективное пропускание излучения

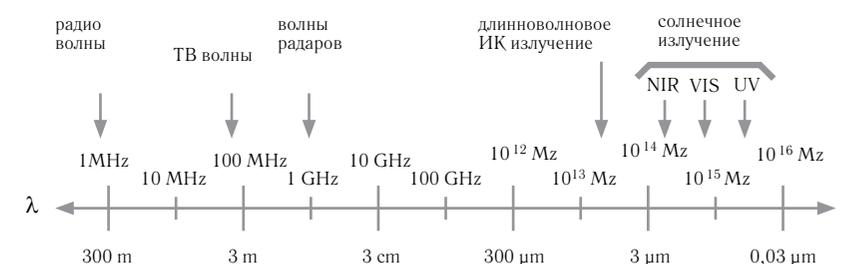
Для построения физической модели, корректно учитывающей условия проектирования светопрозрачных конструкций как потенциального барьера для различных видов электромагнитной энергии, необходимо, прежде всего, проанализировать общие физические процессы взаимодействия здания, находящегося на поверхности Земли,

на некоторой географической широте, и Солнца, являющегося одним из основных природных источников излучения световой энергии.

Известно, что в природном энергообмене лучеиспускание свойственно всем телам. При этом лучистая энергия, возникающая в теле, и соответственно, длины излучаемых волн, определяются его температурой. Классификация видов излучения, принципиально важных для рассмотрения в строительной технике, по длине волны может быть представлена в виде табл. 4.1.1.1.

Табл. 4.1.1.1

Распределение электромагнитного излучения по длинам волн



(NIR — коротковолновое ИК излучение; VIS — видимый свет; UV — ультрафиолетовое излучение)

	Длина волны		
	мм	мкм	нм
Рентгеновские лучи	$10^{-9} \dots 2 \cdot 10^{-5}$	$10^{-6} \dots 0,02$	$10^{-3} \dots 20$
Ультрафиолетовые лучи	$2 \cdot 10^{-5} \dots 0,4 \cdot 10^{-3}$	$0,02 \dots 0,4$	$20 \dots 400$
Видимые (световые) лучи	$(0,4 \dots 0,78) \cdot 10^{-3}$	$0,4 \dots 0,78$	$400 \dots 780$
ИК излучение (тепловые лучи)	$0,78 \cdot 10^{-3} \dots 0,8$	$0,78 \dots 800$	$780 \dots 80 \cdot 10^4$
Электромагнитные волны	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^{11}$

Границы по длинам волн (частотам) между различными видами электромагнитного излучения весьма условны — последовательные участки шкалы непрерывно переходят друг в друга. Так коротковолновое ИК излучение Солнца (ближнее ИК-излучение), открытое в 1800 году английским астрономом Уильямом Гершелем, очень похоже на видимый свет и регистрируется такими же инструментами. Качественно различные свойства имеют электромагнитные излучения, частоты которых отличаются на несколько порядков.

Солнце, согласно астрономической классификации, принадлежит к классу карликовых жёлтых звёзд и представляет собой сферическое тело диаметром $1,31 \times 10^6$ км, находящееся на расстоянии приблизительно 150×10^6 км от Земли. Энергия солнечного излучения определяется термоядерными реакциями и, по расчётам, составляет $3,8 \times 10^{23}$ кВт. С точки зрения теоретической физики, Солнце является абсолютно чёрным телом с температурой 5762 К, спектральная плотность излучения которого должна представлять из себя плавную кривую с максимальной длиной волны λ_m [мкм], определяемой согласно уравнению (4.1.1.1) как

$$\lambda_m = 2897 / T \quad (4.1.1.1)$$

где

T — абсолютная температура тела, К

Однако реальная зависимость имеет вид, представленный рис. 4.1.1. Вместо плавной кривой мы видим зависимость с большим количеством провалов, которые обусловлены полосами поглощения. Это поглощение связано с тем, что свет с поверхности Солнца должен пройти через солнечную и земную атмосферы, которые имеют достаточно сложные зависимости пропускания от длины волны. Так пропускание земной атмосферы обусловлено:

- а) поглощением и рассеиванием молекулами сухого воздуха и пылью;
- б) селективным поглощением водяным паром и углекислым газом;
- в) отражения и рассеиванием слоями облаков.

Согласно уравнению (4.1.1.1), наибольшая интенсивность энергии солнечного излучения поверхности Солнца с эффективной температурой около 5762 К, соответствует длине волны 0,55 мкм, т.е. видимой области спектра. Тепловое излучение Солнца, находится полностью в области коротких ИК волн с длиной до 2 мкм. Приблизительное процентное распределение энергии солнечного излучения по различным участкам спектра может быть проиллюстрировано табл. 4.1.1.2.

Средняя температура тел в земных условиях составляет порядка 290К (17 °С). При этой температуре максимум интенсивности излучения будет соответствовать длине волны в 10 мкм (см. рис. 4.1.1.1).

Светопроницаемые ограждающие конструкции зданий подвергаются воздействию излучения Солнца снаружи и теплового излучения от нагретых поверхностей помещения внутри. Обычное прозрачное стекло хорошо пропускает видимый свет и коротковолновое ИК излучение Солнца, при этом почти полностью поглощая жесткое УФ излучение. В тоже время стекло не пропускает тепловое излучение от нагретых поверхностей помещения. Длинноволновая граница пропускания стекла имеет значение 2,7 мкм.

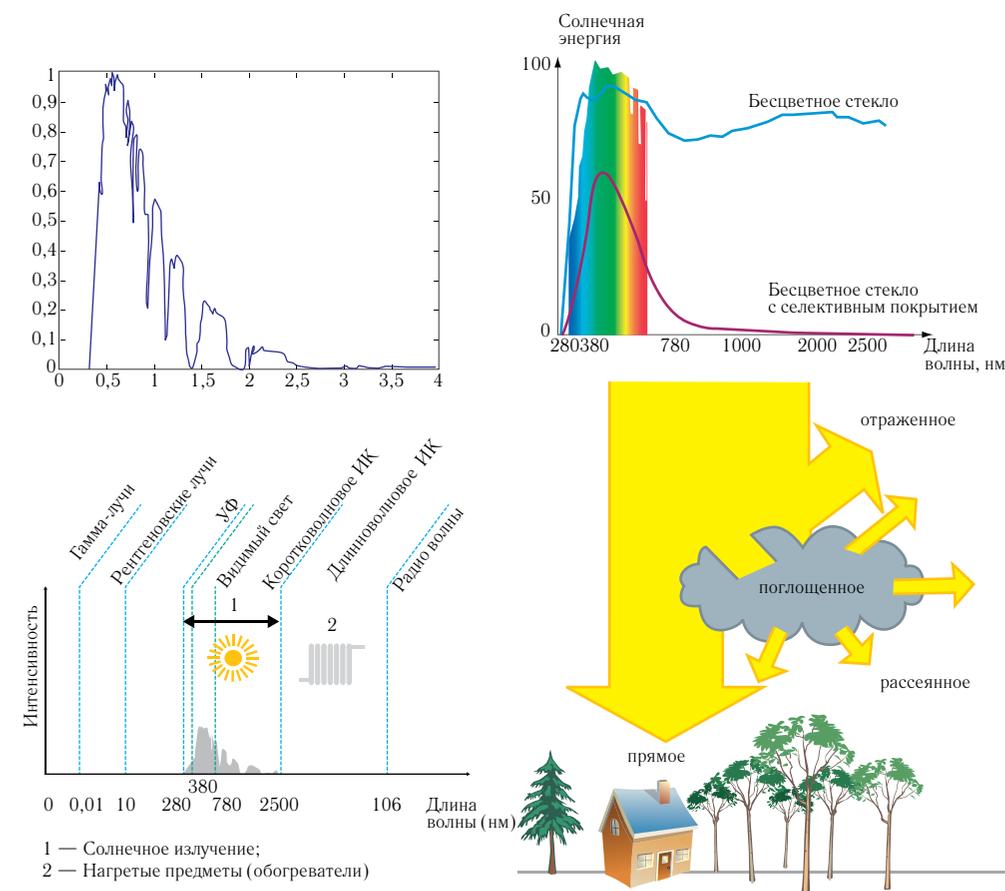


Рис. 4.1.1 Нормированная спектральная плотность излучения Солнца на поверхности Земли и сравнительные спектры излучения Солнца и земных тел

Табл. 4.1.1.2

Распределение энергии Солнца по спектру излучения

Спектр излучения	Длина волны, нм	Тепловая энергия, %
Ультрафиолет – УФ	< 380	1
Видимый спектр	380–760	53
Инфракрасное излучение –ИК	760–2500	46

Радиационная энергия Солнца в околоземном пространстве равна $1,353 \text{ кВт/м}^2$ ($4871 \text{ кДж/м}^2 \text{ час}$) и называется солнечной постоянной. За счёт поглощения солнечной энергии в земной атмосфере, теряется около 30%. Солнце расположено в одном из фокусов эллиптической орбиты Земли, вследствие чего расстояние между Землёй и Солнцем в течение года меняется от 147,117 млн. км (в перигелии) до 152,083 млн. км (в афелии). Из-за изменения расстояния между Землёй и Солнцем, в перигелии количество солнечной энергии, достигающей Земли, на 6,9% больше, чем в афелии. Поступающее на определённое место Земли солнечное излучение зависит от времени года и широты. Зависимость интенсивности солнечного излучения в ясные дни в зависимости от широты и времени года (для северных широт) показана на рис. 4.1.1.2. А в табл. 4.1.1.3 приведены данные по интенсивности солнечного облучения в районе г. Москвы (56 град. с.ш.).

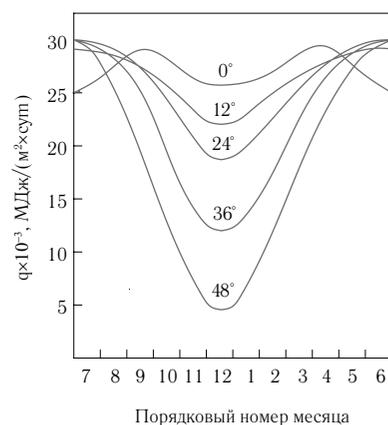


Рис. 4.1.1.2.
Интенсивность
солнечного из-
лучения в ясные
дни в зависи-
мости от широты
и месяца года.

Табл. 4.1.1.3

Суммарная солнечная радиация (прямая и рассеянная)
на горизонтальную поверхность при безоблачном небе
для г. Москвы (56 град. с.ш), МДж/м²
(согласно СНиП 23-01-99* «Строительная климатология»)

январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
113	220	467	650	840	873	875	695	486	267	127	84

На протяжении всего круглогодичного цикла эксплуатации здания солнечное излучение проникает в его внутреннее пространство через светопрозрачные конструкции. Количество проникающей в здание солнечной энергии зависит от географической широты местности, общей площади и ориентации светопроёмов по странам света, а также конструктивного решения остекления, адаптированного к решаемой задаче.

На территории стран с преобладающими северными широтами, к числу которых относится и Россия, основной акцент при проектировании ограждающих конструкций традиционно расставлялся на зимних условиях эксплуатации, когда через окна из внутреннего пространства здания происходят потери тепла за счёт длинноволнового теплового излучения. Фактор перегрева помещений зданий, возводимых в средних широтах, за счёт воздействия прямого солнечного излучения (инсоляции) традиционно рассматривался в отечественной строительной практике как незначительный.

Как уже отмечалось выше, появление в нашей стране большого количества зданий с панорамным фасадным остеклением и светопрозрачными кровлями, наряду с климатическими изменениями, определяют необходимость корректировки сложившихся подходов к анализу теплового режима зданий, возводимых в Центральной России. Проектирование необходимо вести с учётом круглогодичного цикла эксплуатации в условиях резко континентального климата — с возможными экстремально высокими температурами летом и, соответственно — экстремально низкими зимой. Очевидно,

что подобная задача является непростой уже на уровне традиционных жилых и административных зданий с относительно небольшой долей наружного остекления. Соответственно, применительно к зданиям со светопрозрачными конструкциями большой площади, её сложность повышается на порядок.

При проектировании светопрозрачных ограждений в строительной технике принято рассматривать четыре аспекта, связанных с воздействием оптического излучения на микроклимат зданий и отдельных помещений, и характеризующих оптическую работу остекления в различных участках спектра.

1. Естественное освещение помещений рассеянным (диффузным) солнечным светом, отраженным от небосвода (в видимом спектре).
2. Теплопотери из помещения (на протяжении отопительного периода) в окружающую среду за счет длинноволнового ИК излучения через остекление.
3. Перегрев помещений за счет воздействия прямого солнечного излучения
4. Инсоляция — облучение помещений прямыми солнечными лучами с спектром УФ.

Поскольку УФ излучение занимает незначительную долю энергии, излучаемой Солнцем (см. табл. 4.1.1.2), и совсем не присутствует в спектре излучения внутренних поверхностей помещения, рассмотрение его в строительных расчетах имеет практическое значение только для помещений специального назначения (в основном — медицинских учреждений), а также зимних садов.

Таким образом, основной задачей проектирования оптических характеристик остекления является круглогодичное обеспечение его оптимальной работы в видимом и ИК участках спектра в соответствии с заданными условиями для конкретного помещения.

Оптическая работа листового стекла и стеклопакетов под действием солнечного излучения в различных спектральных диапазонах характеризуется уравнением распределения излучения в видимом и инфракрасном участке спектра, отражающим закон сохранения энергии и записываемом, согласно европейским нормативным

документам, соответственно — в форме (4.1.1.2a) для видимой области спектра и в форме (4.1.1.2б) — для коротковолновой ИК области.

Общая схема прохождения излучения через остекление может быть проиллюстрирована рис. 4.1.2.1.

$$\tau_v + \rho_v + \alpha_v = 1 \quad (4.1.1.2a)$$

где

τ_v — коэффициент пропускания в видимой части спектра (в отечественных нормативных документах — τ_1);

ρ_v — коэффициент отражения в видимой части спектра;

α_v — коэффициент поглощения в видимой части спектра;

$$\tau_e + \rho_e + \alpha_e = 1 \quad (4.1.1.2б)$$

где

τ_e — коэффициент пропускания прямого солнечного излучения;

ρ_e — коэффициент отражения прямого солнечного излучения;

α_e — коэффициент общего поглощения прямого солнечного излучения.

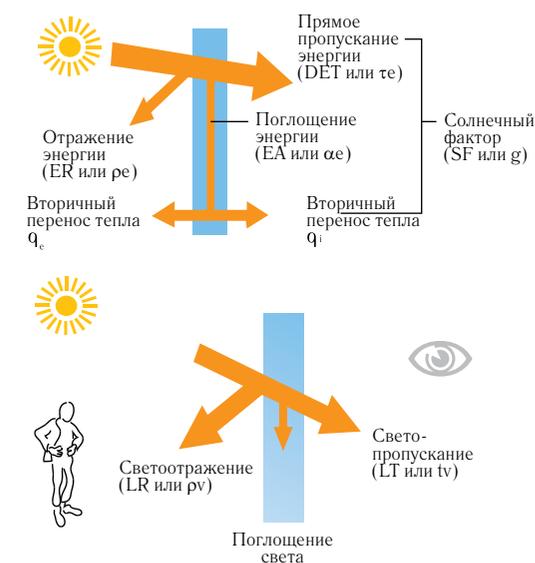


Рис. 4.1.2.1.

Схема прохождения солнечного излучения через остекление

4.1.2. Теплообмен здания и наружной среды через светопрозрачные конструкции в зимнее время

Проектирование остекления, исходя из зимних условий эксплуатации

Проектирование светопрозрачных конструкций по условиям зимнего периода производится, исходя из недопустимости избыточных тепловых потерь из помещения, приводящих к нарушению комфортности пребывания в нём человека, выпадению конденсата на внутреннем стекле стеклопакета, неоправданно высоким экономическим затратам на отопление.

В общем виде количество тепла (тепловой поток), проходящее через единицу площади ограждающей конструкции за единицу времени определяется разницей температур на ее поверхностях и теплозащитными свойствами конструкции, характеризующимися величиной сопротивления теплопередаче, т.е.

$$R = \Delta t / Q \quad (4.1.2.1)$$

где

R — сопротивление теплопередаче, [м²°C/Вт]

Q — тепловой поток, проходящий через 1 м² сечения за 1 ч, [Вт]

Δt — разница температур на внутренней и наружной поверхностях, [°C]

Для оценки теплозащитных качеств светопрозрачных конструкций (оконных блоков и элементов фасадного остекления), образуемых конструктивными элементами со сложным сечением и неоднородными в теплотехническом отношении, в России используется величина приведенного сопротивления теплопередаче $R_{o, np}$ [м²°C/Вт], определяемого согласно СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий». В европейских нормативных документах используется величина коэффициента теплопередачи U [Вт/м²К], значение которого на стадии инженерных расчётов может быть принято как $U = 1 / R_{o, np}$. При проектировании светопрозрачных

конструкций значения U ($R_{o, np}$) определяются отдельно для стеклопакета и профильных элементов непрозрачной части, а также для всей светопрозрачной оболочки или её отдельного конструктивного элемента (оконного блока, модуля и т.д. — см. главу 3). Определение показателей теплозащиты, подробно рассмотренных далее в настоящей главе, производится с учётом специфики процессов теплообмена в стеклопакете и на непрозрачных участках.

Поскольку большинство компьютерных программных продуктов, используемых сегодня в России для численного моделирования процессов теплопередачи в светопрозрачных конструкциях, поставляются зарубежными компаниями, в дальнейшем изложении имеет смысл остановиться на обозначениях и терминологии соответствующих европейских стандартов. Проектировщик, таким образом, сможет легко сориентироваться в результатах и, при необходимости, с достаточной корректностью соотнести полученные данные с действующими отечественными нормативами. В качестве дополнительной информации может быть использовано подробное описание процессов теплообмена в стеклопакете, базирующееся на данных отечественных исследований и опубликованное нами в [4].

Согласно европейскому документу EN ISO 10077-1 [93], инженерный расчёт фактического коэффициента теплопередачи U оконного блока или отдельного конструктивного элемента светопрозрачного фасада с заданными размерами может быть с достаточной корректностью выполнен по формуле (4.1.2.2) с выделением в оконном блоке или конструктивном элементе фасада трёх характерных зон: стеклопакет, профильная система и пограничная область примыкания стеклопакета к профилям (рис. 4.1.2.1).

$$U_w = \frac{A_g U_g + A_f U_f + I_g \psi_g}{A_g + A_f} \quad (4.1.2.2)$$

где

A_g — площадь прозрачной части (стеклопакета); м²

A_f — площадь непрозрачной части — профильных элементов (рама + створка), м²

U_g — коэффициент теплопередачи стеклопакета, Вт/м²К

U_f — коэффициент теплопередачи профильных элементов, Вт/м²К
 l_g — длина краевой зоны (переходной области между стеклопакетом и профильным элементом), приблизительно соответствует длине стекольного уплотнения по наружному периметру рамы (со стороны улицы), м
 ψ_g — линейный коэффициент теплопроводности краевой зоны, Вт/м К, принимаемый согласно EN 13947 по табл. 4.1.2.1.

В общем процессе теплообмена через конструкции крупноформатного остекления определяющую роль играет светопрозрачное заполнение — стеклопакет. С точки зрения классической теплофизики, однокамерный стеклопакет, как правило, используемый в конструкциях светопрозрачных фасадов и кровель (см. главу 3)

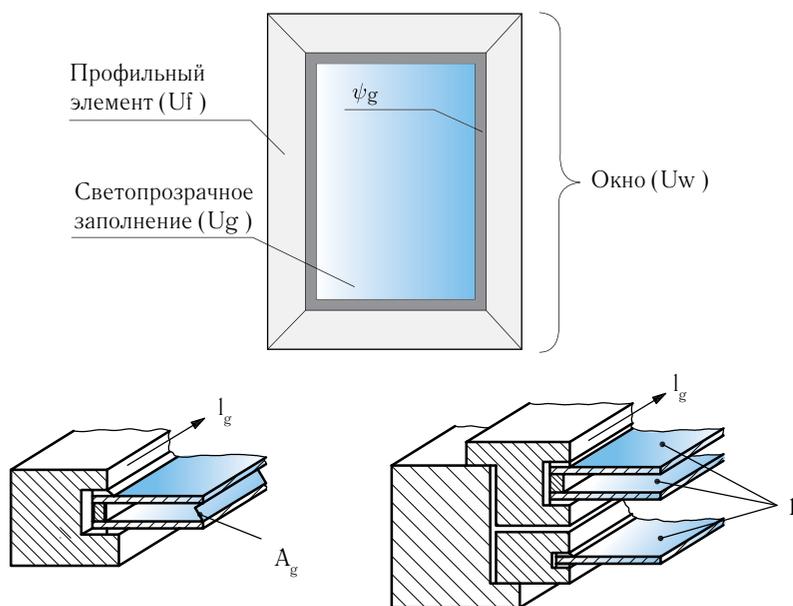


Рис. 4.1.2.1. Расчётная схема для определения приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачных конструкций (EN ISO 10077-1). 1 — стекло

табл. 4.1.2.1

Линейный коэффициент теплопроводности краевой зоны стеклопакетов с различными дистанционными рамками При условии применения совместно с профильными системами из различных материалов (согласно EN 13947)

Материал дистанционной рамки стеклопакета	Материал профильной системы	
	Металл	Дерево или пластик
TPS или нержавеющая сталь	$\psi_g = 0,08$	$\psi_g = 0,06$
Алюминий	$\psi_g = 0,11$	$\psi_g = 0,08$

представляет собой замкнутую воздушную прослойку, малой толщины по сравнению с размерами ограничивающих поверхностей остекления. Теплопередача через воздушные прослойки осуществляется излучением, конвекцией и теплопроводностью (рис. 4.1.2.2).

По различным данным структура переноса тепла через однокамерный стеклопакет, заполненный осушенным воздухом, в центральной зоне стеклопакета выглядит приблизительно следующим образом: около 65 % за счёт излучения, около 15 % за счёт конвекции, и около 20 % за счёт теплопроводности через воздушную прослойку. Непосредственно прозрачные стеклянные пластины не играют в этом отношении какой-либо существенной роли. Это не трудно увидеть, оценив величину общего термического сопротивления стёкол пакета $R_{ст}$ согласно формуле (4.1.2.3). А именно

$$R_{ст} = \sum \delta_i / \lambda_i \quad (4.1.2.3)$$

где

δ_i — толщина каждого стекла, [м]

λ_i — коэффициент теплопроводности стёкол, для силикатного стекла $\lambda_i = 0,76$ [Вт/(м°С)]

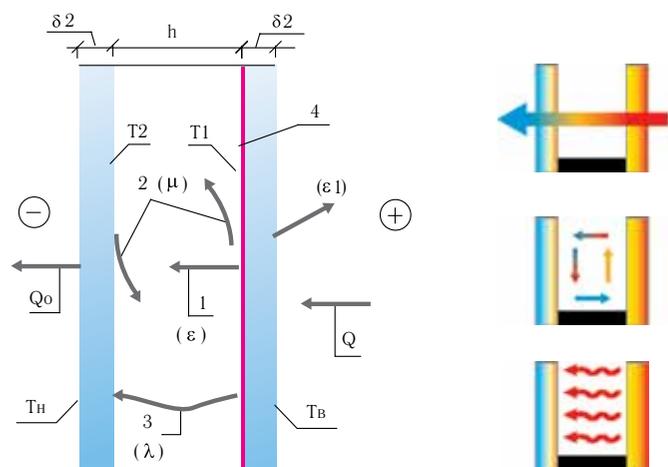


Рис. 4.1.2.2.

Схема передачи тепла через однокамерный стеклопакет

1 — излучение, 2 — конвекция, 3 — теплопроводность; 4 — низкоэмиссионное покрытие, λ — коэффициент теплопроводности, μ — динамическая вязкость¹, ε — излучательная способность

¹ Применительно к данной задаче, динамическая вязкость μ характеризует сопротивляемость газа движению теплых и холодных струй внутри заполняемого им объема, вызванную неравномерным нагреванием ограничивающих поверхностей. Иными словами, величина μ , в данном случае, отражает способность газа, заполняющего воздушную прослойку, сопротивляться конвективному переносу тепла. Чем меньше μ , тем более интенсивна конвекция.

Величина $R_{ст}$ показывает долю теплотерь, тераемую непосредственно через стёкла за счет теплопроводности. Поскольку объемный вес стекла, равный по значению объемному весу железобетона, высок ($G = 2500 \text{ кг/м}^3$), его коэффициент теплопроводности имеет также высокое значение ($\lambda = 0,76 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$). Соответственно при толщине стекла 4 ... 6 мм (0,004 ... 0,006 м), величина $R_{ст}$ будет колебаться в пределах **0,005 — 0,02 м²°С/Вт**, что не может оказывать существенного влияния на теплоизоляционные свойства стеклопакета¹.

По мере приближения к краевой зоне стеклопакета, происходит перераспределение структуры теплотерь в сторону увеличения

¹ Величину $R_{ст}$ не следует путать с теплозащитными качествами низкоэмиссионных стекол (см. главу 2 и далее в наст. разделе).

доли переноса тепла за счёт теплопроводности через дистанционную рамку. Непосредственно в краевой зоне стеклопакета потери тепла происходят исключительно за счёт теплопроводности дистанционной рамки.

Доля теплотерь в краевой зоне в значительной степени зависит от площади стеклопакета, типа дистанционной рамки и оконного профиля (см. главу 3), в который устанавливается стеклопакет. Для крупноформатного фасадного и кровельного остекления эта составляющая относительно невелика при оценке общего энергобаланса здания. Вместе с тем, она принципиально важна для проведения инженерных расчётов на вероятность выпадения конденсата и локального промерзания конструкций в местах сопряжений профильных элементов и стеклопакетов.

Согласно определениям европейского стандарта EN 673^[94], применительно к стеклопакетам, коэффициент теплопередачи U характеризует стационарные процессы теплообмена в центральной зоне без учёта краевых эффектов.

Согласно стандарту EN 673, величина U определяется по формуле (4.1.2.4) как

$$1/U = 1/h_e + 1/h_t + 1/h_i \quad (4.1.2.4)$$

где

h_i и h_e — соответственно коэффициенты сопротивления теплообмену у внутренней и наружной поверхностей остекления, принимаемые для вертикального остекления равными $h_e = 23,0 \text{ [Вт/м}^2\text{ К]}$;

$h_i = 8,0 \text{ [Вт/м}^2\text{ К]}$

h_t — общее сопротивление теплопередаче стеклопакета

Значение $1/h_t$ определяется как

$$1/h_t = \sum_{n=1}^n 1/h_s + \sum_{l=1}^m d_l r_l \quad (4.1.2.5)$$

где

h_s — общее сопротивление теплопередаче каждой из воздушных (газовых) прослоек

n — количество воздушных прослоек (для однокамерного стеклопакета $n=1$)

d_j — толщина каждого из стёкол, м

r_j — термическое сопротивление каждого из стёкол

m — количество стёкол (в однокамерном стеклопакете $m=2$)

Общее сопротивление теплопередаче воздушной (газовой) прослойки определяется суммой составляющих радиационного и конвективного теплообмена как

$$h_s = h_g + h_r \quad (4.1.2.6)$$

h_g — коэффициент теплопередачи за счёт конвекции и теплопроводности воздуха (газа) в прослойке

h_r — коэффициент теплопередачи за счёт радиации

Коэффициент h_g для прослойки определяется на основании уравнения

$$h_g = Nu (\lambda/s) \quad (4.1.2.7)$$

λ — коэффициент теплопроводности газа в прослойке

s — толщина воздушной прослойки

Nu безразмерный критерий Нуссельта, определяемый в зависимости от критериев Грансгофа Gr и Прандтля Pr равно

$$Nu = A (Gr Pr)^n \quad (4.1.2.8)$$

Для вертикальной прослойки (вертикально установленно-го стеклопакета — фасадное остекление) в уравнении (4.1.2.7): $A=0,035$; $Nu=0,38$; для горизонтально установленного стеклопакета $A=0,16$; $Nu=0,28$; для стеклопакета под углом 45° $A=0,10$; $Nu=0,31$. Промежуточные значения для разных углов наклона могут быть приняты по интерполяции.

$$Gr = \frac{9,81 s^3 \Delta T \rho^2}{T_m \mu^3} \quad (4.1.2.9)$$

$$Pr = \frac{\mu c}{\lambda} \quad (4.1.2.10)$$

где

ΔT — разница температур на внутренней и наружной поверхностях стекла, обращённых в воздушную (газовую) полость;

ρ , μ и c — соответственно плотность, динамическая вязкость и удельная теплоёмкость газа в прослойке, определяемые согласно табл. 4.1.2.2;

T_m — средняя температура воздуха (газа) в прослойке;

Табл. 4.1.2.2

Теплотехнические характеристики газов, применяемых для заполнения стеклопакетов при различных температурах [согласно EN 673]

Газ	$T, ^\circ\text{C}$	Плотность ρ кг/м ³	Теплопро- водность $l \times 10^{-2}$ Вт/(мхК)	Динами- ческая вязкость $m \times 10^{-5}$ кг/(мхс)	Теплоем- кость $C \times 10^3$ Дж/(кгК)
Воздух	-10	1,326	2,366	1,661	1,008
	0	1,277	1,711	2,416	
	+10	1,232	2,496	1,761	
	+20	1,189	2,576	1,811	
Аргон (Ar)	-10	1,829	1,584	2,038	0,519
	0	1,762	1,634	2,101	
	+10	1,699	1,684	2,164	
	+20	1,640	1,734	2,228	
Криптон (Kr)	-10	3,832	0,842	2,260	0,245
	0	3,690	0,870	2,330	
	+10	3,560	0,900	2,400	
	+20	3,430	0,926	2,470	
Гексаф- торид серы (SF ₆)	-10	6,844	1,119	1,383	0,614
	0	6,602	1,197	1,421	
	+10	6,360	1,275	1,459	
	+20	6,118	1,354	1,421	

Радиационная составляющая h_r в уравнении (4.1.2.6) определяется согласно EN 673 как

$$h_r = 4 \sigma (1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1)^{-1} T_m^3 \quad (4.1.2.11)$$

где

σ — постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$;

T_m — средняя температура воздуха (газа) в прослойке;

ε_1 и ε_2 — соответственно излучательные способности поверхностей стёкол, обращённых в воздушную (газовую) полость;

Для того, чтобы более наглядно представить физические процессы передачи тепла излучением, доля которых является основной в структуре потерь тепла через стеклопакет, (особенно в конструкциях крупноформатного остекления за счёт большой площади обменивающихся теплом поверхностей), имеет смысл записать уравнение теплообмена излучением между двумя параллельными плоскостями [31] (закон Стефана-Больцмана (для плоскопараллельного случая при расстоянии, меньшем, чем линейные размеры двух плоскостей)), т.е.

$$Q_{\text{из}} = \sigma_{\sigma} \varepsilon_{\text{пр } 1-2} [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] F \quad (4.1.2.12)$$

где

$\sigma_{\sigma} = 5,67 [\text{Вт} / \text{м}^2 \text{ К}^4]$ — постоянная Стефана — Больцмана

T_1 и T_2 — абсолютные температуры обменивающихся теплом поверхностей (стёкол пакета), К

F — площадь обменивающихся теплом поверхностей, м^2

$\varepsilon_{\text{пр } 1-2}$ — приведенный коэффициент излучательной способности при теплообмене между двумя поверхностями, определяемый как

$$\varepsilon_{\text{пр } 1-2} = (1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1)^{-1}$$

где

ε_1 и ε_2 — то же что в уравнении (4.1.2.11)

Величина ε характеризует способность стекла отражать или поглощать направленное на него ИК излучение и называется «коэффициентом излучательной способности»¹ (в ряде источников — «эмиссивитет»). Стекло, как и все диэлектрики, обладает большим, по сравнению с металлами, коэффициентом излучательной способности. Для чистого оконного стекла коэффициент излучательной способности $\varepsilon = 0,84$, а у некоторых металлов (золото, серебро) эта величина находится в пределах $\varepsilon = 0,02-0,04$.

Высокое значение ε прозрачного оконного стекла говорит о том, что оно в значительной степени поглощает падающее на него ИК излучение, поскольку само по себе является сильным излучателем поглощённого тепла. Поглощаемая стеклом теплота приводит к некоторому повышению его температуры. Поскольку оконное стекло находится на границе раздела двух сред — наружной (определяемой температурой наружного воздуха в данный момент времени года и суток) и внутренней (определяемой температурой внутреннего воздуха и поверхностей помещения), то сброс энергии от стекла за счёт излучения происходит либо наружу, либо внутрь помещения. Таким образом, имеет место переизлучение тепла стеклом в сторону более холодных, по сравнению с ним, поверхностей на данный момент времени (рис. 4.1.2.3), количественная оценка которого может быть сделана на основе уравнения (4.1.2.12).

Спектр теплового излучения внутренних конструкций стен, пола и потолка находится в области длин волн порядка 10 мкм, что значительно превышает, ближнюю ИК-границу пропускания стекла, приблизительно соответствующую 2,7 мкм, **Таким образом, по отношению к тепловому излучению изнутри помещения, происходящего в нормальных эксплуатационных условиях, стекло работает аналогично тонкой непрозрачной в длинноволновой ИК**

¹ ε — коэффициент излучательной способности тела, называемый также степенью черноты, определяется как отношение энергий излучения реального (E) и абсолютно чёрного тел (E0) — $\varepsilon = E/E0 < 1$. Под абсолютно чёрным телом (АЧТ) понимается такое условное тело, которое полностью поглощает всё падающее на него излучение. Для АЧТ $\varepsilon = 1$, т. е. энергия излучения АЧТ составляет 100 % при данной температуре по отношению ко всем другим телам, являющимся менее мощными излучателями.

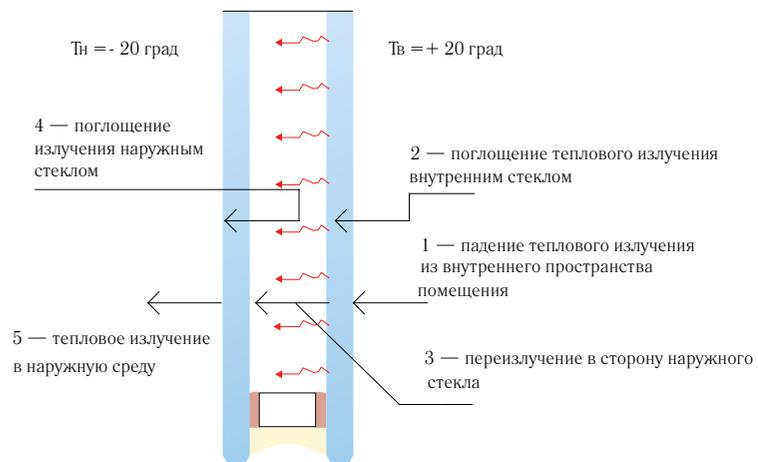


Рис. 4.1.2.3.

Передача тепла излучением в зимнее время через однокамерный стеклопакет с двумя обычными стёклами

области пластине с весьма малой тепловой инерцией и высоким коэффициентом теплопроводности.

С учётом описанных выше закономерностей, процессы переноса тепла через однокамерный стеклопакет в зимнее время выглядят следующим образом. На протяжении отопительного сезона внутреннее стекло пакета поглощает тепловое излучение, поступающее изнутри помещения, как непосредственно от радиаторов отопления, так и от нагретых внутренних конструкций стен и перекрытий. Поскольку тонкая стеклянная пластина одновременно обладает высокой излучательной способностью и высоким коэффициентом теплопроводности, происходит интенсивный процесс теплообмена — переизлучение в сторону холодного наружного стекла и непосредственно теплопотери во внутреннюю полость стеклопакета за счёт теплопередачи и конвекции. Наружное стекло, получившее определённую долю тепловой энергии, ровно по такому же механизму сбрасывает её в наружную среду. Таким образом, имеет место некоторая высокая интенсивность процессов теплообмена, зависящая от разницы температур внутреннего и наружного

стекла, и изменяемая на протяжении суток. При постоянной безперебойной работе системы отопления, с определёнными допущениями, мы можем говорить о некоторой «тепловой завесе» в виде воздушной полости стеклопакета, в которую происходит непрерывное поступление тепла от внутреннего стекла (см рис. 4.1.2.3).

При нанесении на поверхность внутреннего стекла пакета, обращённую в сторону воздушной полости, низкоэмиссионного покрытия (покрытие LOW E — от англ. — low emission — низкая эмиссия) (см. главу 2) происходит изменение закономерности передачи тепла излучением (рис. 4.1.2.5). Поскольку излучательная способность металлов может составлять $\epsilon = 0,02...0,07$, что на порядок ниже излучательной способности стекла, в данном случае мы можем говорить о наличии некоторого экрана, отражающего тепловое излучение, теряемое из внутреннего пространства. Это нетрудно увидеть, сравнив спектральные характеристики прозрачного стекла и стекла с нанесённым покрытием (рис. 4.1.2.4).

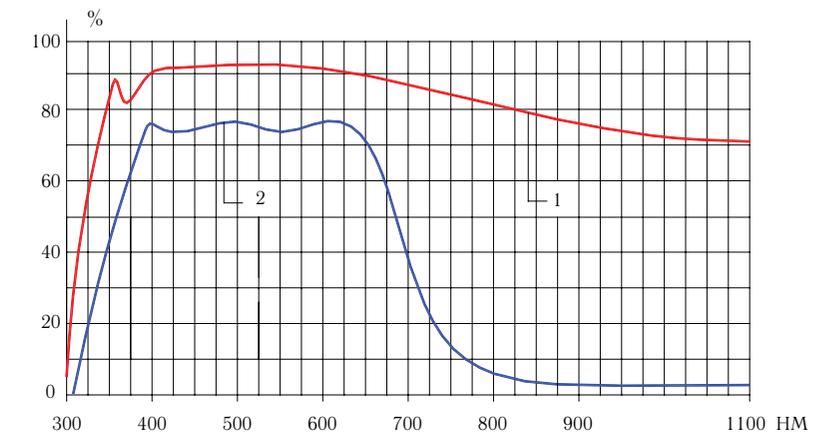


Рис. 4.1.2.4.

Сравнительная спектральная характеристика пропускания различных стекол

1 — прозрачное оконное стекло,

2 — стекло с низкоэмиссионным покрытием

Если бы экран был нанесён на стекло непосредственно со стороны помещения, то имело бы место чистое отражение теплового излучения. Однако, в традиционном случае, показанном на рис. 4.1.2.5, одновременно с процессами отражения тепловой энергии экраном, происходит дополнительное поглощение теплового излучения внутренним стеклом. В результате обеспечивается возможность некоторого повышения температуры внутреннего стекла, благоприятно сказывающееся на условиях комфортности помещения в зимнее время, рассматриваемых далее в настоящем разделе.

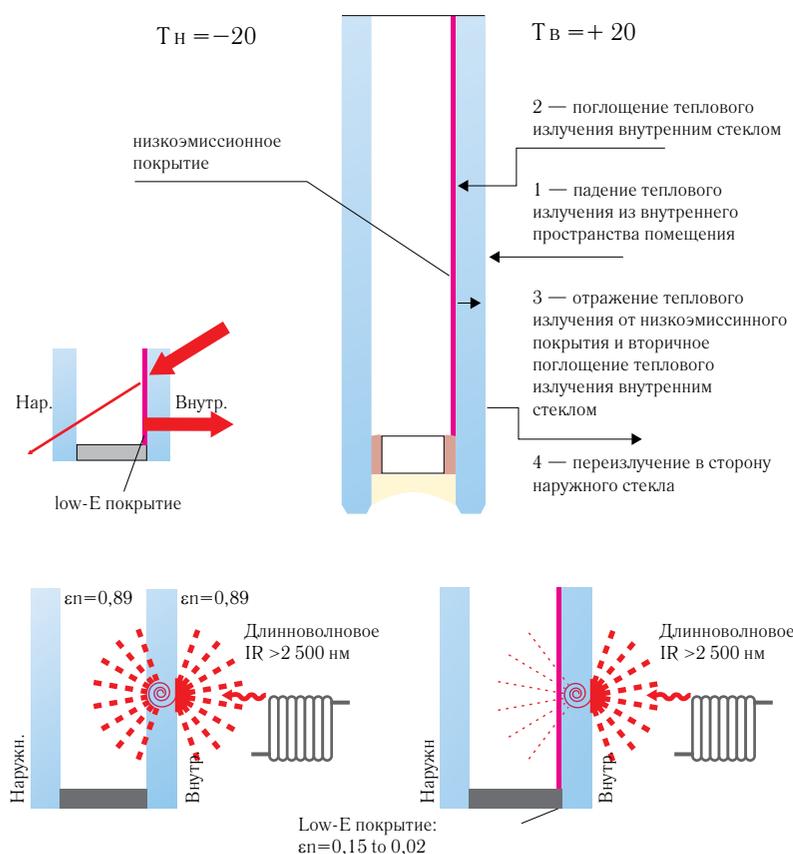


Рис. 4.1.2.5. Передача тепла излучением в зимнее время через однокамерный стеклопакет с внутренним низкоэмиссионным стеклом

ле. Необходимо отметить, что малая тепловая инерция стеклянных пластин определяет сильную зависимость этого эффекта от температуры наружного воздуха (рис. 4.1.2.6).

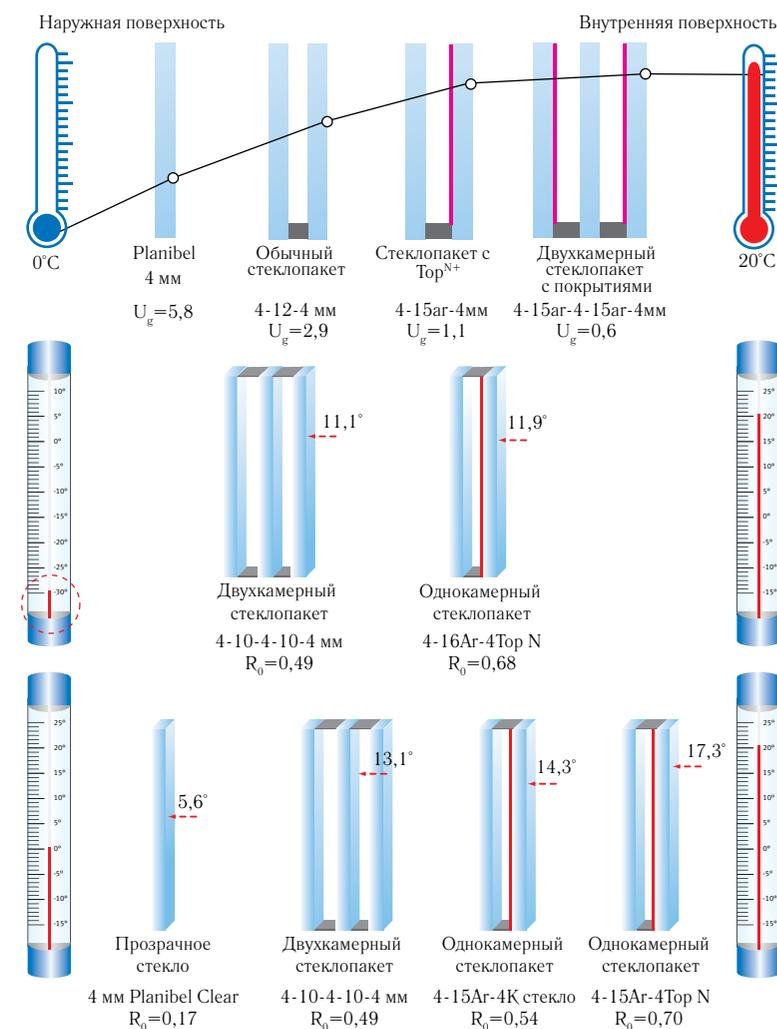


Рис. 4.1.2.6. Повышение температуры внутреннего стекла при применении стеклопакетов с низкоэмиссионными стеклами (данные для энергоэффективного стекла Top^{N+}, AGC Flat Glass Europe)

Данные производителя стекла, приведённые на *рис. 4.1.2.6* совпадают с результатами натурных наблюдений, проводившихся авторами в г. Москве. Так, результаты измерений температур внутреннего стекла стеклопакета в жилом здании показали, что температура на поверхности внутреннего стекла однокамерного стеклопакета с низкоэмиссионным стеклом со стороны помещения (в центральной зоне, без учёта краевых влияний) в среднем была чуть выше аналогичной величины для двухкамерного стеклопакета. При температуре наружного воздуха $t_n = -15\text{ }^\circ\text{C}$ и температуре внутреннего воздуха в помещении $t_b = +22\text{ }^\circ\text{C}$ температура на внутреннем стекле двухкамерного стеклопакета составляла $t_{ст} = +13,5\text{ }^\circ\text{C}$ и на внутреннем стекле однокамерного стеклопакета с низкоэмиссионным стеклом — соответственно $t_{ст} = +15,5\text{ }^\circ\text{C}$. При понижении наружной температуры, наблюдалось быстрое понижение температуры на поверхности стекла, в то время как поверхности стен, обладающие аккумулирующей способностью, долгое время оставались относительно теплыми.

Комфортность помещений со светопрозрачными ограждениями в зимнее время

Описанные выше закономерности передачи тепла через конструкцию остекления определяют условия комфортности человека, находящегося в помещении за остеклёнными наружными стенами в зимний период. В общем случае, эти условия определяются интенсивностью теплообмена человеческого тела с внутренней средой помещения за счёт лучистого и конвективного переноса тепловой энергии. Основными показателями, характеризующими эти процессы, являются температура и скорость движения воздуха в помещении, а также интенсивность радиационного теплообмена человека с поверхностями, ограничивающими помещение. В специализированной литературе эффект потерь тепла человеком в сторону охлаждённых поверхностей, за счёт теплового излучения, часто классифицируется как «холодная радиация».

В существующих методах инженерных расчетов условий комфортности принято учитывать так называемую «среднерadiацион-

ную температуру» всех ограничивающих поверхностей (стен, пола, потолка) определяемую согласно уравнению (4.1.2.13).

$$t_p = \tau \sum F_2 / \sum \tau_2 \quad (4.1.2.13)$$

где

F_b и τ — площадь, м^2 , и температура, $^\circ\text{C}$, внутренних поверхностей помещения.

Тем не менее, очевидно, что определяющую роль в зимних условиях комфортности будут играть обращённые в помещение поверхности остекления. В действующем СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий», степень дискомфорта, вызываемого «холодной радиацией» от наружных ограждений учитывается величиной нормативного температурного перепада Δt между температурой внутреннего воздуха помещения и температурой на внутренней поверхности ограждающей конструкции, обращенной в помещение. Для непрозрачных участков наружных стен жилых зданий эта величина составляет $\Delta t = 4,0\text{ }^\circ\text{C}$ и применяется в расчётах показателя требуемого сопротивления теплопередаче наружных стен по санитарно-гигиеническим условиям согласно формуле (4.1.2.14).

$$R_{тр} = (t_b - t_n) / \Delta t \alpha_b \quad (4.1.2.14)$$

где

$R_{тр}$ — требуемое сопротивление теплопередаче непрозрачного участка наружной стены; $\text{м}^2\text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$;

t_b — расчётная температура внутреннего воздуха помещения; $^\circ\text{C}$

t_n — расчётная температура наружного воздуха, принимаемая равной температуре наиболее холодной пятидневки (для г. Москвы $t_n = -28\text{ }^\circ\text{C}$)

α_b — коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, принимаемый для стен равным $\alpha_b = 8,7\text{ Вт}/(\text{м}^2\text{ }^\circ\text{C})$;

Δt — нормативный температурный перепад между температурой внутреннего воздуха помещения и температурой внутренней поверхности ограждающих конструкций (непрозрачных участков

наружных стен), принимаемый по условиям комфортности для жилых зданий как $\Delta t = 4,0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Нетрудно увидеть, что в уравнении (4.1.2.14) расчётная наружная температура наиболее холодной пятидневки применяется к наружным стенам, обладающим значительной теплоаккумулирующей способностью, которая может быть охарактеризована показателем тепловой инерции **D**, в общем случае определяемым как

$$D = R S \quad (4.1.2.15)$$

где

R — термическое сопротивление ограждающей конструкции, $\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$

S — коэффициент теплоусвоения материала ограждающей конструкции, $\text{Вт}/(\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C})$.

Как уже отмечалось выше, (поскольку показатель тепловой инерции тонких стеклянных пластин крайне низок), понижение температуры внутреннего стекла происходит очень быстро вслед за падением наружной температуры. Наблюдавшийся при измерениях, температурный перепад Δt между температурой внутреннего воздуха помещения и поверхностью внутреннего стекла, составил около $6,0 \dots 7,0 \text{ }^\circ\text{C}$, что совпадает с опубликованными данными европейских исследований. В частности в [35] указывается на величину перепада $\Delta t = 2 \dots 8 \text{ К}$.

Необходимо отметить, что при анализе санитарно-гигиенических требований к комфортности помещений, содержащихся в нормативных документах, эти цифры сами по себе не выглядят критическими. По своей величине они близки к соответствующим показателям, регламентировавшимся для непрозрачных наружных стен в советский период ($\Delta t = 6,0 \text{ }^\circ\text{C}$). В данном случае, более корректно говорить об ощущаемой человеком разнице тепловых условий, при нахождении вблизи более тёплой стены и холодного окна в каждый момент времени за счёт наличия у стен теплоаккумулирующей способности.

Чтобы увидеть причину теплового дискомфорта людей, находящихся в помещениях с большой долей наружного остекления в зимнее время, имеет смысл привести несложный расчёт, используя известные графики, построенные И. И. Шаркаукасасом на основании данных светового моделирования (рис.4.1.2.6) [3]. Для удобства изложения рассмотрим простой пример, позволяющий количественно оценить степень дискомфорта человека при нахождении его на расстоянии в 1 м от стандартного окна, имеющего размеры $2 \times 1,5 \text{ м}$ при понижении температуры внутреннего стекла до $+10 \text{ }^\circ\text{C}$.

В этом случае, человек может быть приближённо рассмотрен в качестве точечной сферы с температурой равной $+36 \text{ }^\circ\text{C}$. Его теплотери Q_{1-2} в сторону окна могут быть определены на основании уравнения радиационного теплообмена, записанного в виде:

$$Q_{1-2} = \varepsilon_{1-2} \sigma_0 \omega_{1-2} F_1 [(T_1^4/100)^4 - (T_2^4/100)^4] \quad (4.1.2.16)$$

где

$$\sigma_0 = 5.67 \text{ Вт}/\text{m}^2 \times \text{K}^4$$

ε_{1-2} коэффициент взаимной облучённости поверхностей, в общем случае принимаемый равным как $\varepsilon_{1-2} \Rightarrow 0,8$

ω_{1-2} — коэффициент облучённости с поверхности человека в сторону окна, определяемый по графику рис.4.1.2.7

Для окна с шириной $a=2 \text{ м}$, высотой $b=1,5 \text{ м}$ и расстоянием от расчётной точки до окна $h=1 \text{ м}$,

$$b/h = 1,5/1 = 1,5 \quad a/h = 2/1 = 2$$

$$\omega_{1-2} = 0,195 \sim 0,2$$

При площади окна $F_1 = a \times b = 1,5 \times 2 = 3 \text{ м}^2$, и соответственно абсолютных температурах:

$$\text{человека } T_1 = 36 \text{ }^\circ\text{C} + 273 = 309 \text{ К}$$

$$\text{поверхности стекла } T_2 = 10 \text{ }^\circ\text{C} + 273 = 283 \text{ К}$$

$$Q_{1-2} = 0,8 \times 5,67 \times 0,2 \times 3 \times [(309/100)^4 - (283/100)^4] = 54,84 \text{ Вт}/\text{m}^2$$

Согласно данным санитарно-гигиенических исследований, распределение энергии излучения человеческого тела близко к распределению энергии черного тела с максимумом, соответствующим длине волны около 9,5 мкм. По различным данным, человек способен различать источник тепловой радиации, если последний излучает около $0,00015 \text{ ккал}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}) = 6,28 \text{ Вт}/\text{м}^2$. В такой же мере организм человека чувствителен к радиационному охлаждению

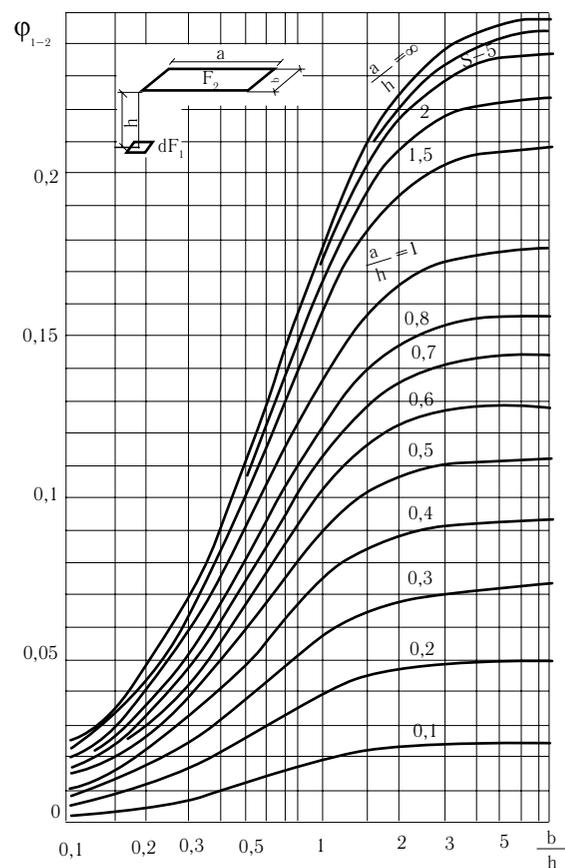


Рис. 4.1.2.7.

Коэффициенты облученности поверхностей при различном взаимном их расположении в помещении — элементарная площадка (человек — точечная сфера) и поверхность^[3].

со стороны окружающих его относительно холодных предметов и ограждений помещений^[13]. Приведенный выше расчёт показывает, что при понижении температуры внутреннего стекла до $10 \text{ }^\circ\text{C}$, что соответствует нормальным зимним условиям средней полосы России, теплотери человека за счет «холодной радиации» в сторону обычного окна традиционного здания могут достигать величин, более чем в 5 раз превышающих его нижнюю границу ощущения тепла или холода. Соответственно в здании с полностью остекленными фасадами, этот эффект будет возрастать пропорционально площади наружного остекления. Необходимо также отметить, что во многих зданиях этот фактор дополнительно осложняется явлениями инфильтрации холодного воздуха в местах сопряжения профилей со стеклопакетами, возникающей вследствие трудно прогнозируемых прогибов профильных элементов под действием температурных напряжений.

4.1.3. Теплообмен через светопрозрачные конструкции в летнее время.

Проектирование остекления, исходя из летних условий эксплуатации

Как уже отмечалось выше, наиболее проблемным вопросом при проектировании светопрозрачных конструкций, является летний эксплуатационный режим, в значительной степени определяемый тепловым воздействием инсоляции (прямого проникновения солнечных лучей) на здания и помещения.

Подавляющее большинство российских территорий не относится к зоне жаркого климата. Тем не менее, мы можем увидеть, что доля солнечной радиации, воздействующей на здания в средних широтах, вполне достаточна для формирования дискомфортных условий в летнее время. По данным нормативных документов (см. табл. 4.1.3.1), доля солнечной энергии, падающей на юго-западный фасад здания в июльский день в г. Москве достигает $500 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Таким образом, через обычное окно типового жилого

дома, имеющего площадь в 3 м² и ориентированного на юго-запад, в течение жаркого летнего дня в Москве может поступать до 1,5 кВт тепловой энергии, что эквивалентно тепловому масляному радиатору, включённому на полную мощность. Как показывает практика, температура в помещении с таким окном в среднем при температуре наружного воздуха в 22–26 °С превышает её на 10–15 °С.

На сегодняшний день специалистами по всему миру признаётся, что проблема обеспечения комфортного летнего теплового режима (с температурой внутри помещения не превышающей 20–22 °С) за остеклёнными ограждениями большой площади, является на порядок более сложной по отношению к зимним условиям. Как непосредственно с конструктивной точки зрения, так и с точки зрения математического описания и моделирования процессов теплообмена, связанных с воздействием на остекление теплового излучения с различной длиной волны.

Существующие методы расчёта светопрозрачных конструкций и элементов солнцезащиты, рассматриваемые далее в настоящем разделе, разработаны применительно к оценке возможного снижения общего проникновения энергии Солнца во внутреннее пространство здания при использовании тех или иных конструктивных мероприятий. Вместе с тем они очевидно недостаточны для прогнозирования условий формирования «парникового эффекта», возникающего вследствие поглощения и аккумуляции поступающей солнечной энергии внутренними конструкциями и предметами интерьера (см. рис. 4.1.3.2). С определенной осторожностью в данном случае мы можем говорить о преобразовании световой энергии в тепловую, поскольку проникающее коротковолновое ИК излучение Солнца близко по длине волны к видимому свету.

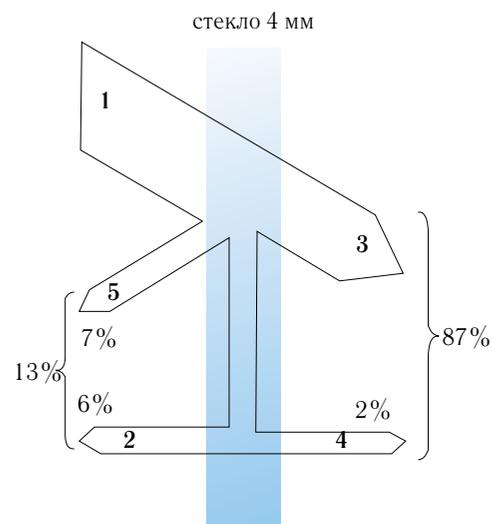
Как показывают результаты исследований, тепловое солнечное излучение, падающее на остекление, проходит через него не полностью беспрепятственно, а претерпевает частичное отражение и поглощение непосредственно стёклами (рис. 4.1.3.1) с преобразованием энергии. Нагретое внутреннее стекло, таким образом, превращается в дополнительный излучатель длинноволнового ИК тепла во внутреннее пространство. Согласно ев-

Табл.4.1.3.1

Поверхностная плотность потока солнечной радиации: $\left(\frac{\text{прямая}}{\text{рассеянная}}\right)$, поступающей на вертикальную поверхность, юго-западной и южной ориентации, Вт/м², в июле (для г. Москвы, согласно пособию 2.91 к СНиП 2.04.05-91)

Географическая широта,	Ориентация фасада	часы суток до полудня J _{МАКС}							Среднее суточное значение
		5–6	6–7	7–8	8–9	9–10	10–11	11–12	
град.									
56	Юго-запад	184 77	346 121	488 142	551 145	561 138	502 124	413 107	202
56	Юг	$\overline{46}$	$\overline{78}$	83 101	207 114	327 120	428 122	479 124	187

ропейским нормативным документам [85], этот физический процесс характеризуется термином «вторичное тепловое излучение» и фактором вторичного излучения q_i , определяемым для одинарного остекления согласно ISO 9050 на основании уравнения (4.1.3.1). Величина q_i учитывает перенос тепла за счёт конвекции и тепловой радиации. Согласно результатам лабораторных испытаний, при одинарном остеклении доля вторичного теплового излучения невелика — порядка 2–5% для прозрачного стекла (рис. 4.1.3.1а), однако существенно увеличивается в пакетном остеклении, в основном за счёт процессов радиационного теплообмена между наружным и внутренним стеклом (рис. 4.1.3.1б).



- 1 — прямая солнечная радиация 100%;
- 2 — вторичное излучение и конвекция;
- 3 — прямое пропускание 85%;
- 4 — вторичное пропускание и конвекция;
- 5 — отражение

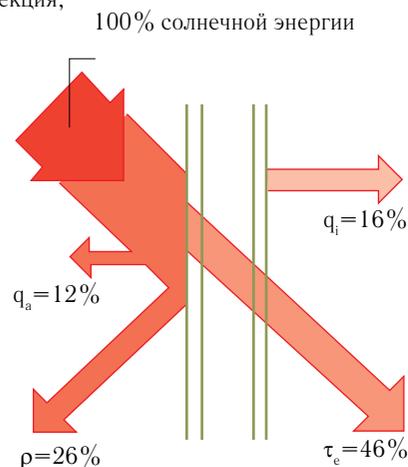


Рис. 4.1.3.1. Распределение теплового излучения Солнца при прохождении через обычное одинарное стекло [35] и однокамерный стеклопакет с обычными стёклами [31].

Общая доля проникающей тепловой солнечной энергии согласно ISO 9050 определяется величиной так называемого «солнечного фактора», определяемого согласно уравнению (4.1.3.2) путём математического суммирования долей прямой проникающей радиации τ_e и вторичного длинноволнового ИК тепла q_i .

$$q_i = \alpha_e \frac{h_i}{h_e + h_i} \quad (4.1.3.1)$$

$$q = \tau_e + q_i \quad (4.1.3.2)$$

где

q_i — фактор вторичного излучения;

q — солнечный фактор (общее пропускание солнечной энергии)

τ_e и α_e — коэффициенты пропускания и поглощения прямого солнечного излучения в коротковолновой ИК области (см. уравнение (4.1.1.2б) раздела 4.1.1);

h_i и h_e — коэффициенты сопротивления теплообмену у внутренней и наружной поверхностей остекления, принимаемые для вертикального остекления равными $h_e = 23,0$ [Вт / м² К]; $h_i = 8,0$ [Вт / м² К]

При применении указанных характеристик остекления, полученных расчётным методом или по результатам лабораторных испытаний, для определения летних условий комфортности в помещении, необходимо учитывать изменяемый нестационарный характер теплообмена через остекление в области длинноволнового ИК спектра. Очевидно, что в реальных условиях эти процессы будут сложно прогнозируемыми на протяжении суточного периода в зависимости от сочетания колебаний наружных температур в дневное и ночное время, а также степени аккумуляции солнечного тепла в помещении.

В начальный момент наступления летней жары (при смене пасмурной погоды на солнечную), внутри помещения относительно прохладно. Как было показано в разделе 4.1.2, при этих условиях тонкое внутреннее стекло, нагреваясь от солнца, будет быстро переизлучать тепловую энергию во внутреннее пространство.

Вместе с тем, при постепенном нагревании пространства помещения за счёт проникающей солнечной радиации, будет расти температура внутренних конструкций, превращающихся в самостоятельные излучатели длинноволнового ИК тепла. Оно будет поглощаться внутренним стеклом до тех пор, пока его температура будет более низкой по сравнению с температурой излучающих поверхностей. В момент, когда стекло прогреется до такой же температуры, процесс теплообмена остановится.

Иными словами, в жаркие летние месяцы будет иметь место некоторый момент теплового равновесия, соответствующий выравниванию температур остекления и внутренних поверхностей помещения, при котором излучение тепла из помещения в сторону наружной среды будет невозможным. Вместе с тем, тепловая энергия Солнца будет продолжать свободно поступать внутрь, постепенно нагревая аккумулирующие тепло внутренние конструкции (рис. 4.1.3.2).

При условии длительной жары с сохранением высокой температуры наружного воздуха ночью, исключается возможность охлаждения помещения за счёт ночного проветривания. В этом случае бесперывная работа упомянутого выше «солнечного радиатора» в течение одной недели способна повысить температуру внутренних стен и перекрытий здания до температур, значительно превышающих комфортную для человека (что наблюдалось летом 2010 года в Москве во всех квартирах многоэтажных жилых домов, не оснащённых кондиционерами). Таким образом, явление летней «положительной радиации» — перегрева, будет ощущаться человеком не только со стороны окна, но и ото всех ограничивающих помещение теплоаккумулирующих поверхностей.

Из этого утверждения также следует, что проектирование теплозащитных характеристик остекления для эксплуатации в летний период, должно производиться из условия неблагоприятного сочетания высоких температур наружного воздуха и теплового воздействия солнечной радиации. Как показывает практический опыт, ограничение негативного воздействия первого фактора обеспечивается в достаточной степени за счёт использования стеклопакета

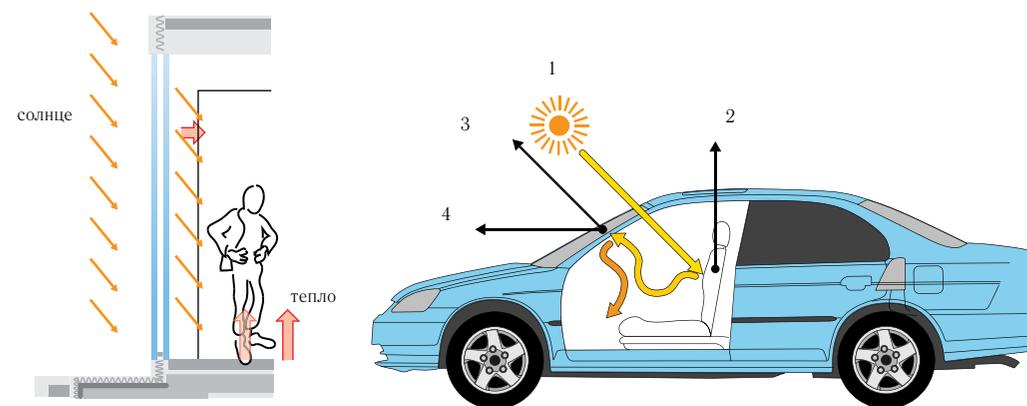
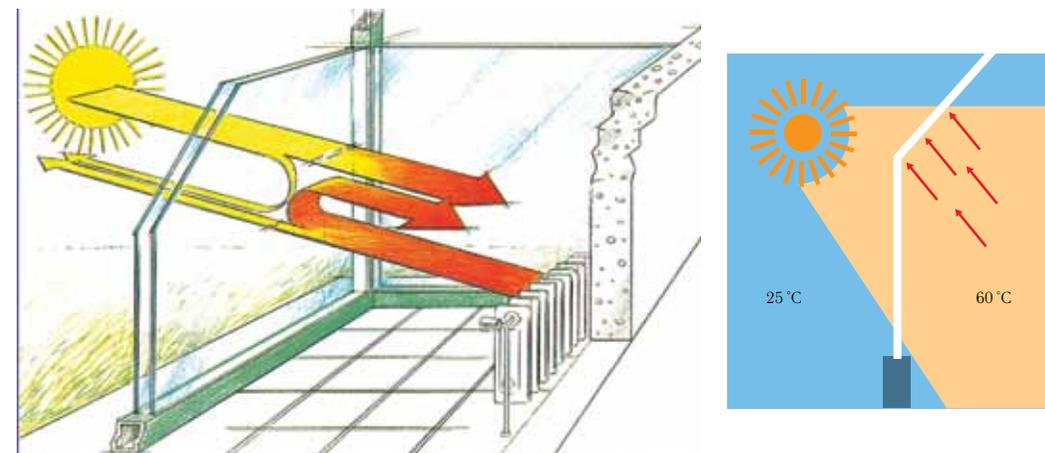


Рис. 4.1.3.2.

Преобразование энергии Солнца с формированием «парникового эффекта» в помещении за остеклёнными ограждениями.

1 — солнечные лучи: УФ, видимый свет, коротковолновое ИК излучение;

2 — поглощение: объекты нагреваются; 3 — объекты, испускающие тепло (длинноволновое ИК излучение); 4 — стекло непрозрачно для длинноволнового ИК излучения

тов с высокими теплозащитными показателями, принимаемыми по условиям зимнего периода. А наибольшую сложность при проектировании представляет разработка мероприятий солнцезащиты, как правило, сочетаемых с определением режимов ночного охлаждения помещений за счёт интенсивной вентиляции.

Общее количество солнечной радиации φ_e , падающей на 1 м^2 поверхности остекления заданной ориентации в данном климатическом районе, распределяется по долям на проникающую, поглощённую и отражённую составляющие согласно следующим закономерностям (ISO 9050): $\tau_e \varphi_e$ — пропускание; $\rho_e \varphi_e$ — отражение; $\alpha_e \varphi_e$ — поглощение.

Из закона сохранения энергии $\tau_e \varphi_e + \rho_e \varphi_e + \alpha_e \varphi_e = 100\%$, следует, что снижение доли проникающей солнечной радиации $\tau_e \varphi_e$ может быть осуществлено четырьмя возможными путями:

1. ограничением общей площади остекления;
2. повышением доли отражённого солнечного тепла;
3. повышением доли поглощённого солнечного тепла;
4. снижением фактора вторичного переизлучения длинноволнового ИК тепла.

В современной строительной практике можно условно выделить три принципиальных подхода к разработке конструктивных мероприятий, направленных на предотвращение летнего перегрева помещений за счёт избыточного теплового воздействия инсоляции. Первый из них предусматривает выполнение основных функций солнцезащиты специальным наружным стеклом; во втором — основной функциональный акцент переносится на элементы дополнительной наружной солнцезащиты. Третий подход (наиболее часто используемый в России), предполагает сочетание наружного солнцезащитного стекла с элементами внутренней солнцезащиты.

Эффективность применения наружной и внутренней солнцезащиты может быть проиллюстрирована графиками, показанными на (рис. 4.1.3.3) и приближённо оценена математически на основании европейского стандарта ISO 13363-1^[87], по вычисляемым показателям

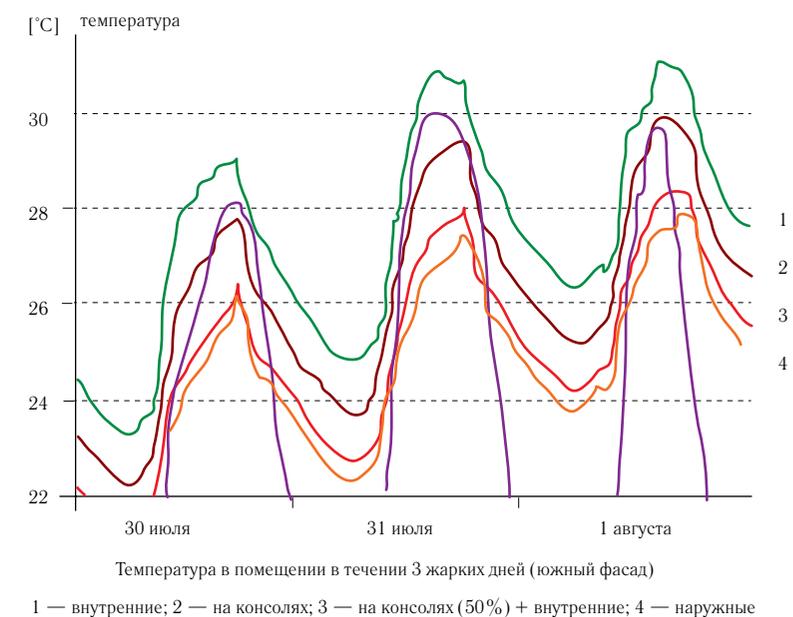
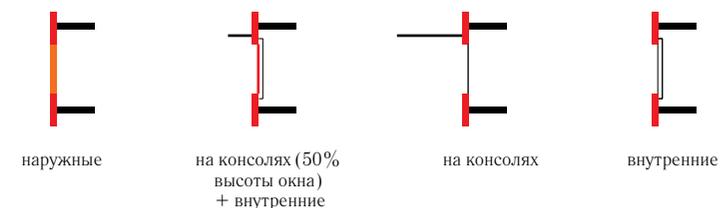


Рис. 4.1.3.3.

Сравнительная оценка эффективности различных конструктивных решений дополнительной солнцезащиты (данные Schüco)

телям общего пропускания прямого теплового излучения Солнца τ_e^{total} системой остекление + солнцезащита и общего пропускания солнечной энергии (общего солнечного фактора) указанной системы g^{total} . Согласно ISO 13363-1 указанные величины определяются с учётом условий радиационного и конвективного теплообмена в системе остекление + солнцезащита на основании расчётных схем (рис. 4.1.3.4 и рис. 4.1.3.5) и уравнений, приводимых ниже для случаев внутреннего и наружного солнцезащитного экрана.

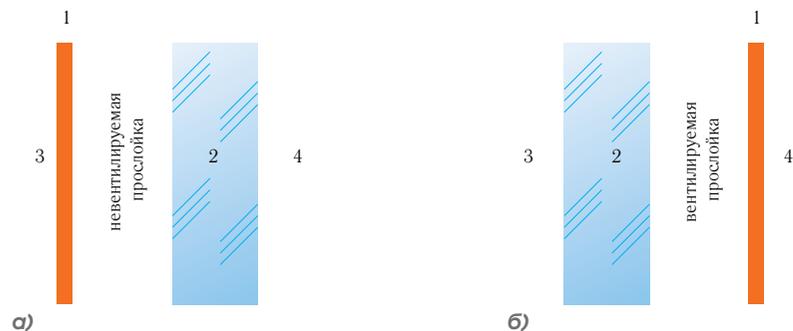


Рис. 4.1.3.4.

Принципиальные расчётные схемы к определению летних теплозащитных характеристик системы остекление + солнцезащита (сплошной солнцезащитный экран).

а) комбинация остекления с наружной солнцезащитой; **б)** комбинация остекления с внутренней солнцезащитой

1 — солнцезащитный экран; 2 — остекление; 3 — улица; 4 — помещение

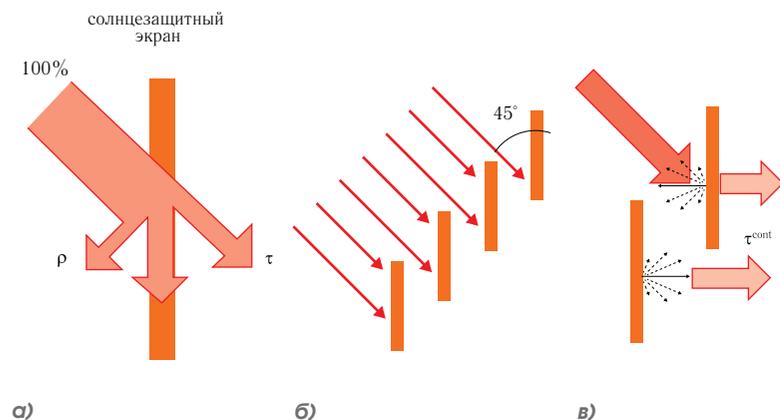


Рис. 4.1.3.5.

Корректирующие расчётные схемы для частично открытых жалюзиных экранов (с поворотом ламелей на 45°)

а) пропускание, поглощение и отражение солнечной радиации солнцезащитным экраном; **б)** отсутствие прямого проникновения солнечных лучей через экран при повороте ламелей на 45°; **в)** фактическая схема проникновения солнечных лучей через экран при повороте ламелей на 45°

Общее пропускание прямого теплового излучения Солнца τ_e^{total} независимо от положения экрана (внутреннее или наружное) определяется согласно уравнению (4.1.3.3) как

$$\tau_e^{total} = \frac{\tau_e \tau_{eB}}{1 - \rho_e \rho_{eB}} \quad (4.1.3.3)$$

где

τ_e — коэффициент пропускания прямого солнечного излучения в коротковолновой ИК области остеклением (стеклопакетом);

ρ_e — коэффициент отражения прямого солнечного излучения в коротковолновой ИК области поверхностью стекла со стороны экрана;

τ_{eB} — коэффициент пропускания прямого солнечного излучения в коротковолновой ИК области экраном;

ρ_{eB} — коэффициент отражения прямого солнечного излучения в коротковолновой ИК области поверхностью экрана со стороны стеклопакета;

Общее пропускание солнечной энергии g^{total} (солнечный фактор) в случае наружного экрана (g_{ex}^{total}) определяется на основании уравнения (4.1.3.4a) и на основании уравнения (4.1.3.4б) — в случае внутреннего экрана (g_{in}^{total})

$$g_{ex}^{total} = \tau_{eB} g + \alpha_{eB} \frac{A_{ex}}{A_2} + \tau_{eB} (1 - g) \frac{A_{ex}}{A_1} \quad (4.1.3.4a)$$

$$g_{ex}^{total} = g(1 - g \rho_{eB} - \alpha_{eB} \frac{A_{in}}{A_2}) \quad (4.1.3.4б)$$

где

g — общее пропускание солнечной энергии (солнечный фактор) стеклопакета (см. уравнение (4.1.3.2))

$\alpha_{eB} = 1 - \tau_{eB} - \rho_{eB}$ — коэффициент поглощения прямого солнечного излучения в коротковолновой ИК области экраном;

A_1 и A_2 — соответственно коэффициенты сопротивления теплообмену на поверхности экрана с наружной (улица) и внутренней стороны, принимаемые $A_1 = 6 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$; $A_2 = 18 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$;

Общее сопротивление теплообмену A_{ex} для системы стеклопакет + наружный экран определяется на основании уравнения (4.1.3.5a), A_{in} для системы стеклопакет + внутренний экран – соответственно на основании уравнения (4.1.3.5б), т.е.

$$A_{ex} = \frac{1}{1/U + 1/A_1 + 1/A_2} \quad (4.1.3.5a)$$

$$A_{in} = \frac{1}{1/U + 1/A_2} \quad (4.1.3.5b)$$

где

U — коэффициент теплопередачи стеклопакета, Вт/м²К (см. раздел 4.1.2)

Для частично открытых жалюзийных экранов (с поворотом ламелей на 45° — см. рис. 4.1.3.5) вместо значений τ_{eB} и ρ_{eB} в уравнениях (4.1.3.3) и (4.1.3.4) должны быть использованы скорректированные величины, определяемые соответственно как

$$\tau_{eB}^{corr} = 0,65\tau_{eB} + 0,15\rho_{eB} \quad (4.1.3.6a)$$

$$\rho_{eB}^{corr} = \rho_{eB}(0,75 + 0,70\tau_{eB}) \quad (4.1.3.6b)$$

Наряду с определением показателей солнцезащиты непосредственно светопрозрачных конструкций, в европейских строительных нормативах можно встретить определённые указания на ограничение общей площади остекления. Так, согласно европейскому нормативному документу DIN 4108-2: 2003-07, основной нормируемой величиной, отражающий летний тепловой режим помещений, является безразмерный показатель допустимой солнечной энергии, поступающей в помещение, обозначаемый как $S \leq S_{zul} (S_{дон})$ и определяемый для конкретного здания или его отдельного фасада согласно уравнению (4.1.3.7) как

$$S = \frac{\sum_j (A_{w,j} \times g_{total,j})}{A_G} \quad (4.1.3.7)$$

где

A_w — площадь светопрозрачного заполнения окон, м²

A_G — общая площадь пола помещения, м²

g^{total} — общее количество солнечной энергии (солнечный фактор), проходящей через остекление, с учётом затенения дополнительными солнцезащитными устройствами, определяемый на основании уравнений (4.1.3.4a) и (4.1.3.4б).

При внимательном рассмотрении формулы (4.1.3.7) нетрудно заметить, что показатель S фактически нормирует отношение площади окон к площади пола, допускаемое по летним условиям и составляет для условий Европы (в зависимости от климатического района строительства) $S_{zul} (S_{дон}) = 0,015..0,04$. Из формулы (4.1.3.7) также видна прямая пропорциональная зависимость между допустимой площадью остекления и эффективностью солнцезащитных мероприятий.

4.2. Воздействие внешнего шума на светопрозрачные фасады.

Звукоизоляционные характеристики светопрозрачных конструкций

Помимо факторов естественного природного энергообмена, рассмотренных в разделе 4.1, помещения с панорамным остеклением наружных стен, в значительной степени уязвимы по отношению к различным техногенным воздействиям городской среды, негативно влияющих на здоровье людей, проживающих или работающих в этих помещениях. Возрастающая транспортная нагрузка, представляющая важнейшую экологическую проблему для всех крупных городов мира, имеет бесспорный приоритет в этом отношении для инженерного исследования. Вместе с тем, несмотря на высокую актуальность проблемы, особенно по отношению к административно-офисным зданиям с остекленными фасадами, ориентированными на оживленные транспортные магистрали или располагаемым вблизи аэропортов, вопросы звукоизоляции светопрозрачных ограждений большой площади, на сегодняшний день остаются спорными и малоизученными.

Существующие методы инженерных расчётов, в основном построенные на базе теоретических закономерностей, справедливых для раздельного листового остекления, далеко не всегда демонстрируют адекватные результаты, применительно к стеклопакетам с герметичной воздушной полостью. А результаты лабораторных испытаний, проводимых согласно европейским нормам для стеклопакетов с габаритными размерами 1,23 x 1,48 м^[95], могут быть использованы применительно к конструкциям панорамного остекления соответственно с очень большим приближением.

Таким образом, в рамках настоящей главы, имеет смысл рассмотреть наиболее общие факторы, оказывающие влияние на звукоизоляцию светопрозрачных фасадов. Иными словами, мы сможем дать достаточно приближённую оценку технических резервов панорамного остекления, доступных на современном этапе при проектировании помещений различного назначения, подвергающихся воздействию внешнего шума различного типа и интенсивности.



4.2.1. Восприятие звука человеком.

Шумовой режим помещений.

Транспортный шум

Шумовой режим городских территорий определяется воздействием целого ряда источников внешнего шума. К таким источникам, прежде всего, относятся средства автомобильного, железнодорожного и воздушного транспорта, ряд промышленных предприятий и установок, а также другие шумовые воздействия, связанные с различными видами жизнедеятельности населения.

При распространении звуковых волн в воздухе в каждой точке звукового поля возникает попеременное сжатие-разрежение, что приводит к изменению давления в среде по сравнению с атмосферным (статическим) давлением. Разность между атмосферным давлением и давлением в данной точке звукового поля называется **звуковым давлением** P (Па).

Порог слышимости человеческого уха составляет $P_0 = 2 \times 10^{-5}$ Па; оно безболезненно выдерживает звуковое давление до 20 Па, и приблизительно при звуковом давлении в 200 Па наступает болевой порог. Разница в 10 миллионов раз между порогом слышимости и болевым порогом показывает очень высокую чувствительность человеческого уха, которую практически нереально оценить путём прямой математической зависимости.

В практической деятельности для оценки звуковых воздействий на человека используются относительные — логарифмические величины, базирующиеся на психо-физическом законе Вебера-Фехнера, согласно которому ощущение степени изменения звукового давления (субъективное восприятие человеком) близко совпадает с логарифмической кривой.

В качестве основной величины, характеризующей шумовые воздействия и звукоизоляционные характеристики ограждающих конструкций, в строительной акустике используется показатель **уровня звукового давления** L представляющего собой относительную логарифмическую величину, характеризующую звуковое давление в данной расчетной точке относительно порога слышимости

и определяемого по формуле (4.2.1.1). За единицу измерения уровня звукового давления принят 1 децибел (1Дб). Разница уровней в 1Дб соответствует минимальной величине, различимой слухом.

$$L = 20 \lg (P/P_0) \quad (4.2.1.1)$$

где

P — значение звукового давления в данной точке звукового поля

$P_0 = 2 \times 10^{-5}$ Па — звуковое давление, соответствующее порогу слышимости

Соотношение между величинами звукового давления P , уровнем звукового давления L и физиологическими ощущениями человека, могут быть приближённо проиллюстрированы таблицей 4.2.1.1.

Табл. 4.2.1.1

Физиологические ощущения человека при действии различных источников шума			
Источник шума	Звуковое давление, P Па	Уровень звукового давления, L дБ	Физиологические ощущения человека
Абсолютная тишина	0,00002	0	Порог слышимости. Угнетает
Шелест листья		10	Состояние звукового комфорта
Нормальный разговор, тихая музыка	0,002	35–40	
Громкая речь	0,02	60	
Громкая музыка, оживленная транспортная магистраль	0,2	75–80	
Поезд метро	2	100	
Реактивный двигатель самолета		130	
	200	140	Болевой порог
	2 000 — 200 000	160–200	Болевой шок

Допустимый уровень звукового давления является величиной, нормируемой санитарными требованиями, в зависимости от назначения помещения. Ниже приведена обобщённая таблица соответствующих величин [24] (табл. 4.2.1.2.).

В российских нормативных документах, наряду непосредственно с величиной уровня звукового давления L , используются скорректированные значения, моделируемые на акустических приборах при помощи **кривой частотной коррекции А**, и соответствующие особенностями восприятия звука человеческим ухом на различных частотах (см.табл. 4.2.1.4.). Субъективная оценка шума человеком характеризуется значением **«уровня звука» L_A , измеряемого в дБА**, и представляющим собой значение уровня звукового давления, с учётом поправки по кривой А для конкретного частотного диапазона (см. табл. 4.2.1.3).

В строительной технике принято рассматривать диапазон частот, воспринимаемый органами слуха человека, в интервале от 125 до 4000 Гц. Наибольшую чувствительность к звуковым воздействиям человек проявляет на средних частотах (в интервале приблизительно от 400 до 3000 Гц), несколько хуже слышит высокие (примерно от 3000 до 20 000 Гц), и наименее чувствителен к звуку на низких (примерно от 20 до 400 Гц).

При проведении акустических расчетов и измерений частотный спектр слышимого шума разбивается на октавные полосы частот, ограниченные нижней частотой f_1 и верхней частотой f_2 , при этом $f_2/f_1=2$. Если $f_2/f_1 = \sqrt[3]{2}$, то ширина полосы равна 1/3 октавы. В качестве частоты, характеризующей полосу в целом, берется среднегеометрическая частота $f = \sqrt{f_1 \cdot f_2}$. Крайние и среднегеометрические частоты октавных полос стандартизованы (табл. 4.2.1.3).

Табл. 4.2.1.2

Максимально допустимые уровни звукового давления в помещениях [24]

Наименование помещения	Допустимый уровень звукового давления, $L_{\text{доп}}$, Дб
Спальни, библиотеки	20–30
Общие комнаты квартир	20–40
Школы	25–40
Рабочие кабинеты	30–45
Групповые офисы	40–50
Торговые залы магазинов, рестораны	45–55

Табл. 4.2.1.3

Стандартизованные октавные полосы частот, среднегеометрические частоты октавных полос, значения кривой коррекции А

Номер октавы	1	2	3	4	5	6	7
Частоты	Низкие			Средние			Высокие
Октавные полосы частот, f_1-f_2 , Гц	45–90	90–180	180–355	355–710	710–1400	1400–2800	2800–5600
Среднегеометрическая частота, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000
Относительная частотная характеристика кривой коррекции А, дБ	–26.2	–16.1	–8.6	–3.2	0	+1.2	+1.0

Табл. 4.2.1.4

**Допустимые эквивалентные уровни звукового давления
в помещениях жилых и общественных зданий
(на основании табл.1 СНИП 23-03-2003 «Защита от шума»)**

N п/п	Назначение помещения	Уровни звукового давления (эквивалентный уровень звукового давления) L, дБ В октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц									Допустимый уровень звука L _A , [дБА]
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	Палаты больниц и санаториев, операционные больниц	76	59	48	40	34	30	27	25	23	35
2	Жилые комнаты квартир в домах категории А	76	59	48	40	34	30	27	25	23	35
	в домах категории Б и В	79	63	52	45	39	35	32	30	28	40
3	Классные помещения, учебные кабинеты, аудитории, залы заседаний и совещаний	79	63	52	45	39	35	32	30	28	40
4	Офисные помещения										
	Категории А	83	67	57	49	44	40	37	35	33	45
	Категории Б	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50
5	Торговые залы, вокзалы, предприятия бытового обслуживания	93	79	70	63	58	55	52	50	8	60

Внешний шум, в зависимости от его источника, имеет не только разную интенсивность, но и разную тональность. Шум большинства городских источников включает звуки почти всех частот звукового диапазона, но отличается разным распределением уровней звукового давления по частотам и неодинаковым изменением их по времени. Так, очевидно, что спектр шума, создаваемого движущимся поездом, значительно отличается от шумового спектра взлетающего самолёта. А скоростная магистраль для движения легкового транспорта, характеризуется более высоким частотным спектром по сравнению с городскими улицами, по которым движутся грузовики или автобусы, создающие низкочастотный спектр (рис. 4.2.1.1).

В российских нормативных документах для оценки городских шумов применяются осредненные величины, измеряемые в течение установленных базисных интервалов времени, отличающихся принципиально по уровню шумовой нагрузки. Согласно международным и национальным стандартам, в отношении деятельности

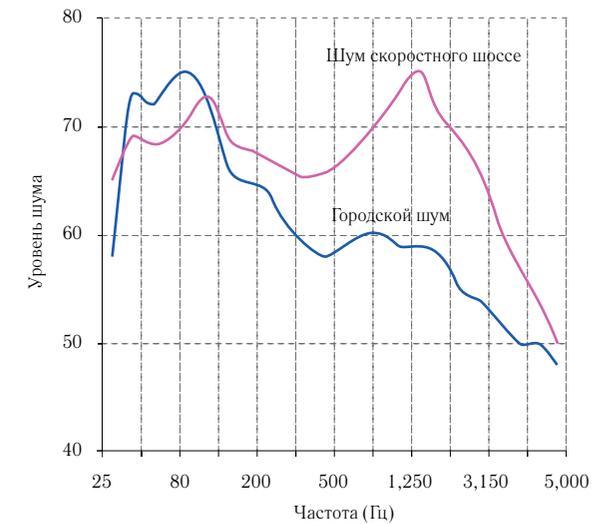


Рис. 4.2.1.1.

Сравнительная спектральная характеристика шума внутригородского транспортного потока и скоростной автомагистрали [24]

людей к базисным интервалам относят периоды дневного и ночного времени суток.

В качестве основной величины для оценки шумового режима в местах отдыха, проживания и работы населения установлена осредненная величина — **эквивалентный уровень звука** $L_{Аэқв}$, измеряемый в дБА и определяемый как

$$L_{АэқвТ} = 10 \lg \left[\frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} (P_{A(t)}^2 / P_0^2) dt \right] \quad (4.2.1.2)$$

где

P_0 — пороговое значение звукового давления, $P_0 = 2 \times 10^{-5}$ Па

$P_{A(t)}$ — значение звукового давления в момент времени t , скорректированное в соответствии с кривой коррекции шумового сигнала A , [Па]

$L_{АэқвТ}$, [дБА] — эквивалентный уровень звука, полученный для интервала времени T , начинающегося в t_1 и заканчивающегося в t_2 . Согласно различным нормам, необходимо различать так называемые базисные интервалы для дневного и ночного времени суток (день — с $t_1 = 7$ ч до $t_2 = 23$ ч и ночь — с $t_1 = 23$ ч до $t_2 = 7$ ч), в течение которых шумовая нагрузка резко отличается по интенсивности. Однако на практике учет снижения шумовой нагрузки в ночное время представляется трудным с точки зрения оценки и реализации в проектных решениях, поэтому в акустических расчетах, как правило, рассматривается максимальная шумовая нагрузка днем.

В большинстве случаев (за исключением зданий, построенных вблизи железнодорожных магистралей и аэропортов), в качестве основной шумовой нагрузки на светопрозрачные конструкции рассматривается шум, создаваемый транспортным потоком. Для его количественной оценки в расчетах принимается **эталонный спектр транспортного шума** (табл. 4.2.1.5).

Табл. 4.2.1.5

Эталонный спектр транспортного шума (для $L_{Аэқв} = 75$ дБа)
(согласно табл.8 СНиП 23-03-2003 «Защита от шума»)

Среднегеометрическая октавная частота, Гц	125	250	500	1000	2000	4000	Шумовая характеристика транспортного потока (эквивалентный уровень звука), $L_{Аэқв}$, дБ
Уровень звукового давления L_{Ai} , дБ	55	60	63	67	64	60	75

Примечание

L_{Ai} — скорректированные по кривой частотной коррекции уровни звукового давления, создаваемые источником шума в октавных (третьоктавных) полосах частот

4.2.2. Передача шума через светопрозрачные конструкции. Звукоизоляционные характеристики стеклопакетов

Правильно запроектированные светопрозрачные ограждения должны обеспечивать снижение шумовых воздействий окружающей среды на человека до допустимых величин, регламентируемых санитарными нормами. Разница значений звуковых давлений снаружи помещения и внутри него определяет показатель звукоизоляции окна $R_{ок}$, характеризующий снижение внешнего шума светопрозрачными конструкциями, и определяемый в общем случае с учётом снижения энергии звуковой волны за счёт поглощающих поверхностей внутри помещения

$$R_{ок} = L_A^{ул} - L_A^{ном} + 10 \lg (S/A) \quad (4.2.2.1)$$

где

$L_A^{ул}$ — уровень звукового давления, создаваемого внешним источником (транспортным потоком) с учетом снижения уровня звука

(энергии звуковой волны) в воздухе при прохождении от источника до расчётной точки (от транспортной магистрали до фасада здания на заданной высоте)

$L_A^{пом}$ — уровень звукового давления в помещении

S — площадь окна (всех окон в данном помещении, ориентированных на источник шума), m^2

A — эквивалентная площадь звукопоглощения в помещении (средняя в диапазоне 125–1000 Гц), m^2 . Определяется как сумма произведений коэффициентов звукопоглощения отдельных поверхностей на их площади. В акустических расчетах оконных конструкций принимается равной 0,4 ... 0,8.

По своей природе основная доля внешних шумовых воздействий на здание приходится на так называемый **воздушный шум**, возникающий при излучении звука в воздушное пространство. Излучаемый звук достигает какого-либо ограждения и вызывает его колебания. Колеблущееся ограждение, в свою очередь, излучает звук в смежное помещение, и таким образом воздушный шум достигает воспринимающего его человека.

В сложившейся практике, расчётную модель однокамерного стеклопакета (аналогично конструкции раздельного листового остекления) принято рассматривать как систему двух масс с упругими поперечными связями (рис. 4.2.2.1). Передача звука через такую конструкцию осуществляется следующим образом. Звуковые волны, падающие на наружное стекло с массой m_1 , вызывают в нем изгибные колебания. Находящийся в прослойке воздух выполняет роль амортизатора (своего рода, упругой воздушной пружины), в котором эти колебания затухают. Таким образом, на внутреннее стекло с массой m_2 , приходит уже ослабленное звуковое воздействие, которое, в свою очередь, возбуждает изгибные колебания в этом стекле. Колеблущееся внутреннее стекло излучает звук в помещение. Описанный процесс происходит на частотах, превышающих примерно в два раза значения частот, определяемых по формуле 4.2.2.3.

Теоретически и экспериментально установлено, что система двух масс с упругими поперечными связями обладает рядом резо-

насов, резко снижающих звукоизоляцию конструкции в определённых частотных диапазонах (рис. 4.2.2.2).

На участке **I** в диапазоне низких частот до 100 Гц двойная конструкция, согласно теоретическим положениям, ведет себя как акустически однородная конструкция, имеющая массу $1m^2$, равную

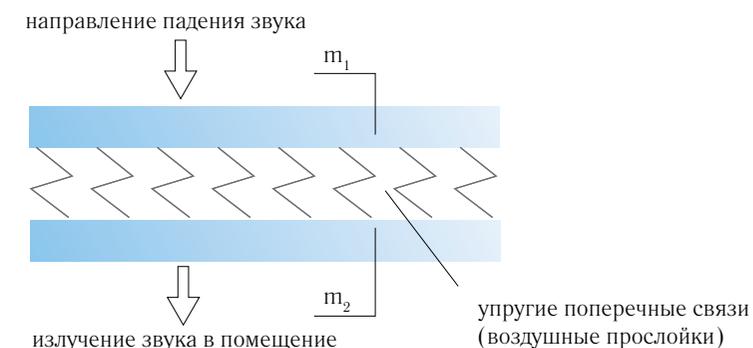


Рис. 4.2.2.1.

Схема прохождения звука через однокамерный стеклопакет

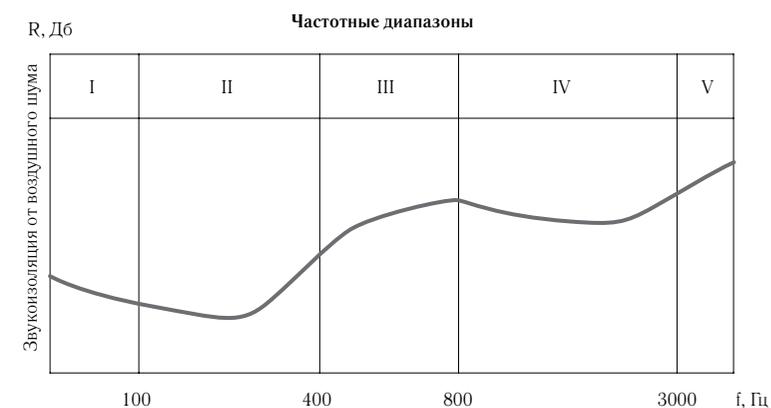


Рис. 4.2.2.2.

Принципиальная частотная характеристика изоляции воздушного шума двойным остеклением (однокамерным стеклопакетом). Характерные частотные диапазоны

суммарной массе 1 м^2 двух стекол двойной конструкции ($m = m_1 + m_2$). Звукоизоляция остекления в этом частотном диапазоне определяется в соответствии с основным акустическим законом массы, который может быть записан в виде:

$$R_i = 20 \lg m f_i - 42 - \Delta_p \quad (4.2.2.2)$$

где

R_i — звукоизоляция конструкции на i -ой частоте, [дБ]

f_i — частота, [Гц]

$m = \rho / h$ — поверхностная плотность (масса единицы площади конструкции), [кг/м²]

ρ — объемный вес материала конструкции, [кг/м³], для стекла $\rho = 2500$ кг/м³

h — толщина конструкции, [м]

Δ_p — снижение изоляции, [дБ], на резонансах при изгибных волновых колебаниях стеклянных пластин.

Волновые резонансы наблюдаются всякий раз, когда в размерах пластины укладывается целое число полуволн. В стеклах при их обычных толщинах (3 × 10 мм) во всем нормируемом диапазоне частот (100 × 4000 Гц) возникают десятки резонансов (по несколько в каждой октаве). Величина снижения изоляции на волновых резонансах определяется степенью отражения изгибных волн от краев пластины, которая в свою очередь определяется упругостью заделки стекла в обрамляющую конструкцию. Как показали эксперименты [17], при упругом закреплении пластины её звукоизоляция может снижаться до 10 дБ и более.

Следующий вид волновых резонансов возникает на частотах, при которых вдоль длины или ширины межстекольной прослойки уложатся целые числа звуковых волн в воздухе. Таких резонансов в нормируемом диапазоне частот также может быть несколько десятков. Снижение изоляции на них может достигать четырех децибел [5].

И, наконец, третий вид резонансов происходит по известной в механике схеме колебаний сосредоточенных масс, соединенных сосредоточенными упругостями, где роль масс выполняют стекла,

а упругостей — воздушные промежутки. Количество резонансов определяется числом пар «масса-упругость».

При двойном остеклении резонанс имеет место при совпадении частоты падающих звуковых волн f с собственной частотой колебания остекления f_0 . На этой частоте стекла начинают совершать ритмические, усиливающие друг друга колебания. В этот момент резко увеличивается интенсивность прохождения звука через остекление, а его звукоизоляция соответственно резко снижается.

В общем случае при заполнении промежутка между массивными слоями (стёклами) воздухом частота f_0 может быть определена по формуле

$$f_0 = 60 \sqrt{(m_1 + m_2) / a m_1 m_2} \quad (4.2.2.3)$$

где

a — толщина воздушного промежутка, [м].

Так, например, остекление из двух стёкол толщиной по 3 мм с воздушным промежутком 20 мм имеет резонансную частоту 190 Гц, при толщине стекол по 6 мм и воздушном промежутке 9 мм резонансная частота составит 230 Гц. При сопоставлении этих значений с графиком на рис. 4.2.2.2 видно, что провал звукоизоляции во втором частотном диапазоне как раз и приходится на указанные значения частоты f_0 .

Формула (4.2.2.2) справедлива до граничной частоты волнового совпадения (пространственно-частотного резонанса), имеющего место при совпадении следа (проекции) падающей под некоторым углом звуковой волны в воздухе с длиной изгибной волны в пластине. Такое явление возможно благодаря тому, что скорость распространения изгибной волны в пластине в отличие от постоянной скорости распространения звука в воздухе (340 м/с), зависит от частоты колебаний. Пока на низких частотах скорость распространения изгибной волны в пластине меньше скорости распространения звука в воздухе, волнового совпадения не происходит. Оно начинается с граничной частоты f_{rp} , при которой эти скорости совпадают,

и распространение звука происходит вдоль пластины. В дальнейшем на любой частоте выше граничной всегда найдётся угол волнового совпадения. Звукоизоляция при этом также определяется согласно закону масс (формула 4.2.2.2.) но за вычетом 16 дБ.

Согласно [24], значение граничной частоты стеклянной пластины может быть приближённо определено из соотношения (4.2.2.4) как

$$f_{гр} = 12,80/e, \quad (4.2.2.4)$$

где

e — толщина стекла, м.

Так, при толщине стекла 0,003 м граничная частота составляет 4267 Гц, при 0,004 м — 3200 Гц, при 0,006 м — 2133 Гц и при 0,01 — 1280 Гц. Как видно из графика на рис.4.2.2.2, уменьшение звукоизоляции за счет волнового совпадения приходится на четвертый частотный диапазон.

Из рис. 4.2.1.1 нетрудно увидеть, что, несмотря на определённые различия в спектре, транспортный шум, преградой для которого являются светопрозрачные конструкции, по своей природе является низкочастотным. Несмотря на то, что резонансная частота $f_{гр}$ тонких стёкол приходится на область высоких частот (см. формулу 4.2.2.4 и рис. 4.2.2.3), их звукоизоляционные характеристики в низкочастотной области спектра крайне невелики.

При этом очевидно, что никакое разумное увеличение массы (увеличение толщины) стекла не сможет приблизить его звукоизоляционные характеристики к непрозрачным участкам наружных стен. Увеличение толщины стеклянной пластины только приводит к небольшому смещению её резонанса в сторону низких частот. Тогда как высокая звукоизоляция светопрозрачных конструкций необходима именно в этом диапазоне.

Применение стеклопакета с одинаковой толщиной стёкол (одинаковой массой), не даёт ощутимого выигрыша, поскольку частоты

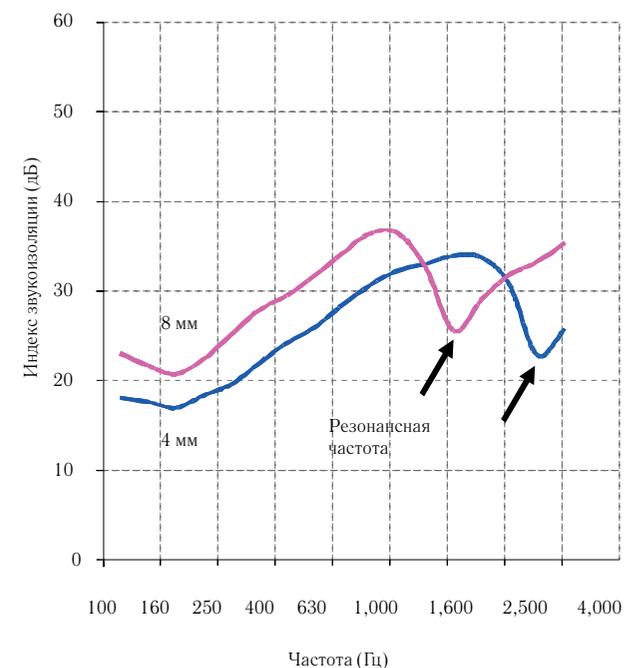


Рис. 4.2.2.3.

Частотные характеристики изоляции воздушного шума одиночными стеклами, различной толщины [24]

волнового совпадения для обоих стекол совпадают, т.е. $f_{гр1} = f_{гр2}$. В определённом смысле мы можем говорить о том, что такой стеклопакет в акустическом отношении работает даже хуже однослойной конструкции, поскольку частота общего резонанса f_0 в данном случае находится в области изолируемых средних и низких частот, что хорошо видно из рис. 4.2.2.4.

Установка в стеклопакете стёкол различной толщины приводит к выравниванию частотных характеристик на высоких частотах за счёт различия в граничных частотах $f_{гр1}$ и $f_{гр2}$. Резонансный провал одной из стеклянных пластин в данном случае компенсируется включением в работу второго стекла. Вместе с тем, звукоизоляционные характеристики такого стеклопакета на наиболее значимых средних и низких частотах остаются невысокими (рис. 4.2.2.5).

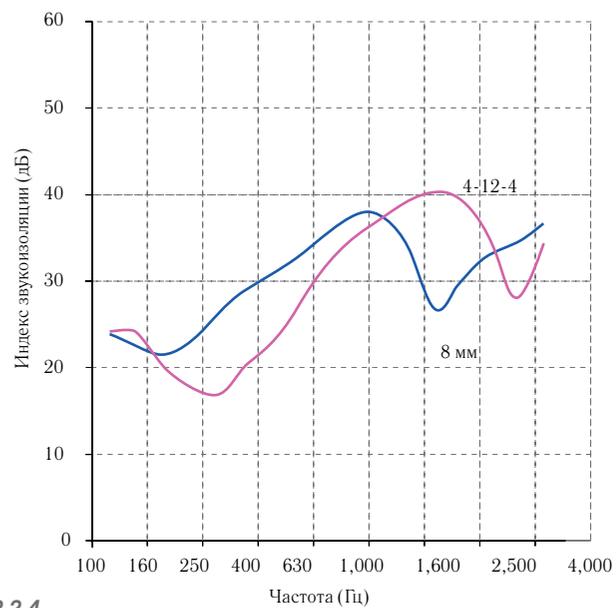
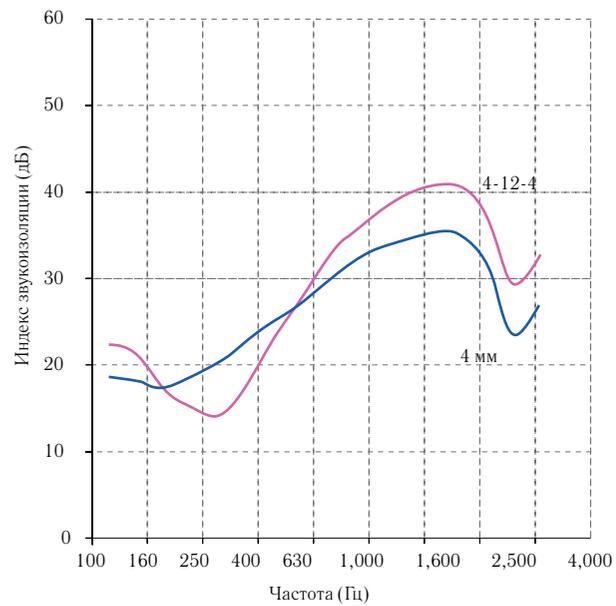


Рис. 4.2.2.4.

Сравнительные частотные характеристики изоляции воздушного шума стеклопакетами с одинаковыми стёклами и одинарным листовым стеклом [24]

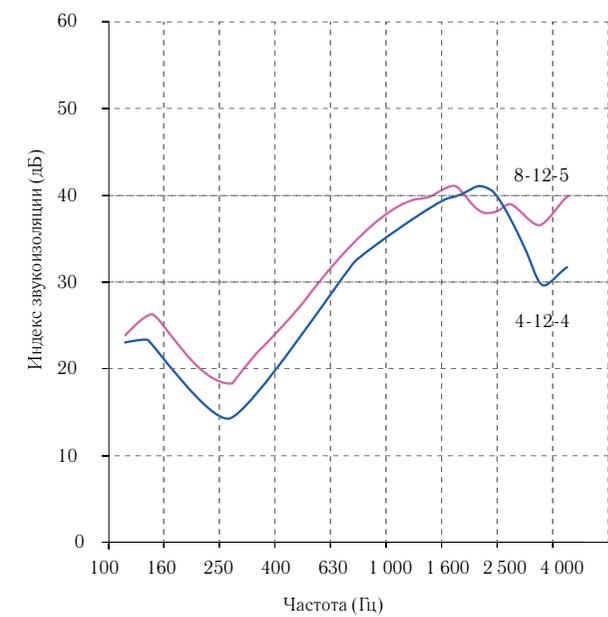


Рис. 4.2.2.5.

Частотная характеристика изоляции воздушного шума стеклопакетом со стеклами, различной толщины [24]

Наиболее эффективным техническим решением, найденным на сегодняшний день для повышения звукоизоляции светопрозрачных конструкций, является применение стеклопакетов с многослойными стёклами (триплексами) на основе шумозащитной PVB-плёнки. Эластичность акустической плёнки обеспечивает затухание колебаний в соединяемых ею пластинах за счёт трения, соответственно снижая интенсивность передачи звука в помещении.

Вместе с тем, необходимо отметить, что указанное решение позволяет существенно улучшить акустическую работу стеклопакета, опять же на высоких частотах, что хорошо видно из рис. 4.2.2.6.

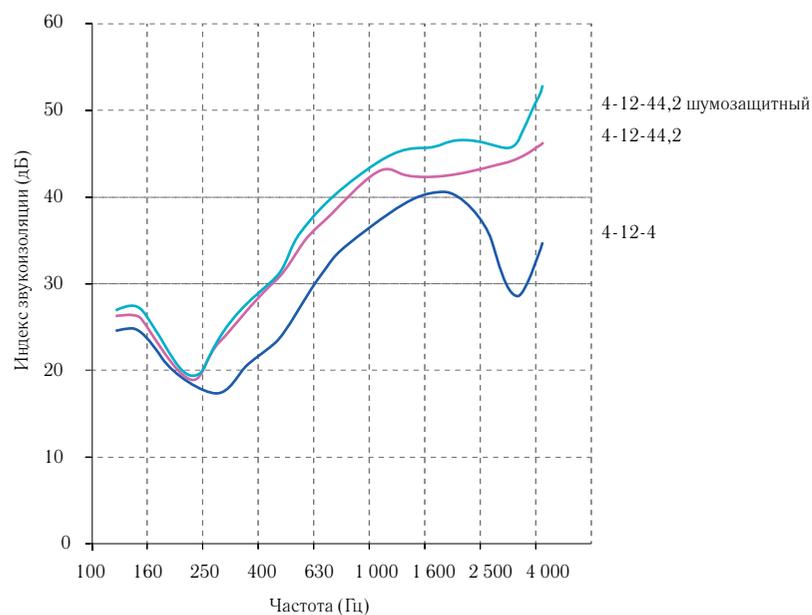
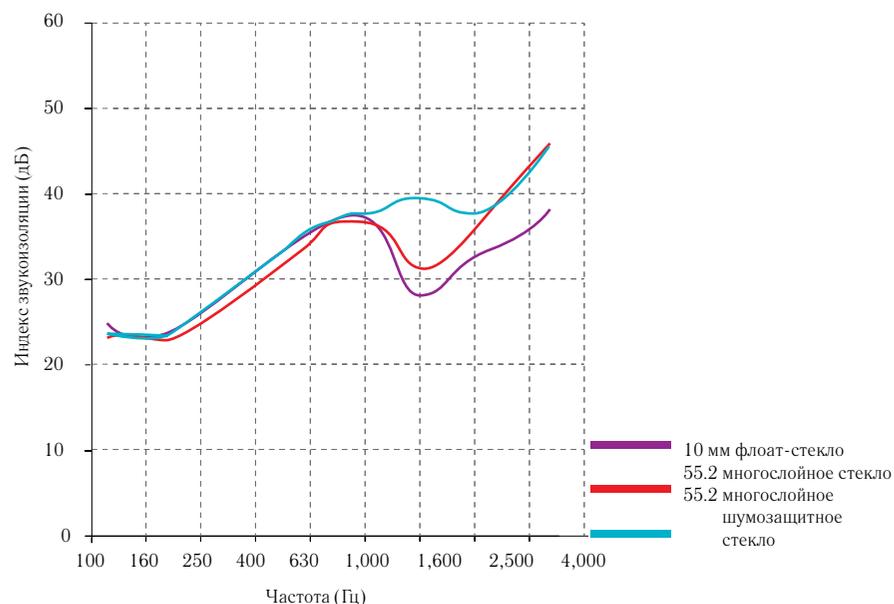


Рис. 4.2.2.6. Частотные характеристики изоляции воздушного шума многослойными стёклами и стеклопакетами с акустическим триплексом^[24]

4.2.3. Индекс изоляции воздушного шума

Частотная характеристика остекления наиболее полно позволяет судить о его звукозащитных качествах, однако далеко не всегда удобна на практике, особенно на стадии сравнительного вариантного проектирования. Для приближенной оценки звукоизоляции может быть использована величина индекса изоляции воздушного шума, обозначаемого в большинстве стран как R_w и ранее, в нашей стране как I_v .

В нашей стране, для большинства конструкций, индекс изоляции воздушного шума как правило, определялся расчётным путём по известной частотной характеристике. При этом для его вычисления применялась формула, учитывающая суммарное неблагоприятное отклонение фактической частотной характеристики ниже нормативной кривой на всём диапазоне частот.

Для определения индекса звукоизоляции светопрозрачных конструкций в настоящее время, как правило, используется метод лабораторных испытаний с последующим введением поправочных коэффициентов. В европейском стандарте ISO 717-1 введено единое обозначение индекса звукоизоляции (шумоизоляции) светопрозрачных конструкций $R_w (C; C_{tr})$. Показатели C и C_{tr} , указанные в скобках, определяют поправочные значения к показателю звукоизоляции R_w , определённого в лабораторных условиях, применительно к различным спектральным характеристикам источников внешнего шума. Соответственно C_{tr} является поправочным значением для источников средне- и низкочастотного шума (с преобладанием средних и низких частот) и C — для источников средне- и высокочастотного шума (с преобладанием средних и высоких частот). Таким образом, согласно европейским нормам, в проектных решениях, расчётное значение индекса звукоизоляции остекления R_{oc} может быть принято по индексу $(R_w + C)$ или $(R_w + C_{tr})$ в зависимости от спектральной характеристики источника шума на основании табл. 4.2.3.1^[24].

Например, для остекления с индексом звукоизоляции $R_w (C; C_{tr}) = 38 (-2; -5)$, определённым в лабораторных условиях, расчётное значение принимается равным

$R_{oc} = R_w + C_{tr} = 38 - 5 = 33$ Дб при установке окна на фасаде, ориентированном на внутригородскую магистраль и $R_{oc} = R_w + C_{tr} = 38 - 2 = 36$ Дб, если окно ориентировано на детскую площадку.

Индексы изоляции воздушного шума стеклопакетами различной конструкции приведены в табл. 4.2.3.2.

Табл. 4.2.3.1

**Выбор поправочных значений к индексу звукоизоляции
в зависимости от источника шума**

Источник шума	$R_w + C$	$R_w + C_{tr}$
Детская игровая площадка	*	
Дисотека		*
Скоростное шоссе (> 80 км/ч)	*	
Внутригородская магистраль		*
Скоростная железная дорога	*	
Железная дорога для товарных составов		*
Близко пролетающий реактивный самолет	*	
Турбовинтовые самолеты		*

Табл. 4.2.3.2

**Индексы изоляции воздушного шума
стеклопакетами различной конструкции**

№ п/п	Конструкция остекления	Индекс изоляции R_w , [дБ]
1	3-10-3	30,5
2	4-10-4	33
3	6-10-6	34,5
4	3-20-3	33
5	4-20-4	34
6	6-20-6	36



4.3. Климатические нагрузки от перепадов давлений и температур в стеклопакетах

Как уже отмечалось в главе 3, в подавляющем большинстве светопрозрачных оболочек современных зданий в качестве заполнения используются герметичные стеклопакеты с замкнутой внутренней полостью, заполненной осушенным воздухом или газом. Применение герметичных стеклопакетов в конструкциях фасадного остекления вызвало к жизни болезненную для архитекторов проблему зрительного искажения фасадной плоскости, вследствие значительных прогибов стёкол, видимых невооружённым глазом (рис. 4.3.1). В европейской строительной практике нагрузки, вызывающие эти прогибы, получили название климатических, или согласно терминологии стандарта EN 13474, — «внутренних нагрузок» в стеклопакете.



Рис. 4.3.1. Зрительные искажения фасадной плоскости зданий с герметичными стеклопакетами.

Согласно определениям европейских нормативных документов, под термином «климатические нагрузки», понимается положительное или отрицательное избыточное давление во внутренней герметичной камере стеклопакета (по отношению к величине, соответствующей моменту завершения его герметизации на производстве), возникающее при изменении атмосферного давления и температуры окружающей среды.

Очевидно, что в любой момент времени, температура и давление осушенного воздуха (газа) в замкнутой герметичной прослойке стеклопакета взаимно связаны между собой и подвергаются изменениям на протяжении всего периода эксплуатации изделия. С точки зрения теоретической физики, эта зависимость может быть описана уравнением состояния Менделеева-Клапейрона (4.3.1), из которого нетрудно увидеть прямую пропорциональную зависимость между изменением температуры и повышением-понижением внутреннего давления в прослойке.

$$P = nkT \Rightarrow P/T = \text{const} \quad (4.3.1)$$

где

$n = Na / V\mu$ — концентрация газа (число частиц в единице объёма газа);

Na — число Авогадро — const;

$V\mu$ — молярный объём газа;

$k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана

Начальное значение климатической нагрузки (отрицательного внутреннего давления) создаётся непосредственно в первые часы после герметизации стеклопакета за счёт удаления водяного пара из воздушной прослойки во влагопоглотитель, заполняющий дистанционную рамку. При температуре его герметизации $+20^\circ\text{C}$ и влажности 50% парциальное давление водяного пара будет равно 8,5 мм.рт.ст. После осушения это давление может упасть до 1,0 или на 7,5 мм.рт.ст. что составляет 1% от атмосферного давления 750 мм.рт.ст. Влияние этого фактора невелико и, как правило, при оценке величины климатической нагрузки не учитывается.

Гораздо большее влияние на величину избыточного давления оказывают изменения атмосферного давления и температуры окружающей среды, при транспортировке, монтаже и эксплуатации стеклопакета. Температура изготовления стеклопакета на производстве регламентируется промышленными стандартами и составляет + 16...+ 24 °С (в России — согласно ГОСТ 24866-99). В момент изготовления, т.е. при равенстве температуры окружающей среды (*атмосферы* — англ. *atmosphere*) — T_a и температуры воздуха в прослойке T_i (*внутренняя*; англ. — *internal*), стеклопакет имеет прямоугольную форму (рис. 4.3.2).

Атмосферное давление воздуха снаружи P_a и внутри стеклопакета P_i , соответствующее данному моменту времени равны между собой — конструкция стеклопакета находится в состоянии **статического равновесия**.

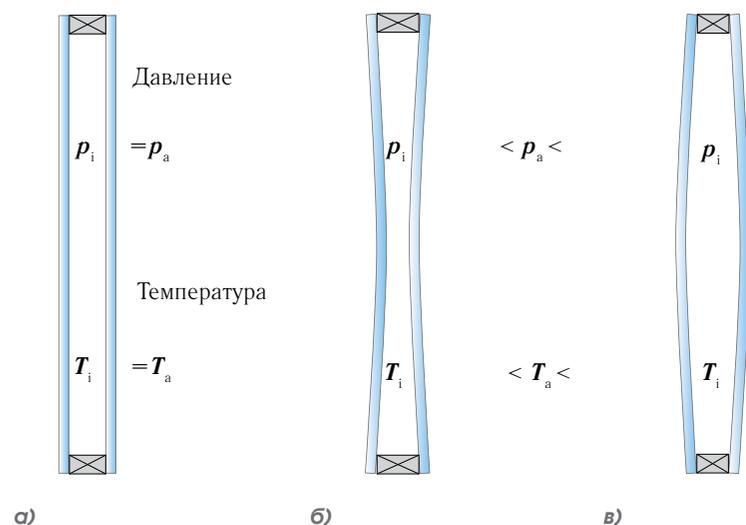


Рис. 4.3.2.

Схема пространственной работы однокамерного стеклопакета под действием климатических нагрузок.

а) отсутствие климатических нагрузок в момент изготовления на производстве;

б) и в) знакопеременные климатические нагрузки при понижении-повышении внутреннего давления в воздушной полости стеклопакета

При понижении температуры T_i внутри стеклопакета, согласно уравнению (4.3.1), будет происходить сжатие газа в воздушной прослойке (повышение концентрации частиц в единице объёма), сопровождающееся падением внутреннего давления P_i (см.рис. 4.3.2). Соответственно, нагревание воздуха в прослойке сверх температуры изготовления, будет опровергаться разрежением газа и повышением внутреннего давления P_i .

Избыточное (отрицательное или положительное) давление $P_0 = P_i - P_a$, возникающее при этом в воздушной полости, будет воздействовать на стёкла пакета в качестве равномерно распределённой нагрузки, вызывая их прогиб, математически описываемый закономерностями теории упругости. В частности, для круглого однокамерного стеклопакета, в котором отсутствуют напряжения в угловых зонах, уравнение изгиба стеклянной пластины может быть записано в виде (4.3.2)

$$q = \frac{64 \times f}{r^4} \times \frac{E \cdot t^3}{12 \times (1-\nu^2)} \times \frac{(1+\nu)}{(5+\nu)} \quad (4.3.2)$$

где

q — равномерно распределённая нагрузка на стекло, кН/м²

f — прогиб в центре пластины, м;

r — радиус круглой пластины, м;

E — модуль упругости (Юнга), для стекла $E = 7,3 \cdot 10^7$ кН/м²;

t — толщина стеклянной пластины, м.

ν — коэффициент Пуассона, (для стекла $\nu = 0,23$);

Введя показатель **характеристической жесткости стеклянной пластины A**, выражаемый как

$$A = (1 + \nu) / (12 (1 + \nu^2) \times (5 + \nu)) \quad (4.3.2a)$$

уравнение может быть приведено к виду (4.3.3), удобному для практического использования, т.е.

$$q = A \times f \times E \times t^3 / r^4 \quad (4.3.3)$$

Необходимо отметить, что истинная природа компенсации избыточного давления внутри стеклопакета, и соответственно закономерности сохранения его статического равновесия как конструктивной системы на протяжении всего периода эксплуатации, в настоящее время остаются малоизученными. Ровно настолько же не существует какого-либо единого мнения по поводу оценки величины суммарной климатической нагрузки, учитываемой при проведении инженерных расчётов, и построении расчётных схем, корректно учитывающих условия пространственной работы стеклопакета.

Очевидно, что в этом отношении принципиально важными являются не только специфика работы стеклянных пластин под нагрузкой, кратко проанализированная в главе 2, но и характер склеивания стеклопакета, влияющий на краевые условия, описывающие подвижность стёкол в районе герметизирующего контура.

Определённую путаницу в понимание природы явлений на стадии инженерного проектирования, вносит терминология европейского стандарта EN 13474 [96], классифицирующее избыточное давление в воздушной полости как «изохорное», т.е. соответствующее термодинамическому процессу, протекающему при постоянном объёме газа. В точной формулировке указанного стандарта (п.3 — терминология) определение «изохорное давление» выглядит следующим образом. А именно — «разница давлений, возникающая между давлением во внутренней полости стеклопакета и в окружающей среде, вследствие изменения температуры внутри стеклопакета или атмосферного давления, в случае, если пластины стекла не имеют возможности прогибов».

Из этой формулировки нетрудно заметить, что терминология европейского документа выстраивается из предположения, что объём воздушной прослойки не изменяется. Примечательно, что в п. 5.4.2 этого же документа сделана оговорка на то, что «изохорное давление может быть снижено за счёт гибкости стекла (а также за счёт использования соответствующего герметика краевой зоны). Малый прогиб обоих стёкол, приводящий к изменению объёма воздушной

прослойки, может значительно понизить внутреннее давление. Стёкла будут прогибаться (редко более чем на несколько мм) до момента достижения статического равновесия. Этот прогиб будет вызывать напряжения, которые должны быть учтены в расчётах».

Очевидно что, корректная трактовка законов классической термодинамики, говорит о том, что при изменении концентрации газа, находящегося в замкнутом объёме, и описываем уравнением состояния (4.2.1), для достижения равновесного состояния, необходимо изменение общего объёма, занимаемого этим газом. Если принять для рассмотрения некоторую идеальную модель стеклопакета с абсолютно гибкими стёклами, следующими за изменениями внутреннего давления по закону «воздушного шара», то можно оценить возможную величину изменения объёма воздушной прослойки стеклопакета в обычных эксплуатационных условиях.

Как показывают результаты исследований, проведённых в МГСУ [22], в климатических условиях г. Москвы, сочетание изменения температуры окружающей среды в интервале от +20 °С (293 °К) — при изготовлении до -30 °С (243 °К) — при транспортировке и монтаже конструкции и изменения атмосферного давления от 720 до 770 мм.рт.ст, может вызвать изменение объёма воздушной прослойки порядка 17%. К этому можно добавить уменьшение давления по высоте здания, что примерно составляет 1 мм.рт.ст. на 10 м высоты. На 30 этаже, при высоте 100 м это составляет еще 10 мм.рт.ст. или 13%. Таким образом, при сочетании неблагоприятных условий, изменение объёма воздушной прослойки может достигнуть порядка 25%.

При этом согласно уравнению (4.3.3), на круглую стеклянную пластину с радиусом R=0,6 м и толщиной t=4 мм, при прогибе в центре до 3 мм, будет действовать нагрузка:

$$q = \frac{64 \times 0,003}{0,6^4} \times \frac{7,3 \times 10^7 \times 0,004^3}{12 \times (1-0,23^2)} \times \frac{(1+0,23)}{(5+0,23)} = 0,143 \text{ кН/м}^2$$

При малой жёсткости стёкол пакета, восстановление статического равновесия под действием избыточного давления будет

достигаться за счёт компенсирующего прогиба гибких стеклянных пластин — во внутреннюю полость при повышении внешнего (атмосферного) давления или понижении температуры внутри прослойки; и соответственно — наружу — при понижении внешнего (атмосферного) давления или повышении температуры внутри прослойки (см. рис. 4.3.2).

Результаты исследований, показывают [22], что при условии изготовления стеклопакета из стёкол, толщиной 4 мм, влияние жёсткости стекла на компенсирующий прогиб пластины невелико — стекло легко прогибается под нагрузкой, до прогибов, близких по величине к видимой критической границе до которой человек зрительно не замечает изгиба. Многолетняя архитектурная практика показывает, что эта граница, как правило, оценивается соотношением габаритных размеров пластины (величины расчётного пролёта) — l и прогиба в центре пластины f как $f/l \leq 1/200-1/300$. При превышении прогибов наружного стекла сверх этих значений, оптические искажения становятся заметными при восприятии общей архитектурной эстетики здания (рис. 4.3.3).

При сочетании неблагоприятных климатических условий и малой толщине воздушной прослойки (6–10 мм) суммарный встречный прогиб тонких стёкол во внутреннюю полость может превысить по величине межстекольное расстояние, вызывая так называемое «схлопывание стеклопакета», как правило, сопровождающееся его разрушением. На практике это чаще всего происходит при вывозе больших стеклопакетов с производства на объект в сильные морозы. Общепринятой температурой наружного воздуха, критической для проведения монтажей светопрозрачных конструкций, считается отрицательная температура ниже — 15–20 °С.

При увеличении толщины стекла до 8...10мм влияние фактора жёсткости пластины на величину компенсирующего прогиба становится более заметной. Стеклянная пластина включается в работу с возникновением в ней мембранных напряжений, прогиб пластины уменьшается. Однако, как показывает практика, увеличение толщины стекла далеко не всегда позволяет окончательно справиться со зрительными искажениями на фасаде. Более ради-

кальное решение представляет концепция «двойного стеклянного фасада», рассмотренная в главе 5.

В настоящее время, большинство европейских инженеров вынуждены признавать, что достижение идеально ровной фасадной плоскости здания при традиционном пакетном остеклении, является практически не разрешимой задачей. В качестве рекомендации по минимизации искажений наружной плоскости остекления, в европейских литературных источниках можно встретить указание на использование стеклопакетов с различной толщиной стёкол (рис. 4.2.4) и жёстких дистанционных рамок из нержавеющей стали и стеклопластика [36].

Применение стеклопакета с различной толщиной стёкол позволяет получить уменьшение прогиба наружного стекла, иллюстрируемое простой математической зависимостью, записываемой в виде уравнения (4.3.4).

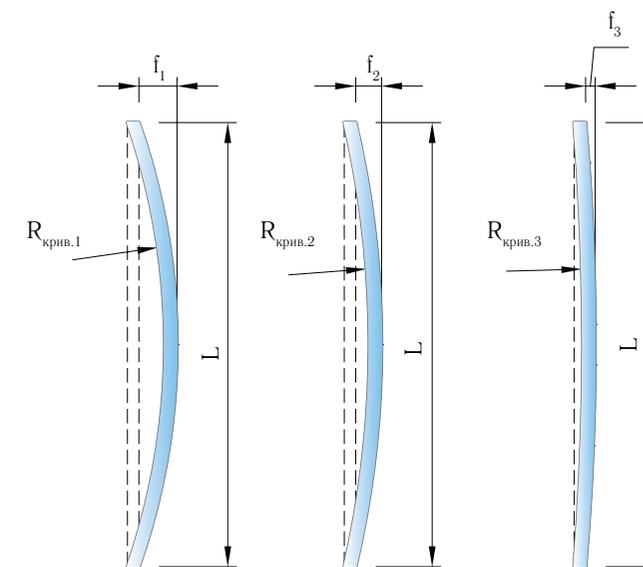


Рис. 4.3.3.

Соотношение радиуса искажающей кривизны стеклопакета с его габаритными размерами и прогибом наружного стекла

При использовании стёкол одинаковой толщины, избыточное давление одинаково воздействует на оба стекла. В этом случае, согласно уравнению (4.3.3), прогиб стеклянной пластины будет находиться в обратной пропорциональной зависимости от толщины стекла в третьей степени, т.е.

$$f = q \times r^4 / A \times E \times t^3 \quad (4.3.4)$$

При увеличении толщины наружного стекла, в два раза (например, с 4 до 8 мм) прогибы наружного и внутреннего стекла будут соответственно соотноситься как $1/2^3 = 1/8$.

Наряду с чисто эстетическими проблемами, принципиально значимыми для архитектора, климатические нагрузки являются важнейшим фактором с точки зрения оценки долговечности и эксплуатационной безопасности сооружения, особенно в фасадных конструкциях со структурным остеклением.

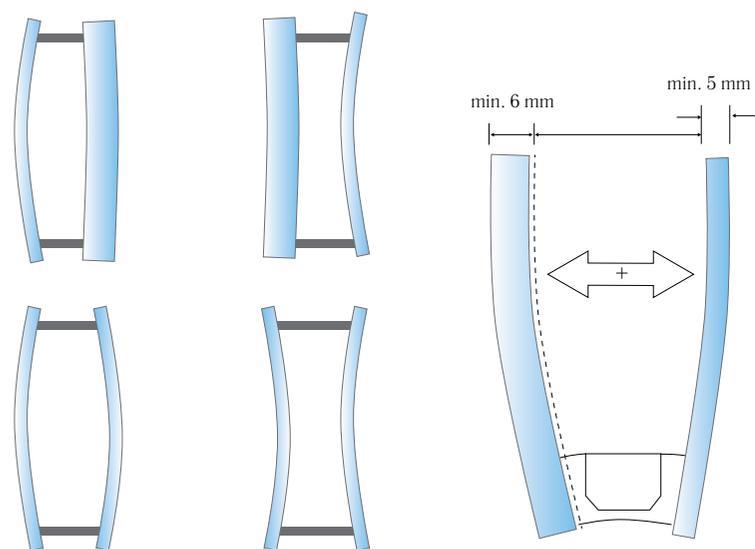


Рис. 4.3.4. Перераспределение климатических нагрузок в стеклопакете с различной толщиной стёкол

Согласно EN 13474, расчётная величина избыточного давления P_0 в воздушной полости стеклопакета, классифицируемое как расчётная внутренняя (климатическая) нагрузка, определяется тремя отдельно учитываемыми факторами, А именно:

- изменением температуры окружающей среды, вызывающий быстрое изменение температуры в воздушной полости стеклопакета (за счёт высокого коэффициента теплопроводности и малой тепловой инерции стеклянных пластин);
- изменением внешнего давления, за счёт общего изменения давления атмосферы;
- изменением внешнего давления, за счёт разницы геодезических высот между местом производства и эксплуатации стеклопакета

Величина избыточного давления, возникающего за счёт разницы геодезических высот $P_{H.0}$ определяется на основании п.5.3.3 EN 13474 согласно уравнению (4.3.5) как

$$P_{H.0} = C_H (H - H_p) \quad (4.3.5)$$

где

C_H — коэффициент, учитывающий рост атмосферного давления на высоте — $C_H = 0.0012 \text{ кН/м}^3$ на каждый метр увеличения высоты (что составляет примерно 1 мм.рт.ст. на 10 м высоты)

$(H - H_p)$ — разница геодезических высот места эксплуатации (H) и места производства стеклопакета (H_p), [м]

Величина избыточного давления $P_{C.0}$, возникающего за счёт изменений температуры и атмосферного давления во время эксплуатации и во время производства стеклопакета, определяется на основании п. 5.3.3 EN 13474 согласно уравнению (4.3.6) как

$$P_{C.0} = C_C (T - T_p) - (P - P_p) \quad (4.3.6)$$

где

C_C — коэффициент, учитывающий увеличение давления с ростом температуры $C_C = 0,34 \text{ кН/м}^2$ на Кельвин

$(T - T_p)$ — разница температур в воздушной полости стеклопакета во время производства T_p и в данный момент эксплуатационного периода — T ;

$(P - P_p)$ — разница атмосферных давлений во время эксплуатации P и во время производства P_p стеклопакета.

Если проанализировать значение коэффициента $C_c = 0,34 \text{ кН м}^2$ в уравнении (4.3.6), то можно выделить количественное значение фактора изменения температуры в формировании напряжённого состояния стёкол пакета. При постоянном атмосферном давлении ($P - P_p = 0$) и отсутствии перепада геодезических высот между заводом-изготовителем и возводимым объектом, из уравнения в виде (4.3.6) следует, что изменение температуры внутри воздушной прослойки стеклопакета на 1°C , повлечёт за собой изменение внутреннего давления в $0,34 \text{ кПа}$ ($0,34 \text{ кН/м}^2$). Эта величина приближённо равна нормативному значению средней составляющей ветровой нагрузки для г. Москвы на высоте 50 м над поверхностью земли с учётом повышающего коэффициента надёжности по ветровой нагрузке $\gamma_f = 1,4$ (см. раздел 4.4). Соответственно изменение температуры внутри воздушной прослойки стеклопакета на 3°C , вызывает климатические нагрузки во внутренней полости стеклопакета порядка $1,0 \text{ кН/м}^2$ [36].

Согласно требованиям стандарта EN 13474, расчёт стеклопакета на действие внутренних нагрузок должен производиться при наиболее неблагоприятном сочетании факторов для зимних и летних условий, принимаемых на основании табл. 4.3.1, в случае если точные значения нагрузок в уравнениях (4.3.5) и (4.3.6), не могут быть определены. Значения, приведённые в табл. 4.3.1 справедливы для прозрачных стёкол при общем поглощении тепла стеклопакетом не превышающим 35% (см. разделы 2.2.7 и 4.1.3).

Климатические нагрузки, прикладываемые циклически и изменяемые от сезона к сезону, через определённый период эксплуатации стеклопакета, в состоянии привести к возникновению микротрещин герметика в краевой зоне стеклопакета в местах сопря-

Расчётные значения
внутренних (климатических) нагрузок в стеклопакете
(согласно табл. 1 EN 13474)

Расчётные условия	Расчётное избыточное давление, (кН/м ²)		
	Избыточное давление $P_{c,0}$, от действия климатических факторов (перепад температур и атмосферного давления), (кН/м ²)	Избыточное давление $P_{н,0}$, от действия перепадов высоты, (кН/м ²)	
		При эксплуатации на высоте до 400 м	При эксплуатации на высоте до 700 м
Лето	+ 12,0	+3,6	+8,4
Зима	-15,0	-3,6	-8,4

жения герметика со стеклом и, соответственно, к последующему разрушению герметизирующего контура.

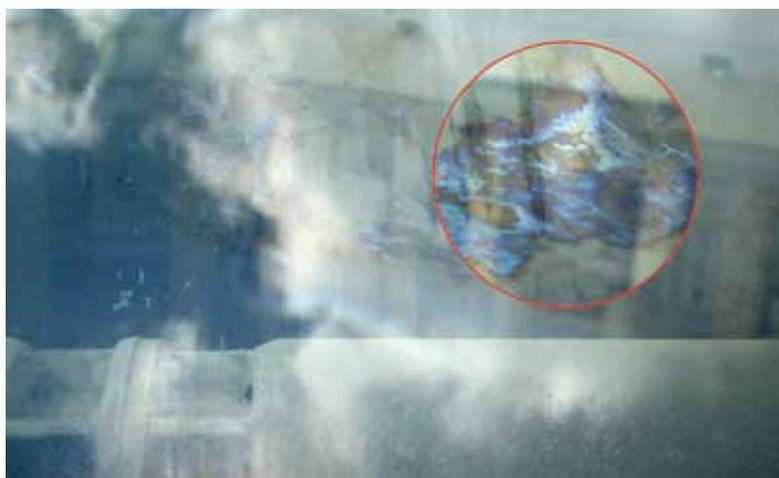
Через микротрещины, вызываемые воздействием климатических нагрузок, в стеклопакет будет попадать влажный наружный воздух. На протяжении некоторого периода эти незначительные поступления влаги компенсируются влагопопителем, находящимся в дистанционной рамке. Однако по мере роста степени негерметичности краевой зоны, молекулярное сито полностью насыщается влагой, и перестает выполнять свои функции. Это явление сопровождается видимыми признаками разгерметизации стеклопакета — выпадением во внутренней полости конденсата или появлением воды. Если в стеклопакете использованы стёкла с покрытиями из оксидов металлов, то в случае разгерметизации пакета невооружённым глазом будут видны признаки их коррозии (рис. 4.3.5).

Таким образом, климатические нагрузки определяют относительно невысокий срок службы стеклопакетов, по различным данным — 20–30 лет. В европейских литературных источниках можно встретить указание на долговечность стеклопакета из условия расчётного срока службы влагопоглотителя, в среднем оцениваемую в 30–35 лет [35].

В конструкциях стоечно-ригельных фасадов с механическим закреплением стеклопакетов (см. главу 3) описанные выше разрушающие напряжения в герметике краевой зоны представляют



а)



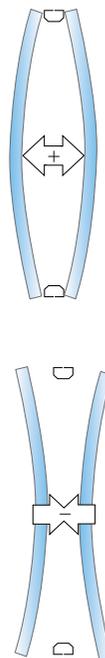
б)

Рис. 4.3.5.

Разрушающие напряжения в герметизирующем контуре стеклопакета под действием климатических нагрузок и внешние признаки разгерметизации стеклопакетов.

а) наличие воды внутри стеклопакета;

в) коррозия покрытия из оксидов металлов на внутреннем и внешнем стекле.



существенную проблему с точки зрения расчётного срока службы и окупаемости сооружения, однако, в строгом понимании, не оказывают влияния на эксплуатационную безопасность конструкций.

Вместе с тем, для фасадов со структурным остеклением, учёт климатических нагрузок, является важнейшим фактором в обеспечении безопасности, не только с точки зрения их воздействия на герметизирующий контур самого стеклопакета, но и при расчёте несущей способности силиконового герметика, за счёт которого осуществляется вклеивание стеклопакета в рамный профиль (см. главу 3). Как уже отмечалось в главе 3, в Европе это требование жёстко регламентируется соответствующими нормативными документами и соответствующими техническими рекомендациями, согласно которым производится расчёт конструкций структурного остекления на действие сочетания ветровой и климатической нагрузок (см. главу 3 и раздел 4.7).

В инженерных расчётах, построенных на базе европейских нормативных документов, механизм достижения стеклопакетом статического равновесия под действием внутренних (климатических) нагрузок^[33], и пространственная работа стеклопакета учитывается введением **понижающего безразмерного коэффициента жёсткости f** , зависящего от габаритных размеров стеклопакета, соотношения сторон, толщины стёкол и воздушной прослойки и составляющего в общем случае $f = 0,02...0,04$ (см. раздел 4.7). Таким образом, для стеклопакета с заданными геометрическими размерами, расчётное значение климатической нагрузки принимается на основании уравнения (4.3.7), как

$$\Delta P = f P_0 \quad (4.3.7)$$

где

ΔP — расчётное значение климатической нагрузки [$\text{кН}/\text{м}^2$]

P_0 — избыточное давление в воздушной полости стеклопакета, определяемое согласно уравнениям (4.3.5) и (4.3.6);

f — безразмерный понижающий коэффициент пространственной работы (жёсткости) стеклопакета составляющий порядка 0,02...0,04

Если принять неизменной величину атмосферного давления, то можно оценить расчётное значение климатической нагрузки, которое должно быть принято для наиболее неблагоприятных зимних температурных условий г.Москвы согласно требованиям европейских нормативов. При условии изготовления стеклопакета на производстве при температуре воздуха $T_{np} = +20^{\circ}\text{C}$ и монтаже его в неотапливаемом здании при температуре $T_n = -20^{\circ}\text{C}$, избыточное отрицательное давление в воздушной полости стеклопакета и расчётное значение климатической нагрузки согласно уравнению (4.3.7) дадут значения:

$$P_{c:0} = 0,34 \Delta T = 0,34 (T_n - T_{np}) = 0,34 ((-20) - (+20)) = -0,34 \times 40 = -13,6 \text{ кН/м}^2$$

$$\Delta P = i P_0 = 13,6 \times (0,02...0,04) = 0,3...0,6 \text{ кН/м}^2$$

Как показывает практический опыт, европейские инженерные методы расчётов демонстрируют удовлетворительную работоспособность в части обеспечения определённого запаса надёжности, гарантирующего отсутствие разрушения стеклопакета под действием климатических нагрузок в обычных (не экстремальных) эксплуатационных условиях. Вместе с тем, выбор толщины стекла на основании указанных методов не гарантирует отсутствие оптических искажений в плоскости остекления на протяжении всего периода эксплуатации, за счёт трудно прогнозируемой формы изгиба стеклянных пластин.

Фактические деформации стёкол и их прогибы в эксплуатационных условиях, выражающиеся в зрительных искажениях фасадной плоскости, определяются климатическими условиями наружной среды в данный момент времени (температура и атмосферное давление), а также технологическими параметрами стеклопакета и условиями начала эксплуатации. Как правило, стеклопакеты, подвергшиеся воздействию значительных климатических нагрузок при монтаже в здании, уже никогда, на протяжении всего срока их службы, не приобретают идеального неискажаемого зрительного эффекта. Общая картина постоянно изменяется и, очевидно, зави-

сит от температуры воздуха в межстекольном пространстве, однако никогда не даёт эффекта идеально ровной стеклянной поверхности.

Аналогично многим другим принципиальным вопросам в области проектирования светопрозрачных конструкций, в данном случае, мы вынуждены говорить о недостатке системных научных исследований, позволяющих оценить как конкретный вклад того или иного фактора, так и общий характер работы конструкции в целом. Технологические и конструктивные пути решения проблемы представляют в настоящее время определённую сферу поиска для инженеров по всему миру. В этом контексте могут быть рассмотрены различные климатические мини-клапаны, интегрируемые в дистанционную рамку и выравнивающие давление во внутренней полости, а также инновационные идеи в области разработок вакуумных стеклопакетов, более подробно рассмотренные в **главе 5**.

Необходимо также отметить, что специфические для пакетного остекления нагрузки, рассмотренные в настоящем разделе, даже не упомянуты в действующей редакции базового отечественного нормативного документа — СНиП «Нагрузки и воздействия», в который очевидно должны быть внесены соответствующие дополнения. Тем более, что это является важным не только с точки зрения проектирования светопрозрачных конструкций большой площади, но в равной степени — и применительно к оконным блокам со стеклопакетами, используемым в массовом строительстве.

4.4. Ветровые нагрузки

Как уже отмечалось в главе 2, американская идея лёгкого фасадного ограждения, подвешенного с внешней стороны несущего каркаса, радикально изменила не только общие технологические тенденции в производстве ограждающих конструкций, но и положила начало новой теории проектирования пространственных наружных оболочек зданий и сооружений.

Интенсивные научные исследования ветровых нагрузок, воспринимаемых лёгкими навесными ограждениями большой площади, были начаты в Европе и США после ряда разрушительных ураганов, произошедших за последние 25 лет XX столетия (1974–1999 гг) со значительными экономическими потерями и человеческими жертвами. Так, ураганы в Западной Европе 1987, 1990 и 1999 годов унесли жизни более 380 человек, циклон Трейси в Австралии — более 50. При ураганах Хуго (1989 г.) и Эндрю (1992 г.) в США погибло 105 человек. Общий экономический ущерб от этих стихийных бедствий составил более 65 миллионов долларов США.

Немаловажную роль в становлении современных методов расчёта ветровых нагрузок сыграло и оживление в строительстве небоскрёбов, наблюдавшееся в 1960–1970-е годы, особенно в Северной Америке, Японии и Австралии. В 1970–1980-е годы XX столетия была осуществлена многоцелевая исследовательская программа, включавшая в себя полномасштабные натурные измерения и моделирование в аэродинамической трубе. Наиболее полные и хорошо оформленные документально наблюдения были проведены в г. Торонто (Канада) для высотного здания Коммерс Корт Билдинг (Commerce Court Building, Toronto). Приблизительно в это же время в английском городе Эйлсбери были проведены аналогичные исследования для малоэтажного здания.

Примечательно, что в результате этих исследований, уязвимость наружных ограждающих конструкций из стекла по отношению как непосредственно к статическому ветровому давлению, так и к летящим обломкам и мусору во время урагана, была выделена в качестве одной из двух основных проблем, важнейших для стро-

ительства высотных зданий (рис. 4.4.1). В качестве второй была названа проблема высокой амплитуды колебаний верхней части здания, значительно осложняющая его эксплуатацию.



Рис. 4.4.1.

Повреждения высотного здания со светопрозрачным фасадом в результате урагана^[44]

В нормативах США, Канады, Австралии, Китая и Гонконга, ветровая нагрузка, действующая на остекление высотных зданий (свыше 18 м до 500 м согласно североамериканской классификации), рассматривается в качестве основного разрушающего фактора, возникающего вследствие циклического приложения нагрузки. В частности, в п.9.4.5 американского норматива ASCE/SEI 7-05 чётко указывается, что для высотных зданий, «ветровая нагрузка является основным фактором, учитываемым при проектировании светопрозрачных конструкций и элементов из закрепления».

Тем не менее, в общемировой практике до сих пор не существует единого мнения в части теоретических предпосылок, определяющих некоторый системный подход к расчётам ветровых нагрузок, действующих на светопрозрачную оболочку как единую конструктивную

систему. Как уже отмечалось в **главе 3**, в качестве упрощённой модели в светопрозрачной оболочке фасада, выделяется три конструктивных элемента, рассматриваемых по отдельности — несущие профильные элементы; крепёжные кронштейны и элемент заполнения в виде стеклопакета или стекла (наружный стеклянный экран в системах «двойных фасадов» — см. гл. 5).

Из материалов **раздела 3.2** можно увидеть, что основные правила построения расчётных схем профильных элементов предельно просты и демонстрируют хорошую работоспособность на практике. Наибольшие противоречия, порожденные неясностью в теоретических проблемах прочности стекла (см. гл. 2) и закономерностях пространственной работы стеклопакетов (см. раздел 4.7), относятся к расчётам стеклянных пластин и прогнозированию их возможного разрушения при действии ветровой нагрузки.

Классические методы расчёта строительных конструкций по методу допустимых напряжений и деформаций не отражают реального сопротивления разрушению хрупкого материала и, как правило, дают весьма неточные результаты. Для обеспечения надёжности конструкций, используемые в таких методиках прочностные характеристики стекла закладываются с повышающими коэффициентами порядка $k = 2,5...3$ по отношению к результатам контрольных испытаний^[35].

За последние годы в Европе, США, Канаде, Австралии и Китае наибольшую популярность получили методики расчёта стеклянных пластин по критерию вероятности разрушения, основанные на работе Бланка. Вероятностный метод, базирующийся на предположениях механики разрушения, хорошо отражает работу стекла и является намного более точным по сравнению с методом допустимых напряжений. Его существенным недостатком является высокая сложность и трудоёмкость. Тем не менее, эта модель хорошо соответствует не только макроструктуре стекла, но и технологическим особенностям его изготовления (см. гл. 2).

Физическая сущность метода заключается в оценке вероятности разрушения стекла, покрытого невидимыми волосяными трещина-

ми, имеющими различные геометрические размеры и хаотичную ориентацию под действием внешней силы, резко изменяющейся во времени. Под изменяемой внешней силой в данном случае подразумевается циклическая ветровая нагрузка (непостоянные во времени порывы ветра), действующая одновременно с процессами коррозии (выщелачивания) стекла при действии атмосферной влаги. Под действием циклической ветровой нагрузки происходит постепенный рост микротрещин, приводящий к разрушению стеклянной пластины через определённый интервал времени. Таким образом, оценка вероятности разрушения производится с учётом длительности действия нагрузки (рис. 4.4.2).

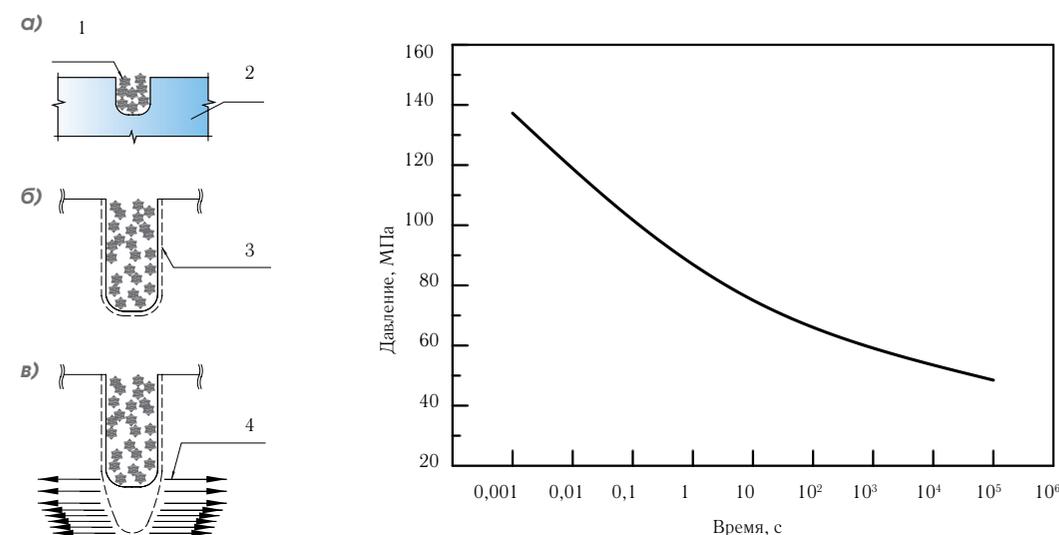


Рис. 4.4.2.

Формирование растягивающих напряжений в поверхностной микротрещине стекла.

а) взаимодействие с атмосферной влагой;

б) углубление трещины за счёт процессов коррозии (выщелачивания);

в) возникновение растягивающих напряжений под действием ветровой нагрузки;

г) зависимость прочности стекла на растяжение от длительности действия нагрузки^[44]

1 — водяной пар; 2 — стекло; 3 — углубление за счёт процессов коррозии (выщелачивание);

4 — возникновение растягивающих напряжений под действием ветровой нагрузки

Если для конкретной стеклянной пластины смоделировать некоторый цикл нагружения переменными во времени ветровыми нагрузками, то, на основе математических методов теории вероятности, можно вычислить прирост растягивающих напряжений σ_t , приводящих к разрушению стекла в течение некоторого расчётного времени T .

Согласно американскому стандарту ASCE/SEI 7-05, аккумуляция разрушающих напряжений в стекле D , характеризующих явление так называемой «статической усталости» может быть описана уравнением (4.4.1) как:

$$D = \int_0^T [\sigma(t)]^n dt \quad (4.4.1)$$

где
 $\sigma(t)$ — изменяемое во времени напряжение;
 T — время действия нагрузки;
 n — величина, изменяемая от 12 до 20.

В качестве базовой величины, в североамериканских нормах принимается нагрузка P_{60} , определяемая экспериментально для конкретной стеклянной пластины и приводящая к её разрушению в течение 60-ти секунд (1 минуты), которая связывается с нагрузкой P_f , приводящей к разрушению этой же пластины в течение некоторого периода действия нагрузки T_f соотношением:

$$P_{60} = P_f [T_f / 60]^{1/n} \quad (4.4.2)$$

Оценочный критерий вероятности разрушения POF (probability of failure — англ.), в большинстве случаев принимается равным $POF = 0,008$ и может быть определён на основании теории Вейбулла [45] как

$$POF = 1 - e^{-B} \quad (4.4.3)$$

где
 e — натуральное число;
 B — показатель, отражающий риск разрушения, определяемый как

$$B = (A/A_0) (S_{m,p,r}/S_0) \quad (4.4.4)$$

где
 A_0 — площадь базовой стеклянной пластины;
 S_0 — характеристическая прочность базовой стеклянной пластины;
 A — площадь рассчитываемой стеклянной пластины;
 $S_{m,p,r}$ — прочность рассчитываемой стеклянной пластины, зависящая от параметра Вейбулла — m , величины нагрузки — p и соотношения сторон — r .

Согласно канадскому нормативу CAN/CGSB-12.20-M89 [83], значения m , S_0 и A_0 соответственно принимаются равными:

$$m=7; S_0 = 32,1 \text{ МПа}; A_0 = 1 \text{ м}^2.$$

По сути, описанные методики сводятся к прогнозированию работы одинарного остекления во время урагана, однако не учитывают закономерности перераспределения нагрузок в стеклопакете, регламентируемых европейским стандартом EN 13474 [96] и в частности рассмотренных в разделе 4.3 (климатические нагрузки) (рис. 4.4.3).

Относительно простой метод, базирующийся на понятии «допустимой ветровой нагрузки на остекление», учитывающий указанные факторы, был предложен японскими инженерами в результате исследовательского проекта, включавшего в себя большое количество натуральных экспериментов и вычислений [32]. Согласно указанному методу, допустимая ветровая нагрузка на остекление P определяется согласно уравнению (4.4.5) как

$$P = \frac{300k_1k_2}{A} \left(t + \frac{t^2}{4} \right) \quad (4.4.5)$$

где

P — допустимая ветровая нагрузка, Н/м²;

k_1 — коэффициент прочности стекла

k_2 — коэффициент типа остекления;

A — площадь остекления, м²;

t — толщина стекла (номинальная толщина стекла для триплекса), мм;

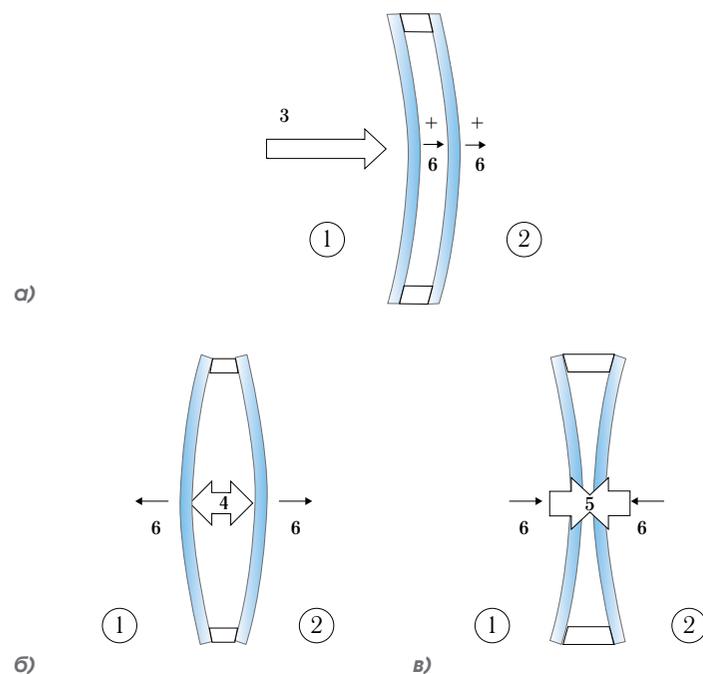


Рис. 4.4.3.

Перераспределение нагрузок между стёклами стеклопакета (согласно Прил. В EN 13474)

а) при действии ветровой нагрузки;

б) и в) при действии климатических (внутренних) нагрузок)

1 — внешняя среда; 2 — внутреннее пространство помещения; 3 — давление ветра; 4 — избыточное положительное давление под действием климатических (внутренних) нагрузок; 5 — избыточное отрицательное давление под действием климатических (внутренних) нагрузок; 6 — направление прогибов стёкол

Коэффициент типа остекления k_2 — в формуле (4.4.5) определяется для трёх типов конструкций: 1) одинарное флоат-стекло (стеклянная пластина); 2) безопасное стекло (триплекс) из двух стёкол, с суммарной толщиной образующих пластин, учитываемой показателем номинальной толщины t ; 3) однокамерный стеклопакет с одинаковыми и различными по толщине стёклами при максимально допустимом соотношении толщин t_1 , более толстого стекла и более тонкого стекла t_2 соответственно не выше $t_1 / t_2 = 2,5$.

Значения коэффициента прочности для различных типов стекла k_1 полученные на основании закономерностей (4.4.1) и (4.4.4) с вероятностью разрушения 1/1000, приведены в табл. 4.4.1.

Табл. 4.4.1

Коэффициент прочности k_1 для различных типов стекла

Тип стекла	Толщина стекла	k_1
Флоат-стекло	≤ 8 мм	1,0
	9–12 мм	0,9
	13–20 мм	0,8
	21 мм \leq	0,75
Термоупроченное стекло		2,0
Закалённое стекло		3,5

Значения коэффициента типа остекления k_2 для однокамерных стеклопакетов учитывались, исходя из совместного действия ветровой и климатической нагрузок применительно к метеорологическим условиям ураганов в Японии (с низким атмосферным давлением (порядка 940 Па)). Согласно [32], при условии изготовления стеклопакета при нормальном атмосферном давлении (1013 Па), прогнозируемое внутреннее давление в стеклопакете составит порядка 15 % от допустимой ветровой нагрузки, определяемой согласно уравнению (4.4.5). Соответственно коэффициент типа остекления k_2 при этих условиях с учётом совместного

действия факторов, иллюстрируемых (рис. 4.4.3), может быть определён по формуле

$$k_2 = 0,75 \times (1 + (t_1/t_2)^2) \quad (4.4.6)$$

t_1 — более толстое стекло,
 t_2 — более тонкое стекло

Наряду со сложностью и неоднозначностью толкования расчётных схем и методов, достаточно много проблем вызывает и непосредственно определение величины расчётной ветровой нагрузки. Особенно — в условиях России, где сами по себе факторы, характеризующие состояние урагана, пока не сформулированы.

Проведя сравнительный анализ ветровых условий РФ с США и Европой, можно увидеть, что территория нашей страны в целом характеризуется аналогичными базовыми скоростями ветра. Так, согласно СНиП 2.01.07 — 85* «Нагрузки и воздействия», средняя максимальная скорость ветра на высоте 10 м от поверхности земли на открытой местности, наблюдается в основном на тихоокеанском побережье в районе Камчатки (см карту ветровых районов РФ — Прил. 1) и составляет соответственно 44 м/с (табл.4.4.2). Для г.Москвы с максимальным сосредоточением объектов высотного строительства, расчетная скорость ветра составляет согласно табл. 4.4.2 (I ветровой район) 22,6 м/с.

Соответствующая скорость ветра на территории Германии изменяется от 22,5 м/с на самой спокойной материковой части до 30 м/с на морском побережье (табл. 4.4.3). В нормативных документах США введено понятие ураганно-опасных районов. Согласно стандарту ASCE/SEI 7-05 в США к таковым относятся прибрежная зона в пределах 1 мили (1, 85 км) от берега со скоростью ветра больше или равной 110 миль/час (49 м/с), а также все другие территории со скоростью ветра больше или равной 110 миль/час (54 м/с). При этом в наиболее спокойных ветровых зонах США эта величина составляет 38–40 м/с.

Дополнительно можно отметить, что основным разрушающим фактором, действующим на остекление во время урагана, является всё же не сама по себе циклическая ветровая нагрузка, а ударная

Нормативное и расчетное значение ветрового давления w_0
(согласно СНиП 2.01.07-85* — редакции 1985 и 2007 гг.)

	Редакция СНиП 2.01.07- 85*	Ветровые районы							
		I	Ia	II	III	IV	V	VI	VII
Ветровое давление W_0 СНиП 2.01.07- 85* (кгс/м ²)	1985	17	23	30	38	48	60	73	85
	2007	24	32	42	53	67	84	100	120
Расчетная скорость ветра V_0 (м/с) $V_0 = \sqrt{16 \times W_0}$	1985	16.5	19.2	21.9	24.7	27.7	31	34.2	36.9
	2007	19.6	22.6	25.9	29.1	32.7	36.6	40	43.8

* W_0 — численно равно скорости ветра, м/с, на уровне 10 м над поверхностью земли для местности типа А, соответствующей 10-минутному интервалу осреднения и превышаемой в среднем раз в 50 лет

нагрузка от обломков мусора и строительных конструкций, летящих с огромной скоростью и ударяющих в стекло. Этот фактор отмечается во многих зарубежных публикациях и нормативных документах, определяющих расчёт остекления в условиях урагана, по фактору восприятия соответствующей ударной нагрузки.

В частности, в светопрозрачных конструкциях всех зданий, возводимых в ураганно-опасных районах США, согласно требованиям нормативов ASTM E 1886, ASTM E 1996 и ASCE/SEI 7-05 должны в обязательном порядке использоваться безопасные стёкла — с защитной плёнкой или устойчивые к удару (ламинированные или закалённые).

Вместе с тем, циклическое воздействие ветровой нагрузки является принципиально значимым фактором при проектировании конструкций структурного остекления. При расчёте несущей способности герметизирующего контура силикона (по периметру вклеивания стеклопакета в профиль) на действие сочетания

Табл.4.3.3

Районирование территории Германии по ветровой нагрузке

Ветровая зона	V_{ref} (соответствует V_0 в табл.4.3.2) м/с	q_{ref} (соответствует w_0 в табл.4.3.2) кН/м ²
	WZ 1	22,5
WZ 2	22,0	0,30
WZ 3	27,5	0,47
WZ 4	30,0	0,56

ветровой и климатической нагрузок (см. разд. 4.3), в качестве важнейшего разрушающего фактора рассматривается **отрицательное (негативное) ветровое давление**, возникающее с подветренной стороны фасада или действующее на кровлю, и зависящее от аэродинамики здания (рис. 4.4.4). Этот же фактор является важнейшим при проектировании монтажных нагрузок на остекление (при не полностью закрытом контуре здания), а также для объектов незавершенного строительства.

Поскольку расчётные условия для пиковых ветровых нагрузок в настоящее время в России окончательно не сформулированы,

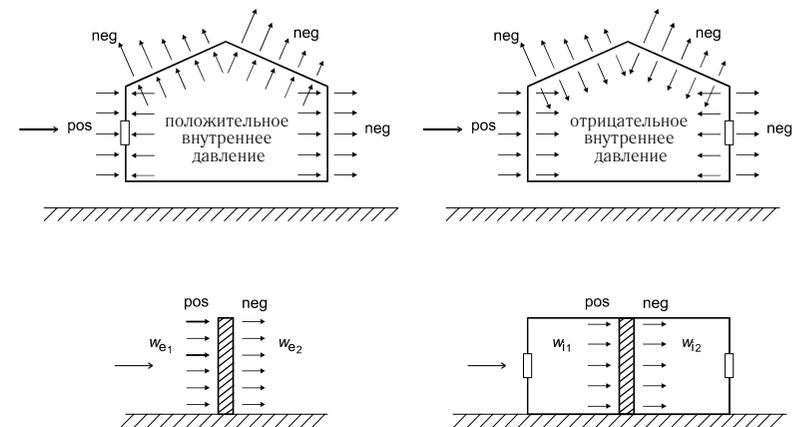


Рис. 4.4.4.

Распределение давления ветра на здание. Положительная (сокращённо от англ «позитивное» — pos.) и отрицательная (сокращённо от англ «негативное» — neg.) составляющие. Внутреннее и внешнее давление [89].

имеет смысл сослаться на формулировки Еврокода 1 — «Нагрузки на сооружения» — Часть 1–4 «Ветровые нагрузки» [89]. Согласно указанному базовому документу (п. 5.2), принятому для расчёта ветровых нагрузок в странах Евросоюза, расчётные давления ветра на наветренном (положительное давление W_e) и подветренном (отрицательное давление) определяется как

$$W_e = q_p(z_e) c_{pe} \quad (4.4.7)$$

$$W_i = q_p(z_i) c_{pi} \quad (4.4.8)$$

где

$q_p(z_e)$ — пиковое (ураганное) положительное скоростное давление ветра на высоте z_e ;

$q_p(z_i)$ — пиковое (ураганное) отрицательное скоростное давление ветра на высоте z_i ;

c_{pe} и c_{pi} — соответственно аэродинамические коэффициенты для наветренного и подветренного фасадов (положительного и отрицательного ветрового давления).

Согласно п.4.5. EN 1991-1-4, расчётная величина пикового ветрового давления, учитывающая статическую и пульсационную составляющую, определяется по формуле (4.4.9) как

$$q_p(z) = [1 + 7 I_v(z)] \times [\rho v_m^2(z)] / 2 = c_e(z) q_b \quad (4.4.9)$$

где

v_m — средняя скорость ветра, м/с

ρ — плотность воздуха, обычно принимаемая равной $\rho = 1,25 \text{ кг/м}^3$;

I_v — коэффициент, учитывающий интенсивность турбулентных потоков воздуха;

$$q_b = 1/2 \rho v_b^2 \quad (4.3.10)$$

где

v_b — скорость ветра, на высоте 10 м от поверхности земли (на открытой местности) для данного климатического района, м/с

Система Еврокодов предполагает использование содержащихся в них общих правил наряду с национальными стандартами и территориальными нормами (если таковые имеются). Наиболее удобными для практического применения в инженерных расчётах являются рекомендации норматива DIN 1055-4: 2005-03 «Воздействия на сооружения», согласно которому условия работы строительных конструкций при урагане оцениваются введением соответствующих повышающих коэффициентов к расчётному значению ветровой нагрузки, применяемых в зависимости от ветрового района, высоты здания и типа местности.

Так, согласно указанному документу, статическое ветровое давление $q(z)$, [кН/м^2] на высоте z от поверхности земли на открытой местности определяется согласно уравнению (4.4.11), справедливому для высот $2\text{м} < z \leq 300\text{м}$.

$$q(z) = 1,5 \times q_{\text{ref}}(z/10)^{0,19} \quad (4.4.11)$$

При этом для ураганного ветрового давления $q_{\text{ураг}}(z)$ и скорости ветра $V_{\text{ураг}}$ при урагане вводятся соответствующие повышающие коэффициенты, определяемые для открытой местности как

$$q_{\text{ураг}}(z) = 2,6 \times q_{\text{ref}}(z/10)^{0,19} \quad (4.4.12a)$$

$$V_{\text{ураг}}(z) = 1,61 \times V_{\text{ref}}(z/10)^{0,095} \quad (4.4.12b)$$

где

q_{ref} — то же q_b что в формуле (4.4.10)

V_{ref} — то же v_b что в формуле (4.4.10)

Из уравнений (4.4.12a) и (4.4.12b) можно увидеть, что **согласно нормам DIN, при урагане скорость ветра возрастает более чем в 1,5 раза, и соответственно более чем в 2,5 раза возрастает ветровое давление на сооружение.**

В условиях длительного процесса пересмотра строительной нормативной базы в нашей стране, при проектировании светопрозрачных конструкций зданий малой и средней этажности, расчётное значение ветровой нагрузки обычно принимается равным статическому ветровому давлению на высоте установки конструкций, определяемому согласно СНиП 2.01.07 — 85* «Нагрузки и воздействия». В новой редакции СНиП 2.01.07-85* (2007г.) расчет ветровой нагрузки на элементы ограждения и узлы их крепления значительно отличается от расчета ветровой нагрузки на несущие конструкции здания, которая определяется по формуле:

$$w = w_m + w_p \quad (4.4.13)$$

$$w_m = w_0 k(z_c) c \quad (4.4.13a)$$

где

w_m — расчетное значение средней составляющей ветровой нагрузки;

w_p — расчетное значение пульсационной ветровой нагрузки;

c — аэродинамический коэффициент;

$k(z_c)$ Коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте z .

В отличие от ветровой нагрузки на несущие конструкции здания, обладающие большой жёсткостью и массивностью, при расчете ветровой нагрузки на лёгкие конструктивные элементы наружной оболочки учитываются положительное w_+ и отрицательное w_- воздействия ветровой нагрузки, расчетные значения которых определяются по формуле:

$$w_{+(-)} = w_0 k(z_e) c_{+(-)} V_{+(-)} \quad (4.4.14)$$

$C_{+(-)}$ — пиковые значения аэродинамических коэффициентов положительного (+) или отрицательного (-) давления, определяемые для прямоугольных в плане зданий как:

$$C_+ = 1,0;$$

C_- — согласно таблицам и схеме рис. 4.4.5.

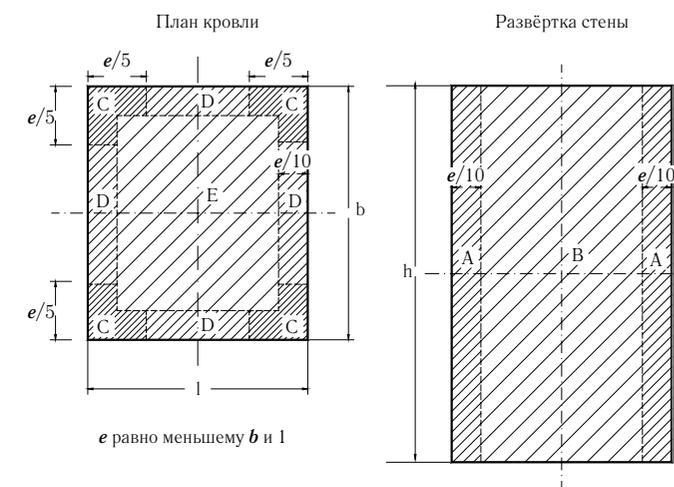
$V_{+(-)}$ — коэффициенты корреляции ветровой нагрузки, соответствующие положительному (+) и отрицательному (-) давлению; принимаемые на основании рис. 4.4.5 в зависимости от площади одного элемента ограждения на участке фасада, подвергающегося воздействию пиковой ветровой нагрузки (углы здания — участки А на рис. 4.4.5.).

При ураганном воздействии ветра вводится коэффициент надёжности по ветро-вой нагрузке, равный $k_w = 1,4$.

Результаты расчётов по формуле (4.4.14) справедливы при условии, что конструктивные элементы ограждения и узлы их крепления к зданию являются достаточно жесткими и в них не возникает заметных динамических усилий и перемещений.

В случае, если собственные частоты колебаний системы «элементы ограждения — несущие конструкции — элементы крепления» менее 1,5 Гц, расчётные значения пиковой ветровой нагрузки должны быть уточнены на основе результатов динамического расчета указанной системы.

Формула (4.4.14), кроме того, имеет ограничения в части аэродинамики здания, и соответственно применима для зданий, прямоугольных в плане. При проектировании высотных зданий, имеющих



Участок	А	В	С	Д	Е
$C(-)$	-2,2	-1,2	-3,4	-2,4	-1,5
А, м ²	<2	5	10	>20	
$V+$	1,0	0,9	0,8	0,75	
$V(-)$	1,0	0,85	0,75	0,65	

Рис. 4.4.5. Расчётная схема для определения пиковых отрицательных значений аэродинамического коэффициента $C_{(-)}$ для стен и плоских покрытий согласно СНиП 2.01.07-85* (ред. 2007г.)

Участки фасада А где приложены пиковые отрицательные значения аэродинамического коэффициента $c_{(-)}$.

сложную форму, соответствующие значения нагрузок принимаются на основании данных масштабного моделирования в аэродинамической трубе.

4.5. Снеговые нагрузки

Характер распределения снеговых нагрузок на светопрозрачных кровлях и вероятность возникновения обледенения, приводящего к частичной потере светопрозрачности в зимний период, в настоящее время представляют собой очень спорную и наименее изученную проблему в области светопрозрачных конструкций. Разногласия среди специалистов затрагивают не только вопросы непосредственного определения величины действующей нагрузки от снега, но и временного периода нахождения снега или льда на кровле, а также физических характеристик снегового покрова, влияющих на определение зимних эксплуатационных режимов светопрозрачной кровли.

В настоящее время в России, большинство территорий которой характеризуется долгой и продолжительной зимой, возведено и эксплуатируется немало зданий различного назначения и этажности с большепролётными светопрозрачными покрытиями. В числе наиболее известных сооружений такого типа, возведённых в историческом центре г. Москвы, могут быть названы светопрозрачные покрытия атриумных зданий Гостинного Двора, музея А.С. Пушкина на Пречистенке, служебного корпуса МИД РФ на Арбате. Необходимым условием эффективной эксплуатации таких покрытий является обеспечение максимальной естественной освещённости круглогодично, независимо от времени года и погодных условий. Загрязнение, снег и даже тонкая корочка льда, т.е. всё то, что приводит к снижению светопропускания — для светопрозрачных покрытий атриумов является крайне нежелательным фактором (рис.4.5.1). Достаточно часто подобная задача ставится при проектировании светопрозрачных кровель и менее ответственных в конструктивном плане сооружений на уровне относительно небольших частных инвесторов и владельцев элитного жилья.

В распространённой практике проблема удаления снега и льда со «стеклянной» кровли, как правило, решается за счёт весьма дорогостоящей системы электроподогрева, что требует не только изготовления стеклопакетов с электрообогреваемым наружным



Наземный вестибюль станции метро «Славянский бульвар», Москва, 2008 г. Арх. Волович В., Меженина С., Хохлов Д. Инж. Шургая Т.



Рис. 4.5.1.
Частичное обледенение и снег на светопрозрачной кровле атриумного корпуса МГСУ

стеклом, но и использования дополнительных ресурсов энергии. Немалую затратную часть таких решений, кроме того, составляет оборудование для автоматического управления режимами нагрева стеклопакетов, контролирующее температуры на поверхности стекла и окружающей среды. В этом контексте мы также можем отметить, что программирование режимов автоматики, обычно задаваемое на базе некоторых осреднённых эксплуатационных условий, не всегда обеспечивает эффективную и безотказную работу системы электрообогрева, в ряде случаев — вплоть до выхода её из строя.

Очевидно, что применение электрообогрева по всей площади светопрозрачной кровли далеко не всегда является экономически оправданным решением, поскольку функциональное назначение здания и режим его эксплуатации могут допускать наличие снега или тонкого слоя льда на кровле от нескольких часов до нескольких суток. Как показывают исследования, проведённые в МГСУ, это время является достаточным для удаления снега и наледи с кровли за счёт регулируемого режима обогрева подкровельного пространства тёплым воздухом. При этом необходимость электроподогрева будет оправданной только для нижней опорной зоны скатных кровель и куполов.

Натурные эксперименты, проведённые в МГСУ, показали, что снеговой покров различной толщины, плотности и структуры оказывает существенное влияние на прохождение видимого солнечного света через остеклённую кровлю. Согласно этим данным, даже незначительное количество снега (0,5–1 см), скопившегося на светопрозрачной кровле, приводит к снижению её светопропускания на величину порядка 20 %. При увеличении толщины снежного покрова от 1 до 10 см светопропускание будет быстро снижаться — вплоть до 70% потерь естественной освещённости (рис. 4.5.2).

На графике рис. 4.5.2 хорошо видна зона стабилизации при достижении снеговым покровом определённой толщины, что говорит о диффузном характере пропускания солнечного света снегом. По мере увеличения плотности снежного покрова во время его нахождения на поверхности кровли, диффузное пропускание ухудшается. Таким образом, необслуживаемая остеклённая кровля при длительном нахождении на ней снега, практически полностью теряет функцию естественной освещённости.

Сложные физические процессы накопления и стаивания снега на светопрозрачной кровле определяются воздействием целого ряда факторов, включающих в себя совокупность архитектурно-строительных параметров, таких как общая площадь, уклон, ори-

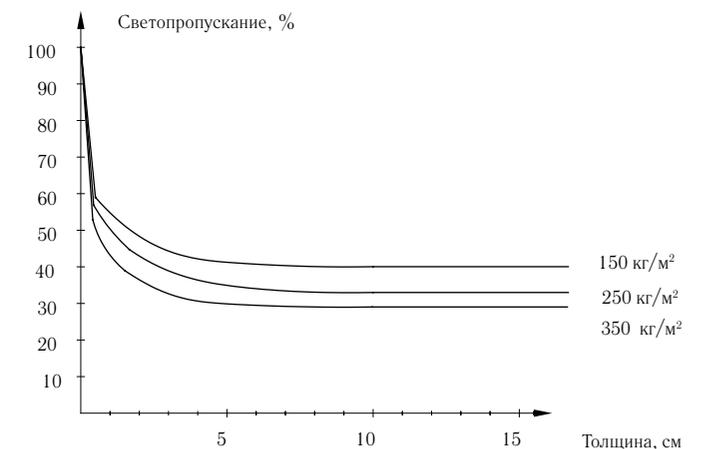


Рис. 4.5.2.
График зависимости светопропускающей способности снежного покрова от его толщины и плотности

ентация скатов кровли по странам света и этажность здания, характер изменения климата в регионе на протяжении года, температура в подкровельном пространстве и др.

В идеальной модели необогреваемой кровли (при температуре подкровельного пространства близкой к температуре окружающей среды), процессы стаивания снега происходят исключительно за счёт воздействия природных факторов, аналогично традиционным, хорошо утеплёнными кровлями из непрозрачных материалов. Экспериментально доказано, что процесс стаивания снега на поверхности снежного покрова, начинается при определённой температуре наружного воздуха, зависящей от угла наклона кровли по отношению к горизонту и интенсивности теплового солнечного излучения, действующего на поверхность. Исследования совместного действия последних двух факторов были проведены в Европе и отражены в соответствующих публикациях [38].

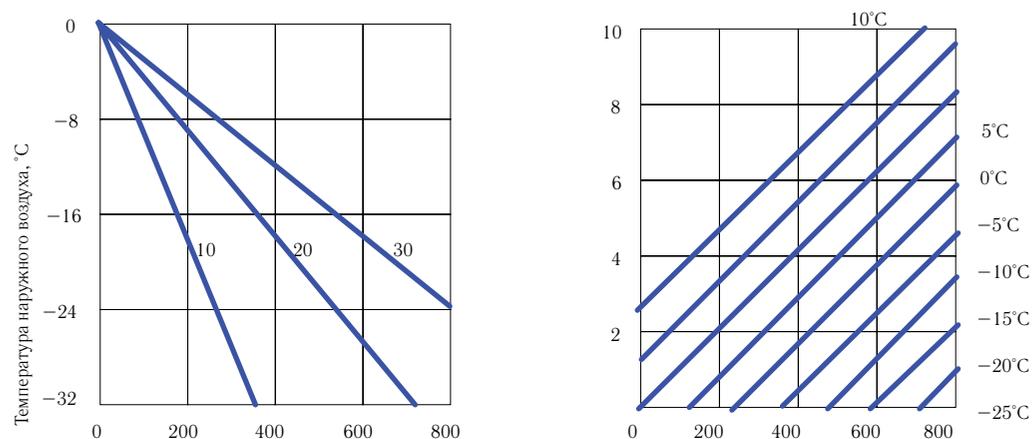


Рис. 4.5.3.

Параметры, определяющие интенсивность стаивания снега с кровли под действием природных факторов [38].

- а) Зависимость температуры наружного воздуха, при которой начинается процесс таяния снега, от интенсивности солнечного излучения и угла наклона кровли
- б) Интенсивность стаивания снега в зависимости от интенсивности солнечного излучения и температуры наружного воздуха

Интенсивность стаивания снега, численно выражаемая массой тающего снега определяется сочетанием температуры наружного воздуха и степенью воздействия тепловой солнечной радиации (рис. 4.5.3б). В процессе таяния на поверхности снежного покрова талая вода поглощается находящимся снизу слоем снега, увлажняя его (что приводит к увеличению объемного веса). Этот процесс особенно характерен для весеннего периода, когда температура наружного воздуха часто переходит через 0°C, а также для относительно продолжительных зимних оттепелей.

При повышении температуры подкровельного пространства (например, за счёт воздушного отопления, обеспечивающим подачу тёплого воздуха с регулируемой температурой), будет происходить повышение интенсивности процессов теплообмена через остекление, сопровождающееся резким увеличением интенсивности процессов стаивания за счёт одновременного воздействия теплового потока из-под кровли и по наружной стороне снежного покрова (рис. 4.5.4).

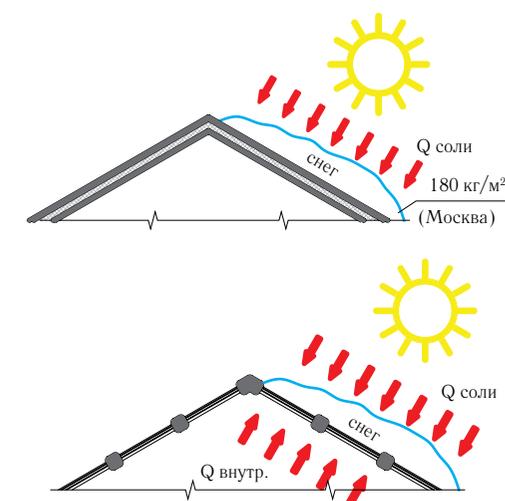


Рис. 4.5.4.

Процессы таяния снега на кровлях

- а) на непрозрачной традиционной кровле с утеплителем;
- б) на светопрозрачной кровле с обогреваемым подкровельным пространством

Дополнительно, при недостаточно высоких теплозащитных показателях элементов профильной системы (см. раздел 3.2), будет иметь место и высокая интенсивность теплопотерь через теплопроводные участки в местах сопряжения и закрепления стеклопакетов, сопровождающаяся, при понижении температуры наружного воздуха, локальным обледенением и промерзанием кровельного покрытия по стыкам элементов (рис. 4.5.5).

При таянии снега в плоскости контакта со стеклопакетом будет происходить образование тонкого водяного слоя. Часть образующейся талой воды будет стекать с кровли, а часть (особенно при низких температурах наружного воздуха) превращаться в лёд, который не только имеет существенно большую плотность по сравнению со снегом (что приводит к увеличению нагрузок на покрытие), но и другие теплофизические характеристики (коэффициент теплопроводности и удельную теплоту плавления). Таким образом, фактор резкого изменения температур наружного воздуха (при



Рис. 4.5.5.

Промерзание конструктивных элементов светопрозрачного купола служебного здания МИД РФ, подогреваемого тёплым воздухом. Локальное обледенение в местах сопряжения стеклопакетов

смене зимней оттепели морозами) может вызвать кратковременное сплошное обледенение светопрозрачной кровли (рис. 4.5.6) и, соответственно повышение нагрузки на кровлю.

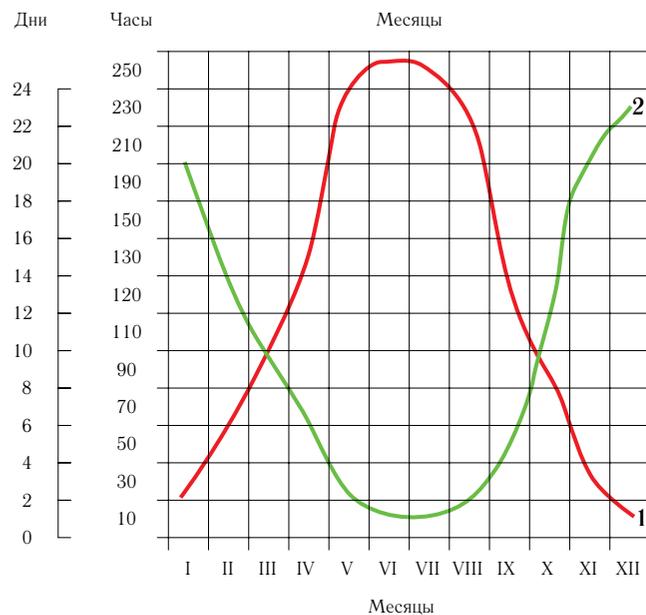
Как показывает опыт эксплуатации светопрозрачных кровель в Москве, если при обледенении кровли не будет некоторое время подаваться дополнительное тепло снизу, таяние образовавшегося льда, произойдёт только при повышении температуры наружного воздуха до температур выше 0 °С. Таким образом, в суровую зиму с продолжительными морозами, локальное и полное обледенение кровли может наблюдаться относительно длительный период — фактор воздействия солнечной радиации в центральных и северных районах РФ не играет в этом отношении какой-либо существенной роли (рис. 4.5.7 и табл. 4.4.1).

Логично предположить, что для возникновения процесса таяния снега в плоскости контакта снежного покрова со стеклопакетом необходимо достижение некоторого критического условия, когда температура в этой плоскости будет выше 0 °С. Определяющую роль в формировании этого условия будет играть термическое сопротивление снежного покрова, зависящее от его толщины H . При



Рис. 4.5.6.

Сплошное обледенение конструкций остеклённого помещения. г. Москва, температура наружного воздуха -20 °С.



Декабрь	Январь	Февраль	Март
84	113	220	467

Рис. 4.5.7.

Годовой ход продолжительности солнечного сияния (кривая 1) и число дней без солнца (кривая 2) для условий г.Москвы (56 град. с.ш)^[27]. Суммарная солнечная радиация на горизонтальную поверхность для г.Москвы, (МДж/м²) в месяцы с устойчивым снежным покровом^[53].

этом непосредственно критическое условие возникновения таяния может быть сформулировано как $H = H_{кр}$ при определённых граничных условиях, определяемых температурой внутреннего воздуха подкровельного пространства и температурой наружного воздуха. Иными словами, толщина снежного покрова на обогреваемой светопрозрачной кровле теоретически не должна превышать среднюю величину $H_{кр}$ на протяжении всего зимнего периода эксплуатации.

Этот тезис был подтверждён результатами натурных наблюдений проведённых специалистами МГСУ на светопрозрачном куполе служебного здания МИД РФ в январе-марте 2009 и 2010 гг.,

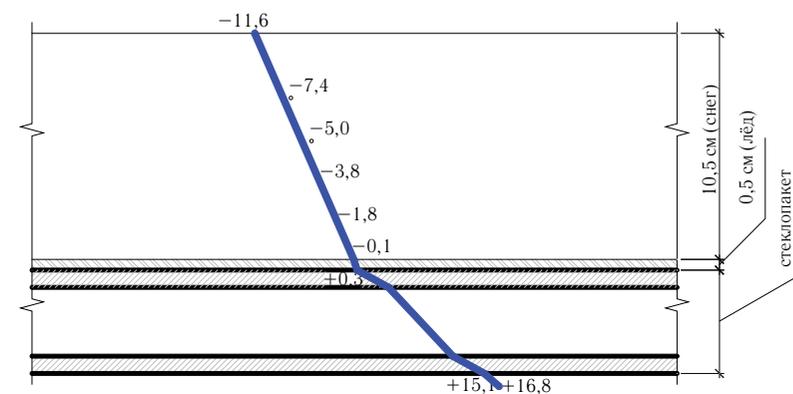


Рис. 4.5.8.

Распределение температур по толщине снега в ходе натурных наблюдений снежного покрова на светопрозрачном куполе служебного здания МИД РФ.

в ходе которых было установлено, что на поверхности светопрозрачной кровли над тёплым подкупольным пространством толщина снежного покрова не превысила 10,5 см за весь период наблюдений (рис.4.5.8).

Теоретическое обоснование этого явления применительно к различному углу наклона кровли можно получить, построив некоторую модель «идеального стеклянного купола» (полусферы) (рис.4.5.9).

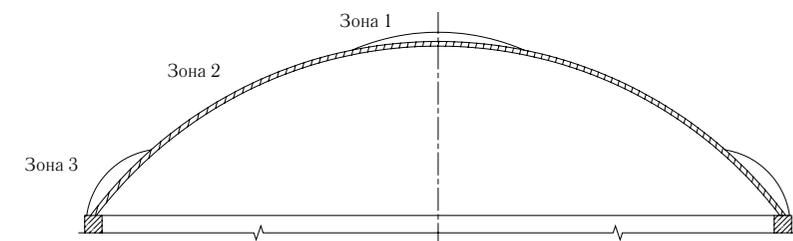


Рис. 4.5.9.

Разделение «идеального стеклянного купола» на характерные зоны по условиям формирования снежного покрова.

Зона 1 на рис.4.5.9 представляет собой верхнюю часть купола, поверхность которой близка к горизонтальной. Снег, выпавший при снегопаде, не скатывается. Часть этого снега постепенно оттаивает, в основном за счёт действия теплового потока снизу, а часть останется лежать до следующего снегопада.

На наклонной части купола (**Зона 2**), снежный покров, скапливающийся при снегопаде, будет через некоторое время сползать по слою воды, образывающейся в плоскости контакта со стеклопакетом при таянии за счёт действия теплового потока снизу.

В нижней части купола (**Зона 3**), снег, сползающий с наклонной части, будет накапливаться в случае наличия бортиков и других препятствий.

Если принять, что перед началом снегопада поверхность купола является чистой, то максимальную толщину снежного покрова $H_c^{гор}$ на горизонтальном участке (рис.4.5.10) можно определить согласно уравнению (4.5.1) из условия теплового баланса при стационарных условиях.

$$H_c^{гор} = \lambda_c \times R_{oc} \times (T_0 - T_n) / (T_b - T_0) \quad (4.5.1)$$

где

T_n — температура наружного воздуха, °С;

T_b — температура воздуха в подкупольном пространстве, °С;

R_{oc} — термическое сопротивление стеклопакета, (м²·°С)/Вт

λ_c — коэффициент теплопроводности снега, определяемый на основании формулы Абельса, как

$\lambda_c = 2,85 \times 10^{-6} \cdot \rho_c^2 = 2,85 \times 10^{-6} \times 180^2 = 0,092$ Вт/м при условии, что в течение суток на поверхность купола выпало максимально возможное количество осадков с плотностью $\rho_c = 180$ кг/м³.

При условиях $T_n = -20$ °С, $T_b = +20$ °С, $T_0 = 0$ °С и $R_{oc} = 0,65$ (м²·°С)/Вт, будет соответственно составлять

$$H_c^{гор} = \lambda_c \times R_{oc} \times 1,0 = 0,092 \times 0,65 = 0,060 \text{ м} = 6 \text{ см}$$

Приведённые выше расчёты позволяют дать количественную оценку максимальной толщины снега, который может оставаться длительное время на горизонтальных участках светопрозрачной кровли после окончания снегопада. Из уравнения (4.5.1) также нетрудно заметить, что эта величина будет снижаться пропорционально уменьшению теплозащитных параметров стеклопакета.

Указанные закономерности формирования снегового покрова могут быть эффективно использованы при расчётах мощности и времени воздействия дополнительного тепла, подаваемого из подкровельного пространства для удаления снежного слоя, максимально возможного теоретически в данном климатическом районе.

Решение аналогичной задачи для наклонных участков представляется гораздо более сложным, поскольку при длительном снегопаде на наклонных участках будут происходить нестационарные, изменяемые во времени процессы накопления снега, образования слоя воды в плоскости контакта со стеклопакетом и сползание снега вниз за счёт гравитации. С точки зрения практики, в данном случае важно прогнозирование периода времени, в течение которого будет периодически использоваться дополнительная мощность системы обогрева подкровельного пространства.

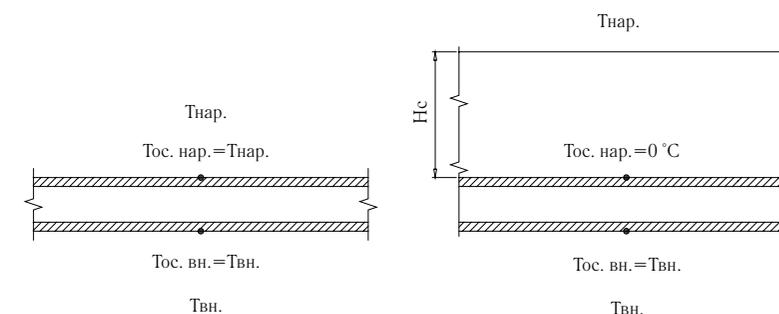


Рис.4.5.10.

Тепловой режим горизонтального участка светопрозрачной кровли.

а) До начала снегопада; **б)** В момент начала таяния снега

Как показывают исследования, проведённые в МГСУ [12], при описанных выше температурных условиях эксплуатации покрытия со стеклопакетами, имеющими приведенное сопротивление теплопередаче $R_{oc} = 0,65 \text{ (м}^2 \text{°С)/Вт}$, максимальный период времени «заснеженности» кровли в условиях обильного снегопада в Москве, будет составлять порядка 15–20 часов в зависимости от угла наклона.

Рассуждения, приведённые выше, указывают на необходимость формулировки и некоторых новых подходов непосредственно к определению величин расчётных снеговых нагрузок на светопрозрачные кровли.

В настоящее время в нашей стране снеговая нагрузка на здания и сооружения учитывается на основании СНиП 2.01.07-85* «Нагрузки и воздействия». Согласно указанному документу, территория РФ и стран Содружества делится на снеговые районы согласно табл. 4.5.1. Полное нормативное значение снеговой нагрузки s на горизонтальную проекцию покрытия определяется по формуле

$$s = s_0 \mu \quad (4.5.2)$$

где

s_0 — нормативное значение веса снегового покрова на 1 м^2 горизонтальной поверхности земли, принимаемое по табл. 4.5.2;

μ — коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие, учитывающий форму кровли и наиболее неблагоприятный вариант загрузки (неравномерная снеговая нагрузка, действующая на половине или четверти пролета).

Вес снегового покрова, в формуле (4.5.2) принимается без учёта процессов стаивания снега на светопрозрачной кровле отапливаемого здания, а также ледяного слоя, формирующегося за счёт подтаивания снега в плоскости контакта наружного стекла стеклопакета и снегового покрова. Кроме того, коэффициент формы загрузки μ очевидно не учитывает характерное распределение снега на светопрозрачной кровле с выделением характерных зон по её высоте (см. рис. 4.5.9).

Табл.4.5.1

Районирование территории РФ
по весу снегового покрова (снеговые районы)
(согласно СНиП 2.01.07-85*)

Снеговые районы*	I	II	III	IV	V	VI
нормативное значение веса снегового покрова на 1 м^2 горизонтальной поверхности земли s_0 , кПа (кгс/м ²)	0,5 (50)	0,7 (70)	1,0 (100)	1,5 (150)	2,0 (200)	2,5 (250)

См. карту Приложения 2.

Несмотря на то, что светопрозрачным кровлям не грозит обрушение, вызываемое критическими перегрузками при накоплении влаги в утеплителе и его обледенении (в отличие от традиционных болшепролётных покрытий), при их проектировании вопросы проникновения влаги должны рассматриваться не только в контексте возможных протечек. Особенности накопления льда в нижней зоне покрытия, а также в местах сопряжения профильных элементов и стеклопакетов, являются в данном случае важным аспектом эксплуатационной надёжности. Понимание этих процессов позволяют спрогнозировать, в частности, такие факторы как возникновение неравномерных напряжений в стеклопакетах вблизи опорного контура светопрозрачной оболочки и разрушение стеклопакетов за счёт концентрации локальных напряжений в краевой зоне.

4.6. Эксплуатационные и аварийные нагрузки

4.6.1. Эксплуатационные нагрузки

Помимо специфических нагрузок, определяемых природными факторами, при проектировании светопрозрачных оболочек должны учитываться дополнительные нагрузки техногенного характера, связанные с необходимостью периодического обслуживания, высокой вероятностью разрушения стекла при действии сосредоточенных нагрузок (особенно ударных), а также при возникновении и распространении пожара.

В этой связи при проектировании остеклённых фасадов и кровель необходимо учитывать ряд дополнительных эксплуатационных нагрузок, не характерных для традиционных непрозрачных конструкций. А именно:

1. Сосредоточенная нагрузка удара при случайном падении на стекло человека, находящегося внутри здания.
2. Сосредоточенная нагрузка удара снаружи при периодическом обслуживании (мойка фасадов промышленными альпинистами),
3. Сосредоточенная нагрузка удара снаружи при падении на стекло обломков строительного мусора (в условиях урагана или проведении строительных работ в непосредственной близости от здания).
4. Сосредоточенная нагрузка от веса человека при периодическом обслуживании «стеклянной» кровли.

В существующей европейской практике устойчивость остекления по отношению к перечисленным факторам определяется на основании лабораторных испытаний, методика которых определена соответствующими нормативными документами.

Для ограждающей конструкции со светопрозрачным заполнением, согласно европейским нормативам, проводятся так называемые «испытания на удар мягким телом», имитирующие возможное падение человека изнутри помещения на стекло. Таким, образом,



Интерьеры башни «Федерация»,
ММДЦ «Москва-Сити». Арх. Н.Форстер

основным критерием проектирования внутреннего стекла по условиям прочности является предотвращение возможного выпадения человека наружу через фасадное остекление. Дополнительным условием, регламентируемым европейскими нормами, является требование по расположению горизонтального ригеля профильной системы (см. раздел 3.2) на высоте, не превышающей 1,2 м от уровня чистого пола. При этом, в зависимости от назначения здания, узлы крепления ригеля к стойке и его сечение должны быть подобраны из условия действия сосредоточенной нагрузки от 0,5 до 1 кН/пог.м.

Основными документами, регламентирующими применение безопасного остекления в Германии, являются нормативы TRLV (“Technischen Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen” — «Технические правила по проектированию ленточного и панорамного остекления») и TRAV (“Technischen Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen” — «Технические правила по проектированию безопасного остекления»).

Согласно указанным нормативам, различают три категории безопасного остекления, классифицируемые по категории закрепления профильных элементов на несущих конструкциях здания, и обозначаемых буквами А, В, и С. Требования, предъявляемые к категории А — наибольшие, требования к категории С — наименьшие.

К **категории «А»** относятся конструкции крупноформатного сплошного панорамного остекления на всю высоту этажа от пола до потолка с опиранием светопрозрачного заполнения (стекла или стеклопакета) по двум, трём или четырём сторонам без каких-либо дополнительных опорных элементов в пределах конструктивной ячейки — перил, подоконника или дополнительного горизонтального ригеля фасадной системы (рис.4.6.1.1). К этой группе также относятся цельностеклянные парапеты без перил, консольно зажатые по нижней кромке.

К **категории «В»** относятся конструкции ленточного остекления с опиранием светопрозрачного заполнения (стекла или стеклопакета) по двум сторонам и расчётным рабочим пролётом менее

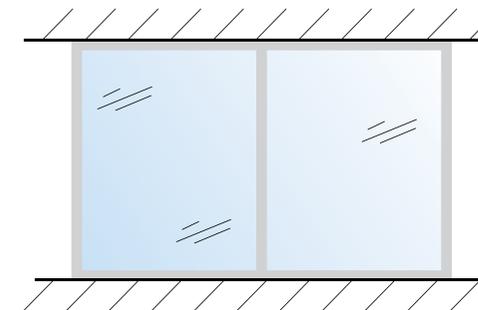


Рис.4.6.1.1.

Схема остекления, соответствующего категории А (нормы TRAV-Германия) по требованиям безопасности.

высоты этажа (рис.4.6.1.2). В качестве верхней (второй) опоры стекла в конструкциях категории «В» принимается некоторый протяжённый по длине, горизонтальный фиксирующий элемент — ригель профильной системы или перила цельностеклянного парапета с консольным защемлением по нижней кромке.

К **категории «С»** относятся конструкции остекления со сложной расчётной схемой в пределах конструктивной ячейки и несущими профильными элементами, включёнными в пространственную работу (рис.4.6.1.3). Светопрозрачное заполнение (стекло или стеклопакет) конструкций категории «С» имеет опирание на про-

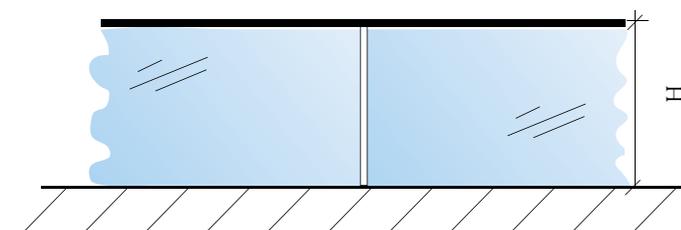


Рис.4.6.1.2.

Схема остекления, соответствующего категории В (нормы TRAV-Германия) по требованиям безопасности.

1 и 2 — два отдельных стеклянных элемента; Н — высота до горизонтального фиксирующего элемента (опоры стекла).

Табл. 4.6.1.1

Конструкции остекления, испытанного на воздействие удара и отвечающего необходимым требованиям безопасности (согласно таблице норматива TRAV)

Категория безопасности	Тип	Схема закрепления	Ширина (мм)		Высота (мм)		Конструкция стеклопакета/одинарного остекления изнутри наружу (толщины стёкол и ламинирующих плёнок указаны в мм)		
			мин.	макс.	мин.	макс.			
А	стеклопакет	по периметру	500	1300	1000	2000	8 ESG / SZR / 4 SPG / 0,76 PVB / 4 SPG		
			1000	2000	500	1300	8 ESG / SZR / 4 SPG / 0,76 PVB / 4 SPG		
			900	2000	1000	2100	8 ESG / SZR / 5 SPG / 0,76 PVB / 5 SPG		
			1000	2100	900	2000	8 ESG / SZR / 5 SPG / 0,76 PVB / 5 SPG		
			1100	1500	2100	2500	5 SPG / 0,76 PVB / 5 SPG / SZR / 8 ESG		
			2100	2500	1100	1500	5 SPG / 0,76 PVB / 5 SPG / SZR / 8 ESG		
			900	2500	1000	4000	8 ESG / SZR / 6 SPG / 0,76 PVB / 6 SPG		
			1000	4000	900	2500	8 ESG / SZR / 6 SPG / 0,76 PVB / 6 SPG		
			300	500	1000	4000	4 ESG / SZR / 4 SPG / 0,76 PVB / 4 SPG		
			300	1300	1000	4000	4 SPG / 0,76 PVB / 4 SPG / SZR / 4 ESG		
			Одинарное остекление	по периметру	500	1200	1000	2000	6 SPG / 0,76 PVB / 6 SPG
					500	2000	1000	1200	6 SPG / 0,76 PVB / 6 SPG
					500	1500	1000	2500	6 SPG / 0,76 PVB / 6 SPG
					500	2500	1000	1500	6 SPG / 0,76 PVB / 6 SPG
1200	2100	1000			3000	10 SPG / 0,76 PVB / 10 SPG			
1000	3000	1200			2100	10 SPG / 0,76 PVB / 10 SPG			
С1 и С2	стеклопакет	по периметру	500	2000	500	1000	6 ESG / SZR / 4 SPG / 0,76 PVB / 4 SPG		
			500	1300	500	1000	4 SPG / 0,76 PVB / 4 SPG / SZR / 6 ESG		
		по двум сторонам, сверху/снизу	1000	люб.	500	1000	6 ESG / SZR / 5 SPG / 0,76 PVB / 6 SPG		
			по периметру	500	2000	500	1000	5 SPG / 0,76 PVB / 5 SPG	
		1000		люб.	500	800	5 SPG / 0,76 PVB / 5 SPG		
		800		люб.	500	1000	5 SPG / 0,76 PVB / 5 SPG		
		800		люб.	500	1000	5 SPG / 0,76 PVB / 5 SPG		
		по двум сторонам, сверху/снизу	500	800	1000	1100	6 SPG / 0,76 PVB / 6 SPG		
			500	1000	800	1100	6 SPG / 0,76 PVB / 6 SPG		
			500	1000	800	1100	6 SPG / 0,76 PVB / 6 SPG		
500	1500		1000	3000	6 ESG / SZR / 4 SPG / 0,76 PVB / 4 SPG				
С3	стеклопакет	по периметру	500	1300	1000	3000	4 SPG / 0,76 PVB / 4 SPG / SZR / 12 ESG		
			500	1500	1000	3000	5 SPG / 0,76 PVB / 5 SPG		

Примечание:

SZR – Scheibenzwischenraum – дистанционная рамка (воздушная полость стеклопакета)

ESG – Einscheiben-Sicherheitsglas – закалённое стекло

TVG – Teilvorgespanntes Glas – термопрочное стекло

VSG – Verbund-Sicherheitsglas – многослойное стекло

SPG – Special Glas – специальное стекло – стекло, применяемое в соответствии с решаемой функциональной PVB – ламинирующая плёнка задачей (теплосберегающее, солнцезащитное и т.п.)

фильные элементы минимум по трём сторонам или дополнительное точечное закрепление. Характер дополнительного закрепления стекла или стеклопакета в пределах конструктивной ячейки определяет отношение конструкции к подкатегориям — «С1», «С2» или «С3» (см. рис.4.6.1.3)

Применительно к различным категориям безопасности, в немецких нормативах приведены рекомендуемые типы и размеры стёкол и стеклопакетов, которые могут быть использованы в качестве светопрозрачного заполнения, а также допуски и ограничения по применению того или иного из них: многослойных стёкол, обозначаемых в немецкой технической документации как VSG или стёкол с различной степенью термической обработки, обозначаемых как TVG и ESG (табл. 4.6.1.1).

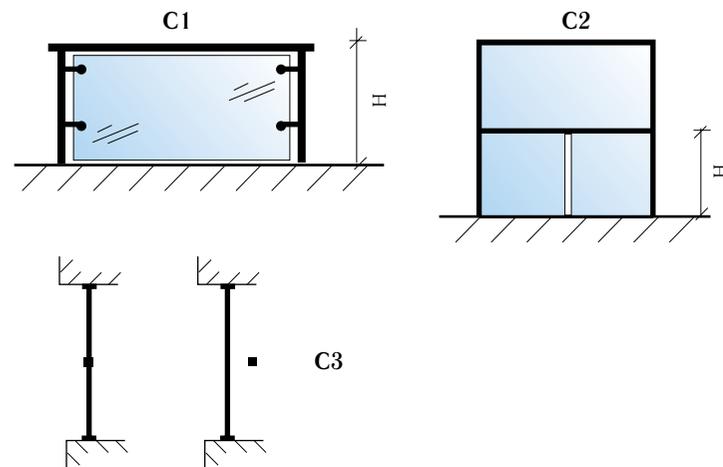


Рис.4.6.1.3.

Схемы остекления, соответствующего категории С (нормы TRAV-Германия) по требованиям безопасности: Н — высота до горизонтального несущего элемента.

Подкатегория С1 — Дополнительное линейное и/или точечное закрепление стекла/стеклопакета

Подкатегория С2 — Дополнительная опора-связь разрезного элемента (нижняя панель) в виде поперечного несущего ригеля.

Подкатегория С3 — Панорамное остекление на всю высоту этажа с промежуточной поперечной опорой или страховочными перилами, установленными на высоте, допустимой строительными нормами.

4.6.2. Противопожарная безопасность

Требования нормативов TRAV и TRVL относятся к режиму нормальной эксплуатации здания без учёта экстремальных условий при возникновении пожара. Вместе с тем, проблема разрушения лёгких пространственных сооружений из стекла и металла при пожаре, сегодня также актуальна для человечества, как и несколько столетий назад.

2 декабря 1936 года лондонское радио принесло известие, которое в первый момент показалось маловероятным — в течение одной ночи в лондонском предместье Сендейхеме пожаром было уничтожено одно из самых ярких знаковых сооружений XIX столетия — знаменитый Хрустальный Дворец (см. гл. 1). «Наутро, — добавляла краткая радиogramма, — от огромного здания осталась лишь груда железных балок и масса расплавленного стекла»^[1]. Однако впечатляющая картина разрушения вызвала у современников всего лишь кратковременный всплеск эмоций. Впереди была Вторая мировая война, бурный расцвет послевоенного строительства, расцвет и отторжение Интернационального стиля, когда конструктивные проблемы, рассмотренные в разделе 2.2, и проявившиеся без каких-либо критических причин, отодвинули противопожарную безопасность подобных сооружений на задний план.

Только теракт 11 сентября 2001 года, приведший к быстрому прогрессирующему обрушению знаменитых башен-близнецов Всемирного торгового Центра, заставил профессиональное строительное сообщество переосмыслить не только саму идею возведения небоскрёбов, но и приступить к разработке новой концепции безопасности административных зданий. На сегодняшний день очевидно, что она ещё не сформирована до конца. А, применительно к объектам «стеклянной архитектуры», мнения специалистов в различных странах носят весьма противоречивый характер.

Для оценки способности конструкции сопротивляться воздействию огня, в строительной технике используется показатель **пре-**

дела огнестойкости, характеризующий время (выражаемое в нормативных документах в минутах), в течение которого конструкция при стандартном воздействии огня (огневом испытании при стандартном температурном режиме) и высоких температур сохраняет несущую способность и устойчивость, не даёт сквозных трещин, а температура на необогреваемой её поверхности не превышает в среднем 140 °С.

Согласно действующим нормативным документам, предел огнестойкости строительных конструкций оценивается по нескольким группам предельных состояний (R\I\E\W):

R — потеря несущей способности (обрушение или потеря устойчивости);

I — потеря теплоизолирующей способности (повышение температуры на необогреваемой поверхности сверх допустимой);

E — потеря целостности — (образование в конструкции сквозных трещин или отверстий, через которые в соседнее помещение проникают продукты горения или пламя);

W — достижение предельной величины теплового потока на нормируемом расстоянии от необогреваемой поверхности конструкции (избыточная тепловая радиация от раскалённого ограждения)

Необходимо отметить, что нормативная база, обеспечивающее корректное применение той или иной группы предельных состояний для оценки предела огнестойкости светопрозрачных фасадов и большепролётных кровельных покрытий, в РФ не разработана до конца. Очевидно, что основным критерием проектирования в данном случае является обеспечение безопасной эвакуации людей из здания/прилегающей территории до момента прогрессирующего обрушения кровли/навесной фасадной оболочки (или её части). Вместе с тем, в практической деятельности предел огнестойкости светопрозрачных конструкций, как правило, оценивается по группе E — потеря целостности.

Разрушение стёкол в окнах, фасадном остеклении или кровле, определяет важнейший этап развития пожара. До тех пор, пока наружная светопрозрачная оболочка сохраняет целостность, развитие пожара происходит за счёт кислорода, находящегося в объёме поме-

щения, по мере расходования которого интенсивность горения начинает снижаться. Вскрытие светопроёмов при разрушении стёкол полностью изменяет картину газообмена в помещении. Вместе с удалением продуктов горения происходит резкий приток кислорода с наружным воздухом, в результате чего процесс горения интенсифицируется.

Точный момент времени, и условия, при которых происходит разрушение стекла при пожаре предсказать практически невозможно. Если стекло подвергается нагреву лучистым и конвективным теплом, но не подвержено прямому воздействию пламени, оно нагревается относительно медленно, и может выдерживать достаточно долгий нагрев, не разрушаясь. Разрушение стекла в световых проёмах начинается почти сразу после того, как пламя начинает касаться его поверхности.

По различным данным, обычное листовое оконное стекло разрушается через 3–4 мин после начала действия огня вследствие возникновения неравномерных температурных напряжений. Испытания закалённого стекла, проведённые во ВНИИПО^[20] показали, что 5-ти миллиметровое закалённое стекло размером 1,3 × 1,9 м выдерживало нагревание без повреждений вначале за счёт влияния высоких сжимающих напряжений у поверхности. Через 10–15 мин стекло равномерно прогревалось на всю толщину, становилось пластичным и не разрушалось на этой стадии за счёт выравнивания напряжений по сечению пластины. Предел огнестойкости испытанного стекла наступал вследствие размягчения и выпадения стёкол и составлял 15–25 минут.

Результаты испытаний показали, что описанная картина имела место при условии установки стекла в стальной переплёт с зазорами 3–5 мм. При установке закалённого стекла в переплёт вплотную, оно разрушалось через 3–6 мин после начала огневого воздействия. Вследствие температурного расширения стекла, его незащищённые кромки упирались в переплёты или крепёжные детали с возникновением локальных концентрированных напряжений, приводивших к мгновенному возникновению трещин и разрушению пластины.

Гораздо более высокие показатели остаточной несущей способности демонстрировало армированное стекло, которое через 1 мин

после начала действия огня при температуре около 200 °С начало растрескиваться, однако сквозных раскрытых трещин в нём не образовывалось. Растрескивание прекращалось через 7 мин при температуре 620 °С. Через 30–40 мин огневого воздействия армированное стекло размягчалось, деформировалось и постепенно выходило из креплений. При температуре около 870 °С деформация стекла увеличивалась настолько, что оно под действием собственного веса выпадало из переплётов — наступал предел огнестойкости. Его величина составляла в среднем 0,75 ч для одинарного остекления и 1,2 ч для раздельного листового остекления.

В ассортименте современных производителей огнестойких стёкол, присутствуют не только армированное флоат-стекло и закалённое стекло со специальными параметрами закалки, но и так называемые многослойные огнестойкие стёкла с одним или несколькими твёрдыми промежуточными слоями, расширяющимися под действием огня.

Материал промежуточного слоя получают путем сушки прозрачного водного раствора, содержащего жидкое стекло на основе силиката щелочного металла, водорастворимый алюминат и гидроксикарбоновую кислоту и др. При воздействии огня такой промежуточный слой вспучивается и расширяется, образуя непрозрачную изолирующую пену, которая обеспечивает термически изолирующий слой, повышающий устойчивость многослойной стеклянной панели к воздействию мощного теплового излучения.

В нормальных условиях промежуточный слой прозрачен. При пожаре под действием высоких температур он превращается в непрозрачный изолирующий пеноматериал, обеспечивающий дополнительный теплоизоляционный эффект (рис. 4.6.2.1 и 4.6.2.2).

Применение огнезащитных стёкол в конструкции фасадной обложки позволяет повысить время сохранения её целостности в условиях пожара, однако не является эффективным без применения специальных огнезащитных профильных систем, конструкция которых препятствует распространению огня внутри полых камер профиля. Современные решения огнестойких профильных систем, предлагаемых крупными европейскими производителями, предполагают за-

полнение камер внутри профилей несгораемыми композитными материалами, позволяющими повысить предел огнестойкости силовой структуры стеклянного фасада до 30–90 мин (рис.4.6.2.3).

Очевидно, что общая концепция безопасности сооружения с полностью остеклёнными оболочками (фасадом или кровлей), уязвимыми при действии огня, должна выстраиваться не только на основе применения некоторых специализированных технологий и конструкций, но и учитывать общие факторы опасности для жизни и здоровья человека при пожаре, а также возможные условия возникновения паники.

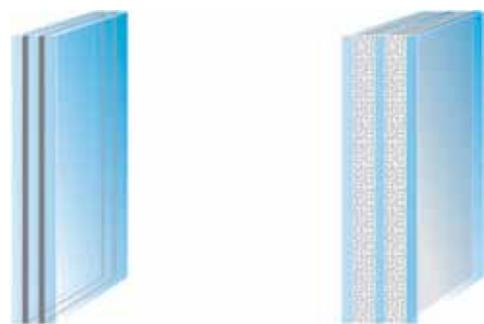


Рис.4.6.2.1.
Многослойные стёкла с расширяющимися промежуточными слоями.



Рис.4.6.2.2.
Образцы огнестойкого многослойного стекла AGC Pyrobel после воздействия огня.

К опасным факторам пожара относят высокую температуру, снижение концентрации кислорода в воздухе, высокие концентрации продуктов горения и термического разложения, потерю видимости из-за задымлённости помещений и путей эвакуации. Все это при определённых условиях, может привести к смертельным исходам.

Эффект воздействия высокой температуры на организм человека в значительной мере зависит от влажности воздуха — чем выше влажность, тем ниже критическая температура. На начальной стадии пожара, характеризующейся относительно высокой влажностью, этот порог находится в пределах 60–70 °С. При интенсивности воздействия потоков лучистого тепла в 3000 Вт/м², время появления болевых ощущений у человека составляет 10–15 секунд, а время переносимости 30–40 секунд.

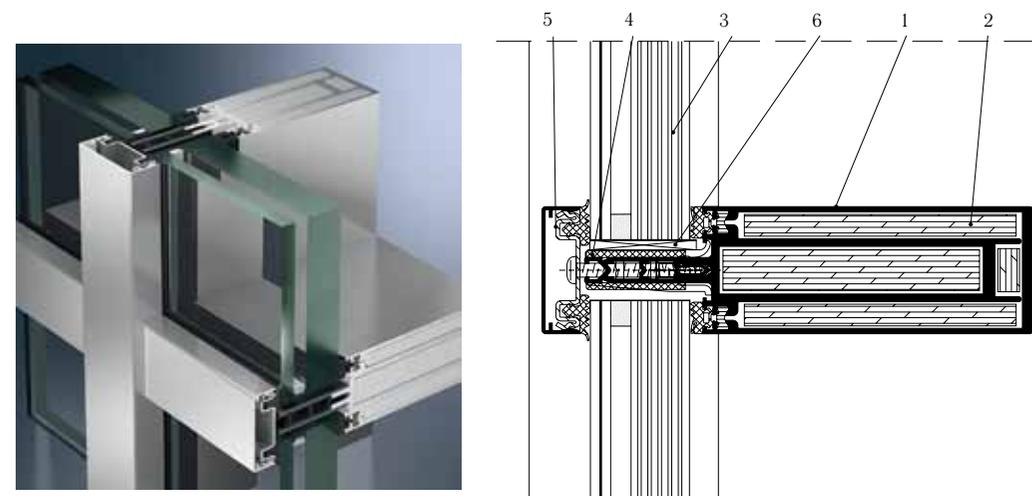


Рис. 4.6.2.3.
Конструктивное решение огнестойкого светопрозрачного алюминиевого фасада с пределом огнестойкости 60 минут.
Заполнением внутренних камер профилей несгораемым композитным материалом (система Schüco FW 50+ FR 60 и многослойное огнестойкое внутреннее стекло.
1 — алюминиевый профиль; 2 — огнестойкие изоляторы в полых камерах профиля; 3 — огнестойкое стекло; 4 — лента, вспенивающаяся на изоляторе винтового канала от превышения температуры; 5 — прижимная планка стальная; 6 — подкладка под стеклопакет выполнена из твердых материалов

Наиболее опасным токсичным продуктом является продукт неполного горения — оксид углерода, концентрация которого в размере 0,5 % вызывает смертельное отравление через 20 мин, а при концентрации 1,3% смерть наступает в результате 2–3 вдохов. Снижение концентрации кислорода до 14% вызывает реальную опасность для жизни, а при его концентрации 10–11% смерть наступает в течение нескольких минут [8].

Приведённые выше цифры показывают крайне малый резерв жизнеспособности человека в условиях сильного пожара и задымления (рис. 4.6.2.4). Поэтому важнейшим условием обеспечения пожарной безопасности здания является быстрое обнаружение и ликвидация очага возгорания с одновременным удалением дыма и ядовитых продуктов сгорания из помещения. В современных административных зданиях эта функция осуществляется за счёт автоматически управляемых интегрированных систем пожаротушения и дымоудаления, срабатывающих одновременно при поступлении сигнала с датчиков дыма. При получении соответствующего сигнала с управляющего пульта, в здании происходит включение системы автономной интенсивной вытяжной вентиляции или открытие соответствующих вентиляционных окон, оборудованных электрическими или пневмоприводами (рис. 4.6.2.5). Одновременно с открытием вентиляционных люков, создающим интенсивный доступ кислорода для горения, в здании должна включиться автоматическая система пожаротушения.

Дополнительно необходимо отметить, что принцип охлаждения подкровельного пространства за счёт интенсивной вентиляции для светопрозрачных кровель является не только основным средством обеспечения дымоудаления и теплоотвода в случае возникновения пожара, но и комфортного температурного режима в летнее время (при повышении температуры в подкровельном пространстве сверх максимально установленной проектом) (см. рис. 4.6.2.5).

Многокамерная конструкция современных фасадных и кровельных профильных систем позволяет размещать управляющие микросхемы и провода внутри профильных камер (рис. 4.6.2.6), что делает их зрительно невидимыми в интерьере.

Интересно отметить, что на фоне развития интеллектуальных противопожарных систем и достижений современных технологий в области огнестойких стёкол и профилей, архитекторы и надзорные органы проявляют достаточную осторожность при проектировании сплошного панорамного фасадного остекления, особенно в зданиях повышенной этажности. Во многих зданиях с остеклёнными фасадами, возводимых как в России, так и в Европе, сохраняется конструктивный принцип устройства противопожарных по-



Рис. 4.6.2.4.

Развитие пожара в здании, не оборудованном системами дымоудаления. Отравление человека продуктами сгорания при пожаре.



Рис. 4.6.2.5.

Удаление продуктов сгорания через светопрозрачные конструкции, оборудованные системами дымоудаления. Экстренная эвакуация из здания. Открывающиеся фрамуги в светопрозрачной кровле с автоматически управляемыми электроприводами

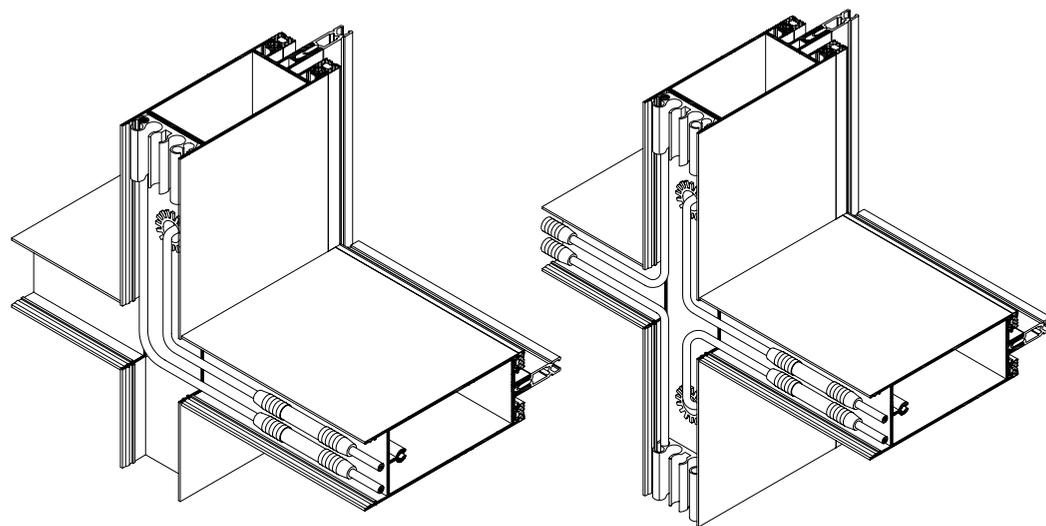


Рис. 4.6.2.6.
Размещение управляющих устройств противопожарной безопасности и контроля параметров микроклимата внутри профильных камер.

ясов в уровне перекрытия каждого этажа, включенный в европейский норматив DIN 4102 в 60х годах прошедшего столетия.

Указанный норматив регламентировал обязательное устройство подоконников в зданиях повышенной этажности, высотой от уровня чистого пола не менее 90 см (что примерно равно высоте современного стандартного балконного ограждения), выполняемых из огнестойких материалов. Дополнительно требовалось устройство надоконной перемычки, низ которой должен был находиться не менее чем на 25 см ниже потолка.

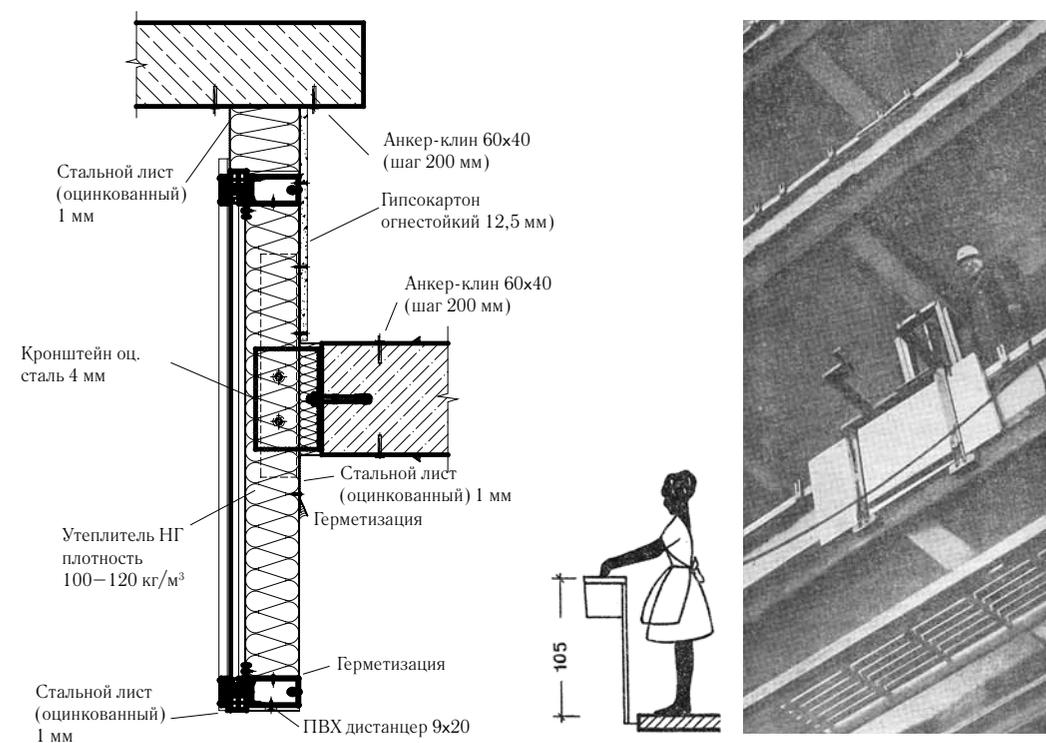


Рис. 4.6.2.7.
Конструктивное решение противопожарных поясов в светопрозрачных фасадах. Независимое крепление огнестойких плит к междуэтажным перекрытиям. Высота противопожарного пояса от уровня чистого пола соответствует стандартной высоте балконного ограждения

В большинстве высотных зданий, возведённых в этот период в Германии, указанный принцип конструктивно обеспечивался за счёт устройства навесных стен с внутренней несгораемой филёнкой, самостоятельно закреплявшейся на перекрытии (рис. 4.6.2.7). Такое решение предотвращало распространение огня по высоте многоэтажного здания с остеклённым фасадом, а также падение людей с высоты в условиях паники, даже при условии прогрессирующего обрушения навесных фасадных конструкций [18].

Огнестойкий межэтажный пояс современных светопрозрачных фасадов высотой не менее 900мм, как правило, выполняется из непрозрачных сэндвич-панелей на основе несгораемых утеплителей с наружной декоративной облицовкой (из тонированного закалённого стекла или др. материала). Таким образом, обеспечивается возможность сохранения единого стиля в композиции фасада, а архитектор имеет достаточную свободу творчества в выборе цветового решения (рис. 4.6.2.8).



Рис. 4.6.2.8.

Непрозрачные противопожарные пояса современных светопрозрачных фасадов могут быть удачно вписаны в общую архитектурную композицию

4.7. Расчётные схемы и пространственная работа стеклопакетов.

Формирование напряжённого состояния стеклянных пластин.

Разрушение стекла

Наряду с недостаточностью теоретических и специальных исследований, необходимых для правильного описания условий действия нагрузок и их сочетаний на светопрозрачные оболочки, среди специалистов во всем мире существуют не менее серьёзные разногласия по поводу построения расчётных схем как непосредственно стеклопакетов, так и образуемых ими конструктивных ячеек.

В частности в своей монографии, посвященной исследованию прочностных свойств строительных конструкций из стекла, английский инженер Ян Вурм [36] отмечает: «Для большинства конструкций назначение размеров элементов является проблематичным, в силу недостаточности стандартов на методы расчёта. Некоторые аспекты, связанные с определением напряжений, до сих пор непонятны. Например, каким образом правильно построить расчетную модель системы при использовании метода конечных элементов — МКМ (в зарубежной литературе — FEM — Finite Element Model) и как правильно интерпретировать полученные результаты. Технические рекомендации нормативов Германии, американского стандарта ASTM E 1300, австралийского стандарта AS 1288 и проекта EN 13474 построены на различных базовых предпосылках и допущениях».

В предыдущих разделах этой главы были рассмотрены статические нагрузки, вызывающие изгибные деформации в каждом из стёкол стеклопакета. Для анализа напряжённого состояния стеклянных пластин, вызываемого действием этих нагрузок, в настоящее время используются методы так называемой линейной теории упругости, справедливой для тонких пластинок, подвергающихся малым прогибам.

Справедливость такого подхода в последнее время подвергается серьёзной критике, поскольку реальные эксплуатационные прогибы листового стекла без разрушения (особенно в конструкциях крупноформатного остекления) могут значительно превышать его толщину. В частности, в нормативных документах Канады [83], указывается что для тонкой пластины стекла, свободно опёртой по четырём сторонам, линейная теория даёт неадекватные результаты, при превышении прогиба пластины более $\frac{3}{4}$ её толщины.

Как уже отмечалось в главе 2, применительно к стеклянным пластинам, серьёзным недостатком методов теории упругости и сопромата в целом является неучтённость предварительно напряжённого состояния пластины, определяемого технологией изготовления стекла. Неравномерность распределения напряжений по сечению стеклянной пластины, вносит серьёзные корректировки в базовый постулат теории упругости и сопротивления материалов о нейтральной срединной плоскости при изгибе, не испытывающей деформаций. Наоборот — как было наглядно показано в главе 2 — в срединной плоскости стеклянной пластины, достигают максимума наиболее болезненные для стекла растягивающие напряжения — при максимальных сжимающих напряжениях вблизи поверхности. Если принять во внимание указанную неравномерность распределения напряжений по сечению, иллюстрируемую рисунком 4.7.1, то можно представить некоторую расчётную схему неоднородной пластины в виде двух плотных поверхностных слоёв, удерживаемых в равновесном состоянии внутренними растягивающими напряжениями. Такая картина в определённой степени позволяет объяснить высокую фактическую сопротивляемость стекла разрушению по отношению к расчётным величинам, а также многие аспекты в работе закалённых стёкол.

Интересные данные, иллюстрирующие превышение фактической прочности стекла над теоретической, вычисленной на основании линейной теории упругости, были опубликованы специалистами из Гонконга (рис. 4.7.2). Из графика рис. 4.7.2 хорошо видно, что границы применимости линейной теории находятся в пределах нагрузок менее 1 кПа/м². При дальнейшем увеличении нагрузки на



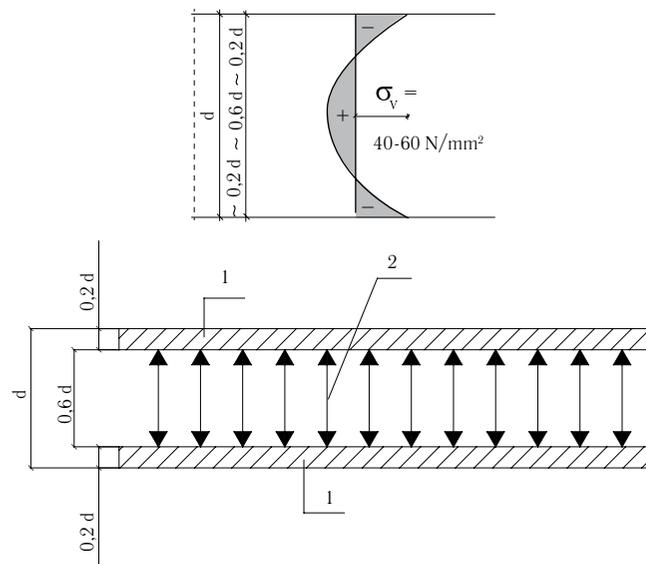


Рис. 4.7.1. Расчётная схема стеклянной пластины с учётом неравномерности распределения напряжений по сечению.
1 — плотные (сжатые) рабочие слои; 2 — внутренние растягивающие напряжения

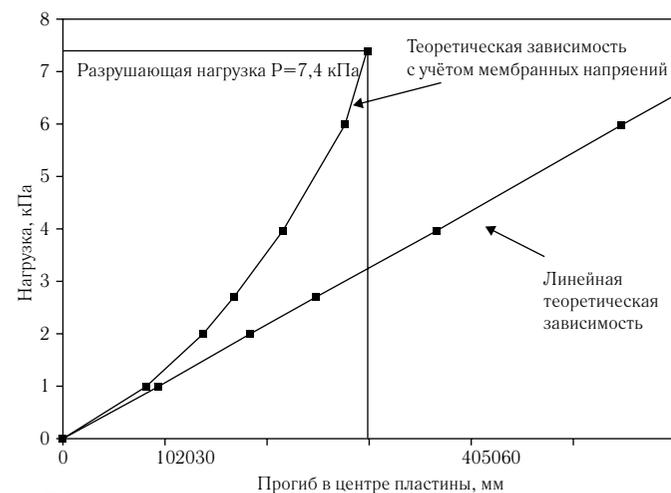


Рис. 4.7.2. Зависимость прогиба в центральной части прямоугольной стеклянной пластины толщиной 5,6 мм свободно опёртой по 4-м сторонам и размерами сторон 2000 x 1000 мм от приложенной нагрузки [44]

пластину, наблюдается существенное расхождение с данными, вычисляемыми с учётом возникновения в пластине мембранных напряжений.

Как уже было отмечено в предыдущих разделах, в реальных условиях каждое из стёкол пакета на протяжении всего периода эксплуатации подвергается воздействию знакопеременных статических нагрузок, изначально вызываемых перепадами давления во внутренней полости стеклопакета и дополняемых односторонними нагрузками от ветра и снега (для наружного стекла) (рис. 4.7.3). Под действием сочетания указанных нагрузок в стёклах пакета возникают напряжения, величина и распределение которых, помимо непосредственно характеристик стекла, будет в значительной степени определяться характером герметизации контура непосредственно пакета и типом его закрепления на элементах профильной системы.

В практической деятельности различают два основных типа герметиков, используемых в стеклопакетах. К так называемым «мягким» герметикам относится бутил, расплавляемый и отверждаемый под действием температур (технология «хот-мелт»), а также дистанционные рамки TPS (см. главу 3). Под «жесткими», как правило, понимают двухкомпонентные полисульфидные герметики,

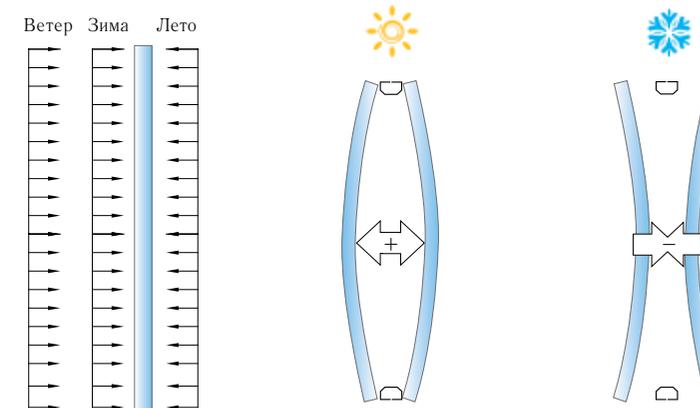


Рис. 4.7.3. Воздействие знакопеременных статических нагрузок на наружное стекло стеклопакета

иногда относимые к группе эпоксидных герметиков, и отверждаемые за счёт химической реакции. Соответственно в зависимости от типа герметизации, образуется либо подвижная опора стекла, приближающаяся к чистому шарниру («мягкий» герметик), либо малоподвижная опора стекла, более приближающаяся к пластическому шарниру. В любом случае, и та и другая технологии склейки теоретически позволяют подвижку стекла при изгибе в районе дистанционной рамки, что не позволяет рассматривать контур стеклопакета в качестве жёсткой заделки.

По сути, шарнирная заделка каждого из стёкол пакета сохраняется и при условии его механического закрепления на элементах профильной системы стандартных стоечно-ригельных фасадов (см. раздел 3.2), где стеклопакет опирается в нижней части в нескольких точках на небольшие по размеру опорные подкладки.

В этом случае пространственная работа каждого из стёкол пакета может быть приближённо описана уравнениями изгиба равномерно нагруженной свободно опертой по краям пластинки, удерживаемой в равновесии продольной силой S (реакцией на опорной подкладке) (рис. 4.7.4)^[26]. Такая расчётная схема означает, что при

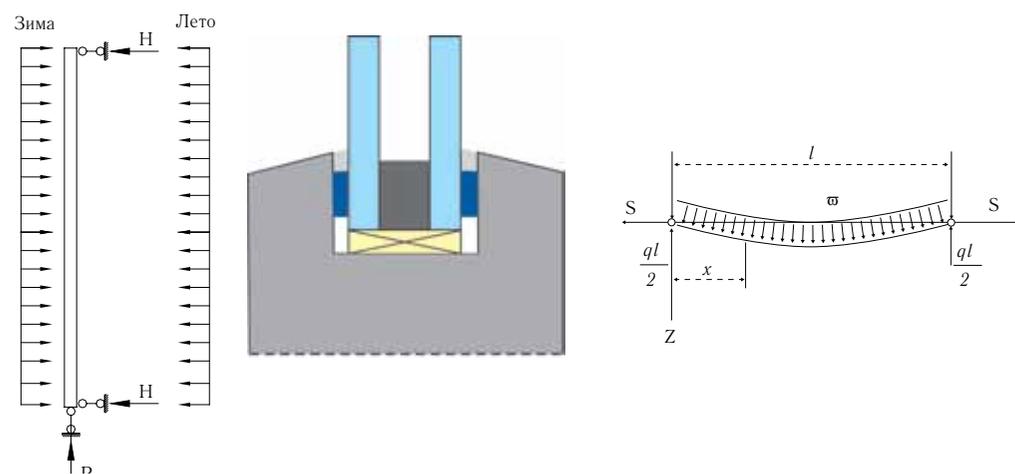


Рис. 4.7.4. Расчётная схема стеклопакета в конструкциях стандартных стоечно-ригельных фасадов и оконных блоков с механическим закреплением элементов

условии механического закрепления стеклопакета, наибольшие растягивающие и разрушающие напряжения будут наблюдаться в центре пластины, и уменьшаться по мере приближения к контуру отдельной ячейки фасада.

Принципиально другая картина наблюдается в конструкциях структурного и полуструктурного остекления (см. раздел 3.2), где за счёт вклеивания стеклопакета образуется фактически жёсткая заделка стёкол, не позволяющая их свободной подвижки. В этом случае пространственную работу стёкол пакета более правильно описывать уравнениями изгиба прямоугольной пластинки, закреплённой по контуру и изгибающимися моментами, равномерно распределёнными вдоль её краёв (рис. 4.7.5)^[26].

В отличие от механической заделки стеклопакета, такая схема определяет гораздо более высокие напряжения по контуру стекла. Этим объясняются особо жёсткие требования к обработке кромок стеклопакетов, предназначенных для структурного остекления.

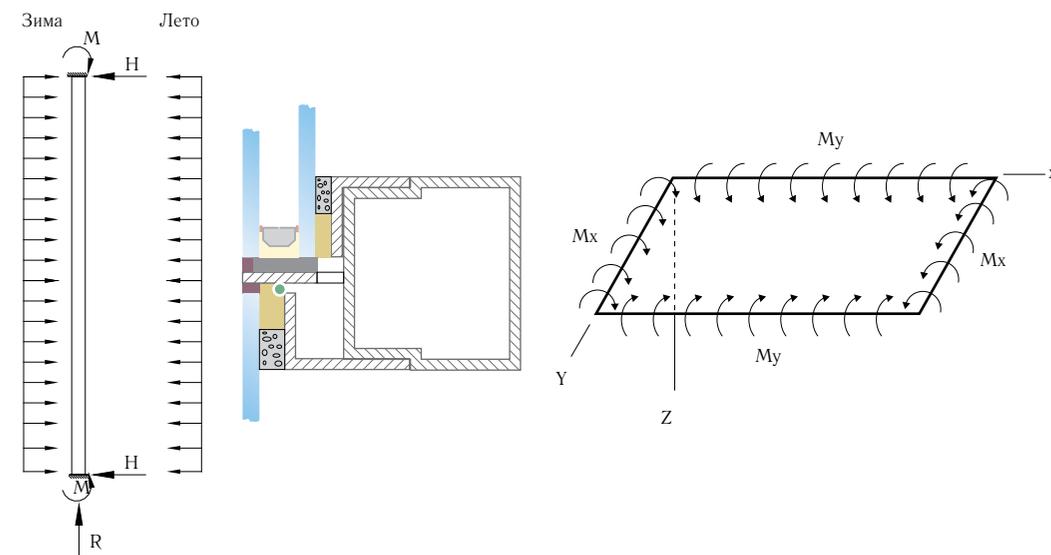


Рис. 4.7.5. Расчётная схема стеклопакета в конструкциях структурных фасадов с вклеиванием стеклопакета

Так, в частности, в [36] указывается на необходимость соответствующей обработки кромок на глубину не менее 2 мм.

Здесь также необходимо отметить, что высокие напряжения на кромках клеенного стекла, совершенно не означают, что в центре пластины будут нулевые растягивающие напряжения. Скорее мы в данном случае можем говорить о более низких разрушающих прогибах стекла по сравнению с шарнирной заделкой.

Описанные идеализированные схемы достаточно часто согласуются с картиной разрушения стеклопакетов на реальных строительных объектах.

На рис. 4.7.6 показано разрушение закалённых стёкол в стеклопакетах панорамного фасадного остекления башни Федерация комплекса Москва-Сити. На фото, хорошо видно образование фокуса излома на контуре стеклопакета, конструкция которого показана на рис. 4.7.7. В данном случае хорошо просматривается действие



а)
Рис. 4.7.6.
Разрушение закалённых стёкол в стеклопакетах башни Федерация комплекса Москва-Сити.
а) общий вид атриума с разрушенными стёклами; б) образование фокуса излома в краевой зоне стеклопакета

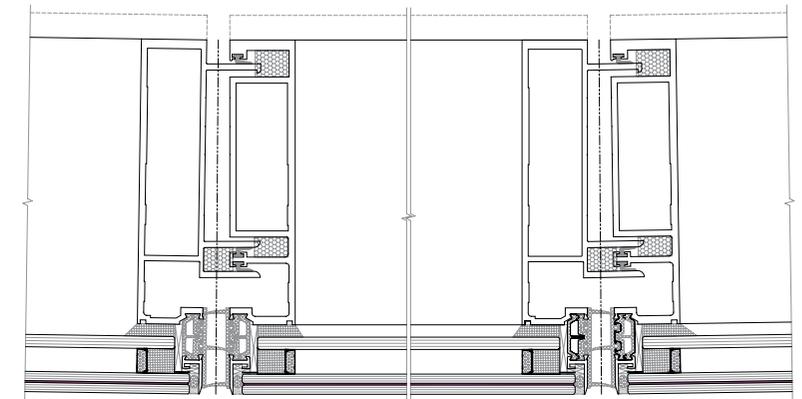


Рис. 4.7.7. Конструктивное решение стеклопакетов башни Федерация.
а) горизонтальный разрез по модульному элементу структурного остекления; б) общий вид стеклопакета

изгибающих моментов по контуру стеклянной пластины, жёстко клеенной в рамный элемент структурного остекления.

Картина разрушения показывает развитие микротрещины из краевой зоны, которая в закалённом стекле является намного более уязвимой по сравнению с отожжённым стеклом за счёт более высоких растягивающих напряжений в центральном слое пластины. Это доказано экспериментально при проведении лабораторных исследований. В частности в [21] приводится сравнительный анализ прочности образцов с нанесёнными царапинами (дефектами). При испытании оказалось, что глубина поверхностной царапины оказывает незначительное влияние на разрушающее напряжение незакалённых стёкол, а определяющую роль играет её длина. Для закалённых образцов длина царапины никак не отражалась на прочностных показателях, однако увеличение глубины дефекта (приближение к центральному слою с растягивающими напряжениями) приводило к заметному снижению прочности. Таким образом, начальным фактором разрушения могла стать невидимая технологическая микротрещина на обресте стекла, развивавшаяся под действием изгибающих моментов до некоторой критической глубины, после чего наступило полное разрушение пластины.

Достаточно характерную картину представляет и разрушение стеклопакетов структурного остекления здания отеля Хайат в г. Екатеринбурге с фокусом излома в центральной части (рис. 4.7.8).

А разрушение стеклопакетов офисного комплекса Серебряный город в г. Москве, демонстрирует разрушение с большим прогибом стекла, имеющего возможность свободной подвижки. На фото (рис. 4.7.9) хорошо видно, что прогибы разрушенных стёкол очень велики (порядка 20–30 мм по результатам измерений).

Фото рис. 4.7.6, рис. 4.7.8 и рис. 4.7.9 наглядно иллюстрируют совокупность и последовательность выполнения двух условий, необходимых для разрушения стекла. А именно:

1. формирования начального напряжённого состояния, предшествующего разрушению;
2. непосредственно момент разрушения с фокусом излома в месте концентратора напряжений — трещины или кристаллического включения в стекле.

В классических формулировках механики разрушения локальная концентрация напряжений в стекле выделяется в виде единственного и самодостаточного движущего фактора. Так С. Солнцев и Е Морозов в [21], на основании результатов испытаний на разрушение



Рис. 4.7.8.
Разрушение закалённого стекла в стеклопакетах отеля Хайат, г. Екатеринбург



Рис. 4.7.9.

Разрушение закалённых стёкол в стеклопакетах офисного комплекса Серебряный город, г. Москва

различных образцов стекла при различных условиях и схемах загрузки, отмечают, что очаг разрушения далеко не всегда находился в центре испытываемого образца (пластины), где теоретически предполагался максимальный прогиб. Результаты лабораторных испытаний многочисленных образцов стекла, имевших различный химический состав и степень термической обработки, обобщённые авторами, показали, что разрушение стеклянного образца под действием равномерно распределённой нагрузки, независимо от его вида, всегда начиналось от концентратора напряжений. При этом очаг разрушения всегда находился в зоне максимальных растягивающих напряжений.

Вместе с тем, очевидно, что **при проектировании строительных конструкций из стекла интересен не сам момент разрушения, а выделение именно предшествующей ему напряжённой стадии. Иными словами, при непредсказуемой работе стекла как конструкционного материала, мы можем создавать определённые условия работы изготавливаемых из него конструкций, характеризующиеся минимальным уровнем напряжений, распределённых по площади пластины.**

Напряжения и прогибы стёкол при обоих условиях, иллюстрируемых *рис. 4.7.4* и *рис. 4.7.5*, описываются общеизвестными уравнениями теории упругости, решения которых достаточно сложны и неудобны в практическом применении. В связи с этим, в настоящем разделе имеет смысл привести описание относительно простых инженерных методов расчёта прочностных свойств стеклопакетов, базирующихся на предпосылках линейной теории упругости и используемых в Европе для предварительного выбора геометрических параметров — толщины стекла и ширины воздушной полости. Как уже отмечалось выше, указанные методы не учитывают запас, создаваемый распределением внутренних напряжений в стеклянной пластине, таким образом могут трактоваться в качестве методик, обеспечивающих определённый запас надёжности.

Напряжённое состояние стеклопакета формируется под действием комбинации знакопеременных климатических нагрузок,

Табл. 4.7.1

распределяемых на оба стекла, односторонней изменяемой во времени ветровой нагрузки, воспринимаемой наружным стеклом, и непосредственно термических нагрузок, возникающих при использовании в стеклопакетах покрытий или плёнок из оксидов металлов. На светопрозрачных кровлях в эту комбинацию добавляется односторонняя нагрузка от снега и/или льда, воспринимаемая наружным стеклом, а также составляющая нагрузки от собственного веса стёкол. При уменьшении угла наклона кровли по отношению к горизонту, составляющая ветровой нагрузки будет уменьшаться, приближаясь к нулю для горизонтальных кровель.

Согласно европейским нормативам, предварительный выбор толщины стекла из условия прочности и оценка вероятности разрушения стеклопакета производится по показателю разрушающего прогиба в центре стеклянной пластины, определяемого согласно DIN 1249 по формуле:

$$f_0 = \psi P (a/2)^4 10^9 / (E d^3) \leq f_{изг} \quad (4.7.1)$$

где

f_0 — расчетный прогиб [мм];

$f_{изг}$ — максимально допустимый прогиб стекла при изгибе [мм], принимаемый равным

$f_{изг} \leq L/100$, где L — длинная сторона стеклопакета [мм];

a — короткая сторона стеклопакета, [мм];

d — толщина стекла, [мм]

P — суммарная расчётная нагрузка, действующая на стекло, [кН/м²].

E — модуль упругости стекла $E = 70\,000$ [Н/мм²];

ψ — безразмерная величина, зависящая от отношения длинной стороны стеклопакета к короткой, принимаемая по табл. 4.7.1 [33].

В общем случае в наиболее неблагоприятных условиях статической работы будет находиться наружное стекло стеклопакета. При этом полная нагрузка, действующая на наружное стекло, может быть определена как

Зависимость расчетных коэффициентов от отношения сторон стеклопакета (b — длинная сторона; a — короткая сторона)

b/a	φ	ψ	b/a	φ	ψ	b/a	φ	ψ
1,00	1,15	0,71	1,80	2,27	1,63	2,60	2,75	2,05
1,02	1,19	0,74	1,82	2,29	1,64	2,26	2,76	2,06
1,04	1,23	0,77	1,84	2,31	1,66	2,64	2,76	2,06
1,06	1,27	0,80	1,86	2,33	1,67	2,66	2,77	2,07
1,08	1,30	0,83	1,88	2,35	1,69	2,68	2,77	2,07
1,10	1,34	0,86	1,90	2,36	1,70	2,70	2,78	2,08
1,12	1,38	0,89	1,92	2,38	1,72	2,72	2,79	2,08
1,14	1,41	0,91	1,94	2,39	1,73	2,74	2,79	2,09
1,16	1,45	0,94	1,96	2,41	1,74	2,76	2,80	2,09
1,18	1,48	0,97	1,98	2,43	1,76	2,78	2,80	2,10
1,20	1,51	1,00	2,00	2,44	1,77	2,80	2,81	2,10
1,22	1,55	1,02	2,02	2,45	1,78	2,82	2,81	2,11
1,24	1,58	1,05	2,04	2,47	1,80	2,84	2,82	2,11
1,26	1,61	1,07	2,06	2,48	1,81	2,86	2,82	2,11
1,28	1,64	1,10	2,08	2,50	1,82	2,88	2,83	2,12
1,30	1,67	1,12	2,10	2,51	1,83	2,90	2,83	2,12
1,32	1,70	1,15	2,12	2,52	1,84	2,92	2,83	2,13
1,34	1,73	1,17	2,14	2,53	1,85	2,94	2,84	2,13
1,36	1,76	1,19	2,16	2,55	1,87	2,96	2,84	2,13
1,38	1,79	1,22	2,18	2,56	1,88	2,98	2,85	2,14
1,40	1,82	1,24	2,20	2,57	1,89	3,00	2,85	2,14
1,42	1,85	1,26	2,22	2,58	1,90	3,05	2,86	2,15
1,44	1,87	1,29	2,24	2,59	1,91	3,10	2,87	2,15
1,46	1,90	1,31	2,26	2,60	1,92	3,15	2,87	2,16
1,48	1,92	1,33	2,28	2,61	1,93	3,25	2,89	2,17
1,50	1,95	1,35	2,30	2,62	1,94	3,35	2,90	2,18
1,52	1,97	1,37	2,32	2,63	1,94	3,40	2,90	2,19
1,54	2,00	1,39	2,34	2,64	1,95	3,50	2,91	2,20
1,56	2,02	1,41	2,36	2,65	1,96	3,60	2,92	2,20
1,58	2,05	1,43	2,38	2,66	1,97	3,75	2,94	2,22
1,60	2,07	1,45	2,40	2,67	1,98	3,80	2,94	2,22
1,62	2,09	1,47	2,42	2,68	1,99	3,95	2,95	2,23
1,64	2,11	1,49	2,44	2,69	1,99	4,15	2,96	2,28
1,66	2,14	1,51	2,46	2,70	2,00	4,35	2,97	2,30
1,68	2,16	1,52	2,48	2,71	2,01	4,40	2,98	—
1,70	2,18	1,54	2,50	2,71	2,02	4,80	2,98	—
1,72	2,20	1,56	2,52	2,72	2,02	4,85	2,99	—
1,74	2,22	1,58	2,54	2,73	2,03	5,00	2,99	—
1,76	2,24	1,59	2,56	2,74	2,04	5,01	3,00	—
1,78	2,26	1,61	2,58	2,74	2,04	—	—	—

$$P = P_{\delta} + W_m + \Delta P \quad (4.7.2)$$

где

P_{δ} — собственный вес стекла и снега на единицу площади (при вертикальном остеклении $P_{\delta} = 0$) [кН/м^2];

W_m — ветровая нагрузка [кН/м^2]; определяемая согласно разделу 4.3.

ΔP — климатическая (внутренняя) нагрузка от перепадов атмосферного давления и температуры, [кН/м^2].

Значение климатической нагрузки ΔP может быть определено согласно^[33] с учётом понижающего коэффициента пространственной работы стеклопакета f ,

$$\Delta P = f P_0 \quad (4.7.3)$$

где

P_0 — избыточное давление в воздушной полости стеклопакета [кН/м^2], определяемое согласно разделу 4.3.

Коэффициент пространственной работы стеклопакета f определяется как

$$f = 1 / [1 + (a/a^*)^4] \quad (4.7.4)$$

где

a — короткая сторона стеклопакета, [мм];

a^* — «характеристическая длина» стеклопакета, [мм], определяемая как

$$a^* = \sqrt[4]{\left[(d_{szr} D_1 D_2) / (P_n (D_1 + D_2) Bv) \right]} \quad (4.7.5)$$

где

d_{szr} — ширина межстекольного пространства стеклопакета, [мм],

P_n — нормальное атмосферное давление, принимаемое равным

$P_n = 0,1 \text{ Н/мм}^2$ ($100 \text{ Н/м}^2 = 100 \text{ кПа}$);

D_1, D_2 — цилиндрические жёсткости стёкол, определяемые как

$$D = E d^3 / 12 (1 - \mu^2) \quad (4.7.6)$$

где

E — модуль упругости стекла $E = 70\,000 \text{ [Н/мм}^2]$;

d — толщина стекла, [мм]

μ — коэффициент Пуассона (для стекла $\mu = 0,25$)

Bv — безразмерный коэффициент, зависящий от соотношения размеров стеклопакета определяемый по табл. 4.7.2.

Выражая значения D через толщины стёкол, можно привести уравнение (4.7.5) к виду, более удобному для практического использования. Т.е.

$$a^* = 28,9 \sqrt[4]{\left[(d_{szr} d_a^3 d_i^3) / ((d_a^3 + d_i^3) Bv) \right]} \quad (4.7.7)$$

где

d_a — толщина наружного стекла, [мм]

d_i — толщина внутреннего стекла, [мм]

Табл. 4.7.2

a/b	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Bv	0,0194	0,0237	0,0288	0,0350	0,0421	0,0501	0,0587	0,0676	0,0767	0,0857

Примечания

a — короткая сторона стеклопакета ; b — длинная сторона стеклопакета

Для расчётов конструкций структурного остекления принципиально важным является обеспечение несущей способности клевого слоя, воспринимающего сложные по структуре и характеру напряжения, вызываемые совместной работой стеклопакета и элементов профильной системы. Согласно европейскому стандарту EN 13022-1^[91], температурные деформации конструкций структурных светопрозрачных фасадов должны быть учтены в интервале

эксплуатационных перепадов температур $36 \text{ К} < \Delta T < 40 \text{ К}$, при расчётных климатических параметрах, принимаемых на основании табл. 4.7.3. Дополнительно должно быть учтено сочетание ветровой и температурной нагрузок при условиях, определяемых табл. 4.7.4.

Табл. 4.7.3

Климатические параметры для расчётов структурного фасадного остекления (согласно EN 13022-1)		
	Высота над уровнем моря	
	$\leq 1000 \text{ м}$	$> 1000 \text{ м}$
Зимняя температура наружного воздуха	$> -30 \text{ }^\circ\text{C}$	$> -40 \text{ }^\circ\text{C}$
Летняя температура наружного воздуха	$< +40 \text{ }^\circ\text{C}$	$< +30 \text{ }^\circ\text{C}$
Доля солнечной радиации на вертикальную поверхность	Максимум 750 Вт м ²	Максимум 750 Вт м ²
Доля солнечной радиации на горизонтальную поверхность	Максимум 85 Вт м ²	Максимум 85 Вт м ²

Примечание. Для отдельных регионов могут быть приняты более экстремальные температурные условия

Табл. 4.7.4

Расчётные сочетания ветровой и температурных нагрузок для структурного фасадного остекления (согласно EN 13022-1)		
Расчётные условия (период года)	Расчётное значение ветровой нагрузки	Расчётный перепад температур ΔT
Зима ($-20 \text{ }^\circ\text{C}$)	Полная	-25 К
Нормальные (комнатная температура)	Полная	0
Лето ($+80 \text{ }^\circ\text{C}$)	1/2	$+35 \text{ К}$

При расчётах структурного остекления выделяют две принципиальных схемы клеивания стеклопакета, иллюстрируемые рис. 4.7.10 и различающихся по характеру распределения внутренних (климатических) нагрузок в стеклопакете. В случае клеивания

стеклопакета по наружному стеклу (рис. 4.7.10а) согласно стандарту EN 13022-2 [90], в расчётах принимается, что вся действующая внутренняя нагрузка от перепадов давления и температур в стеклопакете воспринимается только наружным стеклом. В случае клеивания стеклопакета по внутреннему стеклу (рис. 4.7.10б) учитывается перераспределение климатической нагрузки в стеклопакете на оба стекла.

Основными расчётными величинами при проектировании структурных фасадов являются высота h_{mc} и глубина e_{mc} несущего клеевого слоя (рис. 4.7.11), расчётные напряжения σ_r в котором не должны превышать допустимых σ_u , принимаемых на основании уравнения (4.7.8) с учётом коэффициента надёжности материала γ_m клеевого слоя (структурного герметика), в общем случае принимаемым равным $\gamma_m = 3$.

$$\sigma_d = \sigma_u / \gamma_m \quad (4.7.8)$$

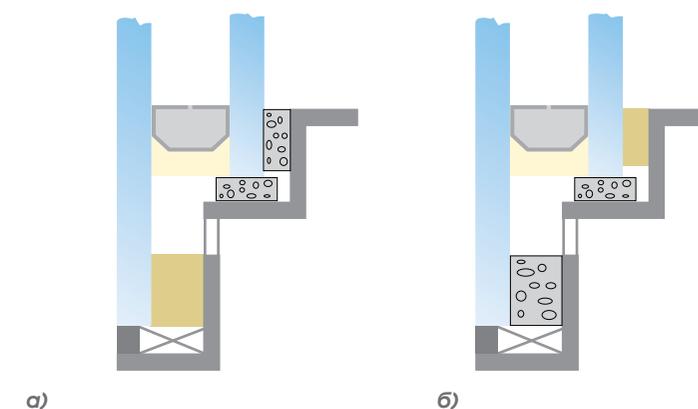


Рис. 4.7.10.

Принципиальные схемы клеивания стеклопакета структурного фасадного остекления.

а) несущий клеевой контур по наружному стеклу; б) несущий клеевой контур по внутреннему стеклу.

Таким образом, основное условие надёжности клеевого слоя запишется в виде

$$\sigma_r / \sigma_d \leq 1 \quad (4.7.9)$$

Расчётное напряжение в клеевом слое σ_r определяется как сумма напряжений, вызываемых воздействием ветровой нагрузки σ_1 [Н/мм²] и усилиями сдвига, вызываемыми воздействием климатических нагрузок в стеклопакете и разницей температурных деформаций профильного элемента и стеклопакета σ_2 , определяемых как

$$\sigma_1 = \frac{W_d a}{2h_{mc}} \quad (4.7.10)$$

где

σ_1 — напряжение в несущем клеевом слое, вызываемое воздействием ветровой нагрузки [Н/мм²]

W_d — расчётное значение ветровой нагрузки, определяемого согласно разделу 4.3 с коэффициентом надёжности $\gamma_f = 1,5$. Т.е $W_d = \gamma_f W$

a — короткая сторона стеклопакета

h_{mc} — высота несущего клеевого слоя согласно рис. 4.7.11

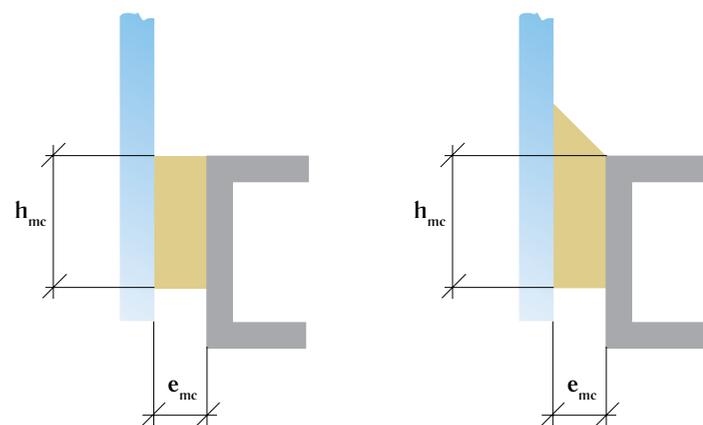


Рис. 4.7.11. Расчётная схема к определению несущей способности несущего клеевого контура структурного фасадного остекления

$$\sigma_2 = \frac{h_{mc} E_m \alpha}{2e_{mc}} \quad (4.7.11)$$

где

σ_2 — напряжение в несущем клеевом слое, вызываемое усилиями сдвига [Н/мм²]

E_m — модуль упругости материала клеевого слоя (структурного герметика)

α — угол поворота кромки стекла в радианах

e_{mc} — глубина несущего клеевого слоя согласно рис. 4.7.11

Поворот кромки стеклопакета α определяется из соотношения (4.7.12) как

$$\alpha = 3,3 \omega_g / a \quad (4.7.12)$$

где

a — короткая сторона стеклопакета

ω_g — прогиб в центре стеклопакета, определяемый из соотношения (4.7.13) как

$$\omega_g = \frac{\alpha_w W_d a^4}{E_m t^3} \quad (4.7.13)$$

где

a — короткая сторона стеклопакета

W_d — расчётное значение ветровой нагрузки, определяемого согласно разделу 4.4 с коэффициентом надёжности $\gamma_f = 1,5$. Т.е $W_d = \gamma_f W$

E_m — модуль упругости материала клеевого слоя (структурного герметика)

α_w — коэффициент Тимошенко и Войновского-Кригера, принимаемый на основании табл. 4.7.5 в зависимости от соотношения сторон стеклопакета

e_{mc} — эквивалентная толщина стеклопакета, принимаемая согласно рис. 4.7.12

Табл. 4.7.5

Значения коэффициентов α_w Тимошенко и Войновского-Кригера для соотношения длинной — b и короткой- a сторон стеклопакета (EN 13022-1)

b/a	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	3,0	4,0	5,0	>5
α_w	0,0444	0,0616	0,0770	0,0906	0,1017	0,1110	0,1335	0,1400	0,1417	0,1421

Минимально допустимые размеры сечения несущего клеевого слоя, согласно EN 13022-1, могут быть приняты на основании табл. 4.7.6, а итоговая формула для определения расчётных напряжений σ_r в клеевом слое запишется в виде уравнения (4.7.14).

Табл. 4.7.6

Минимально допустимые размеры сечения несущего клеевого слоя структурного фасадного остекления (см. рис.4.7.11) (EN 13022-1)

h_{mc} (мм)	e_{mc} (мм)
$6 \leq h_{mc} \leq 12$	$6 \leq e_{mc} \leq 12$
$12 < h_{mc} \leq 20$	$h_{mc}/2 \leq e_{mc} \leq 12$
$h_{mc} > 20$	$10 \leq e_{mc} \leq 12$

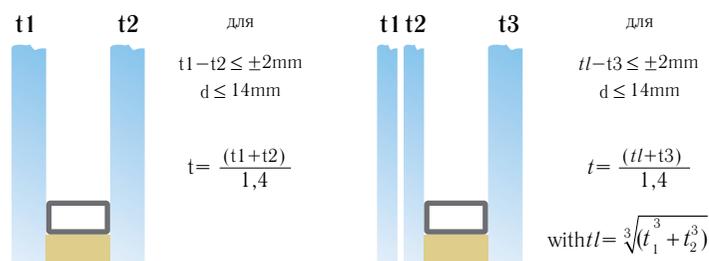


Рис. 4.7.12.

Расчётные схемы к определению эквивалентной толщины стеклопакета структурного фасадного остекления

$$\sigma_r = \sigma_1 + \sigma_2 = \frac{W_d a}{2h_{mc}} + \frac{h_{mc} E_m \alpha}{E_m t^3} \quad (4.7.14)$$

Как показывает практический опыт, инженерные методики, базирующиеся на предпосылках линейной теории упругости, в целом демонстрируют удовлетворительную работоспособность на стадии предварительного выбора конструкции стеклопакета, однако не учитывают сложно прогнозируемые напряжения от температур и локальной концентрации напряжений.

Так наибольшее количество споров по зданиям и сооружениям со светопрозрачными фасадами и кровлями, возведённым и эксплуатирующимся в настоящее время в России, вызывает явление самопроизвольного разрушения закалённых стёкол, которое может произойти в любой из дней эксплуатации здания без каких-либо видимых внешних воздействий.

Экспериментально установлено, что дробность разрушения стекла увеличивается с увеличением прочности, что характерно для закалённого стекла, обладающего высокими внутренними напряжениями. Во многих случаях закалённое стекло разрушается под действием остаточных напряжений с образованием мелкодробной сетки трещин, разделяющих стекло на достаточно правильные ячейки, крупность которых зависит от степени напряжённого состояния. При этом начальное напряжённое состояние закалённого стекла определяет высокую вероятность его разрушения после снятия внешней нагрузки. Это явление, частично отражаемое рис. 4.7.6, рис.4.7.8 и рис. 4.7.9, где, тем не менее, наблюдается взаимосвязь разрушения и закономерностей формирования напряжённого состояния стеклянных пластин, часто происходит вне всякой системной зависимости, поддающейся хотя бы минимальному математическому описанию.

На рис. 4.7.13 показан процесс демонтажа стеклопакетов светопрозрачного купола служебного здания МИД РФ с целью выявления причины разрушения стёкол, постоянно наблюдавшегося на протяжении 9-ти лет с момента завершения монтажа светопрозрачных конструкций (2000 г.). На фото хорошо видно, что рабочие, демонтирующие стеклопакет спокойно передвигаются по верхнему



а)



б)

Рис. 4.7.13.
 Обследование стеклопакетов светопрозрачного купола служебного здания МИД РФ.
 а) Разрушение верхнего закалённого стекла в трёх стеклопакетах нижнего контура;
 б) Вскрытие конструктивной ячейки купола – демонтаж стеклопакета.

стеклу и выполняют необходимые операции. Иными словами, верхнее закалённое стекло пакета прекрасно выполняет свои функции, рассчитанные из условия безопасного периодического обслуживания. Вместе с тем, картина разрушения стекла, показанная на рис. 4.7.13а наглядно свидетельствует о действии некоторых природных сил, происходящих без участия человека и достаточных для превращения этого кажущегося абсолютно надёжным стекла в мелкие осколки.

Определённые объяснения может дать фото рис. 4.7.14, показывающее состояние стеклопакетов нижнего ряда купола после снегопада и иллюстрирующее неравномерный температурный режим верхнего стекла в зимнее время. Однако рассчитать и спрогнозировать напряжения, возникающие при действии такой нагрузки, на современном уровне практически невозможно.

Как показывает опыт эксплуатации сооружений с крупноформатным остеклением, формирование очага разрушения за счёт



Рис.4.7.14.
 Распределение снеговой нагрузки и локальное льдообразование на куполе служебного здания МИД РФ.

выпадения дефектной кристаллитной группы, характерно для закалённых стёкол, обладающих высоким потенциалом внутренних напряжений, и никогда не наблюдается для обычных отожжённых стёкол. Однако разрушение стеклопакетов и появление трещин, вызванных перекосом стеклопакетов при монтаже (рис.4.7.15), следующих за деформационными или осадочными трещинами зданий (рис.4.7.16), а также вызванных общей недостаточной пространственной жёсткостью светопрозрачной оболочки, являются в такой же степени непредсказуемыми. Характерной особенностью является очень медленный рост начальных трещин стандартных фасадов, возникающих в краевой зоне при монтаже (рис.4.7.17). Это в известной степени дополнительно иллюстрирует расчётную схему (рис.4.7.4), применительно к шарнирному опиранию стеклопакета по контуру.



Рис.4.7.15. Трещина в стеклопакете сложной формы, вызванная неравномерным опиранием на несущие конструкции кровли

Таким образом, мы можем увидеть, что полноценная теоретическая база, позволяющая описать характер пространственной работы стеклопакетов под действием нагрузок, вызывающих разрушающие напряжения в стёклах, и установить их взаимосвязь с какими-либо системными ошибками в производственных технологиях или в проектировании светопрозрачных конструкций, на сегодняшний день не разработана в достаточном объёме.



Рис.4.7.16. Трещина в стеклопакете, вызванная осадками здания

Характер действительных эксплуатационных прогибов стёкол, картина их разрушения на различных строительных объектах, а также научные исследования, проведённые в ряде стран, позволяют поставить под сомнение адекватность методов теории упругости и сопромата, применявшихся для описания напряжений и деформаций в стеклянных пластинах до настоящего времени. Так, в частности, явления возникновения мембранных напряжений исследованы в США и Канаде; а результаты исследований отражены внесением соответствующих корректировок в нормативные документы этих стран.



Рис. 4.7.17.
Начальные
«монтажные»
трещины в сте-
клопакетах

Реальные изгибы стёкол, описываемых теорией тонких пластин с большими прогибами, в значительной степени зависят от граничных условий. Это означает, что вывод дифференциальных уравнений, отражающих реальную картину работы стекла в светопрозрачной конструкции, определяется не только напряжениями и деформациями самой пластины, но условиями склеивания стеклопакета и способом его закрепления на элементах профильной системы. Дополнительную сложность в определении условий разрушения стекла в герметичных стеклопакетах, вносит определение величин знакопеременных расчётных нагрузок и их сочетаний, изменяемых в неравномерных временных интервалах.

Для строительного проектирования принципиально важно исследование и прогнозирование напряжённого состояния стёкол пакета на стадии, предшествующей разрушению. Полноценное понимание этого фактора является ключевым аспектом построения надёжных и безопасных конструктивных схем зданий со светопрозрачными наружными оболочками. При современном состоянии расчётной теоретической базы это, в свою очередь, определяет необходимость тщательной разработки архитектурно-строительных решений, обеспечивающих такие факторы как:

- Максимально возможное снижение нагрузок на наружное стекло пакета (например — за счет их перераспределения в системах «двойных фасадов» — см. гл. 5);
- Устранение концентраторов локальных напряжений (особенно в краевой зоне стеклопакетов);
- Высокая степень ремонтпригодности и удобство периодического обслуживания светопрозрачной оболочки (наличие ходовых мостиков, подъемных механизмов и др.)



Архитектурно-конструктивные принципы и инновации в строительстве зданий со светопрозрачными наружными оболочками

The last chapter of a book summarize some innovative ideas of modern glass envelope construction. It describes the idea of an "ideal glass building" of future, based on the European "green building" conception and a variety of new engineering solutions. Such as: the automatically controlled intellectual systems as a hardware for light transparent envelopes with changeable characteristics, the vacuum IGUs, double skin facades ets. As a resulting conclusion the main architectural and constructional principles for the modern glass building construction are formulated

Архитектурно-конструктивные принципы и инновации в строительстве зданий со светопрозрачными наружными оболочками

В предыдущих разделах книги, по существу отражающих зарождение и развитие философии «стеклянной архитектуры», были проанализированы этапы конструктивного и технологического становления идеи, которая продолжает до сегодняшнего дня волновать человечество, несмотря на кратковременные периоды отторжения и справедливой критики. Эта идея не останавливается в своем развитии. В технически развитом сообществе она постепенно обрывает опытом «работы над ошибками», выдвигая новые задачи и противоречия, которые еще предстоит разрешить профессионалам в будущем.

Объективность оценки требует называть этот процесс далеко не законченным. Таким образом, в завершающей главе книги будет справедливее говорить не о каких-либо точно сформулированных рекомендациях, а о подведении некоторых промежуточных итогов и новых технических идей, определяющих тенденции развития на обозримое десятилетие. Очевидно, что наряду с кропотливой и явно необходимой работой по созданию научной и нормативно-технической базы в области светопрозрачных конструкций, это десятилетие будет характеризоваться и непосредственно углублением самой идеологии «стеклянного здания», которое недвусмысленно прослеживается в архитектуре и экономике строительства современной Европы.

Необходимо отметить, что при динамичном развитии технологий и многочисленных исследовательских проектах среди европейской научной общественности, архитекторов и строительных инженеров до сих пор не существует единого мнения по поводу того, каким должно быть это «стеклянное здание» будущего. Скорее мы можем наблюдать разнообразие часто противоречивых теорий и мнений, вращающихся вокруг двух основных смысловых направлений, приоритетных для современного строительства и архитектуры европейских стран.

Мистическая идея Миса Ван дер Роэ, выражающая единение человека с природой, формирует основу современной концепции экологичного здания нового типа, часто обозначаемую словосочетанием Green House (от англ. — «зелёный дом»). Наряду с этим, современное европейское сообщество всерьёз обеспокоено растущими выбросами в атмосферу углекислого газа CO₂ — продукта сжигания топлива, расходуемого на отопление зданий. По мнению исследователей, это является основной причиной глобального потепления климата, сопровождающегося природными катастрофами, доля которых за последние десятилетия на европейской территории резко возросла. Аномальная жара и засуха в Центральной России летом 2010 года дополнительно обострила вопрос о неконтролируемом выбросе в атмосферу тепла, теряемого из отапливаемых зданий в зимнее время в крупных густонаселённых городах и промышленных центрах.

Таким образом, может быть сформулирован второй базовый постулат строительной науки, связанный с разработками в области снижения общего потребления энергии зданиями, сокращения теплопотерь в окружающую среду, а также поисков возможного использования альтернативных энергетических ресурсов — солнца, ветра и геотермальных источников.

В известном смысле мы можем говорить о формировании некоторого нового мировоззрения в архитектуре, сочетающего в себе два противоречивых и возможно взаимно исключающих фактора. С одной стороны, единство с природой и улавливание зданием солнечной энергии может быть обеспечено только при наличии в здании большого количества панорамного и кровельного остекления. С другой — как было показано в материалах предшествующих разделов — наличие большого количества остеклённых поверхностей в наружной оболочке порождает комплекс технических проблем, окончательное решение которых на современном этапе пока не найдено. Тем не менее, современная европейская практика представляет собой последовательно развивающийся процесс, направленный на поиск компромисса, выражающегося в некоторой принципиально иной рационалистической философии здания со светопрозрачной наружной оболочкой.

Так, в частности, профессор Университета Эксплуатации зданий и Энергетического проектирования г. Брауншвейга (Германия) Др-р М. Норберт Фисч отмечает ^[42]: «Можно конечно запроектировать любое здание, даже нелепое, с полностью стеклянной наружной оболочкой и сверхдорогой системой обслуживания — современные достижения в инженерных методиках и уровень развития производственных технологий позволяют архитекторам и инвесторам осуществлять это неограниченно по всему земному шару. Возможно, эти импозантные проекты необходимы для демонстрации технических возможностей (аналогично Формуле-1 в автомобилестроении), однако с точки зрения энергоэффективности и экологии они совершенно бессмысленны... Приоритетом сегодняшнего дня является проектирование энергоэффективных зданий с высоким уровнем эксплуатационного комфорта и нанесением минимального вреда окружающей среде».

Немецкий архитектор Штефан Бехниш формулирует своё видение здания нового типа следующим образом ^[42]. «Проектирование более реалистичных и жизнеспособных зданий, безусловно, оказывает влияние на процесс формообразования и композиционное решение фасадов, однако включает в себя и некоторые другие аспекты. В качестве примера могут быть названы два таких принципиально значимых фактора, как используемые материалы и организация приточной вентиляции. Со временем должна отмереть идея использования подвесных потолков (имеется в виду как пространство для размещения вентиляционного оборудования — прим. переводчика). Несущий каркас здания должен будет обладать достаточной массивностью для того, чтобы иметь возможность стабилизации теплового режима в здании. Это окажет влияние не только на этажность, но и на композиционное решение фасадов. Более того, в будущем возникнет принципиальная разница в подходах к проектированию фасадов, различно ориентированных по сторонам света — южные фасады будут менее открытыми по сравнению с северными.

При проектировании жилого здания, прежде всего, необходимо думать не о летнем охлаждении, а об отоплении в зимний период.

Для помещений административно-офисных зданий высокие тепловыделения от технологического оборудования выдвигают на передний план проблему летнего охлаждения. Очевидно, что по сравнению с обеспечением зимнего теплового режима, это на порядок более сложная задача. Поскольку мы больше не можем позволить себе в качестве генеральной концепции искусственное кондиционирование, необходимо найти какое-то иное удовлетворительное решение... В общем смысле мы должны думать о здании, обладающим изменяемыми свойствами, применительно ко времени года».

Возрастающие требования к теплозащитным качествам светопрозрачных конструкций, заставляют задуматься о необходимости качественного скачка, как в технологиях, так и в принципиальных подходах к разработке архитектурно-конструктивных решений светопрозрачных оболочек. Так, если до 2008 года в Германии требуемое приведенное сопротивление теплопередаче окон составляло порядка $R = 0,66 — 0,71 \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Вт}$; в 2009 году — $R = 0,83 — 1,00 \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Вт}$, то к 2012 году требования нормативов достигнут $R = 1,00 — 1,25 \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Вт}$ ^[28]. Наряду с особенностями экономики, динамика роста теплозащитных показателей отражает тенденции к достижению предела возможностей массовых стеклопакетов, конструкция и процессы теплообмена в которых описаны соответственно в *главах 3 и 4*. В европейской строительной практике решение указанной проблемы в основном развивается в области разработки вакуумных стеклопакетов, поиски оптимальных технологий производства которых ведутся сегодня по всему миру, а также разнообразных концептуальных решений систем светопрозрачных «двойных фасадов».

Применительно к стеклопакетам вакуумирование разработано с целью полного устранения теплопотерь за счет теплопроводности и конвекции в воздушной прослойке между листами стекла. Современные тенденции в области конструирования стеклопакетов такого типа развиваются по пути создания герметичного светопрозрачного заполнения, состоящего из двух листовых стекол (толщиной порядка 4мм) расположенных параллельно друг другу

на расстоянии от 0,2 до 0,5 мм (рис.5.1). Для обеспечения вакуума в межстекольном пространстве воздух откачивают с помощью вакуумного насоса через специальное отверстие, уменьшая давление внутри до 10^{-3} Па, и соответственно увеличивая нагрузку на стекла до 10 тонн на 1 м^2 в нормальных эксплуатационных условиях (под действием атмосферного давления). Для предотвращения «раздавливания» стеклопакета давлением атмосферы, в межстекольном пространстве устанавливают матрицу прокладок (спейсеров), в наиболее распространённом случае представляющих собой стеклянные шарики. По периметру стеклопакет герметично заваривается лазерным лучом или методом «холодного» соединения с помощью индия и плотного слоя эпоксидного герметика. Для повышения теплозащитных характеристик вакуумных стеклопакетов (снижения интенсивности теплообмена за счёт радиации) в них могут быть использованы низкоэмиссионные стёкла с напылением (см.разделы 2.2.8 и 4.1). Согласно теоретическим расчетам, сопротивление теплопередаче таких стеклопакетов может достигать $2,0 \text{ м}^2 \text{ °C/Вт}$.

Основной идеей энергетической концепции «двойного фасада» (рис.5.2) является создание некоторой дополнительной буферной

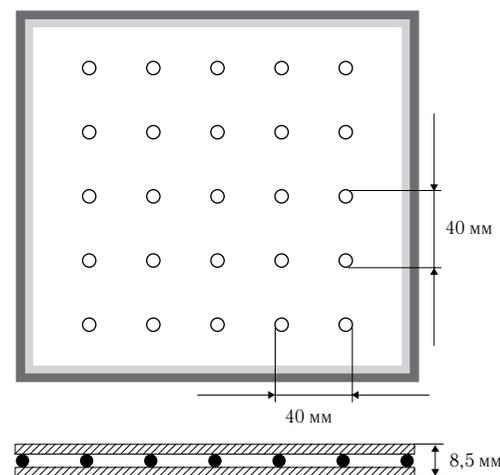


Рис.5.1. Принципиальное конструктивное решение вакуумного стеклопакета

зоны между основной светопрозрачной обложкой здания, обеспечивающей основные теплозащитные функции, и наружной средой. Технически это осуществляется за счёт наружного светопрозрачного экрана «в одно стекло», выполняемого в различных конструктивных вариантах, дифференцируемых по характеру крепления и степени воздухопроницаемости.

В результате одновременного снижения ветрового давления на основной теплозащитный контур остекления, наряду с некоторым подогревом буферной зоны от зимнего солнца, в отопительный период температура воздуха в промежуточном пространстве двойного фасада оказывается на несколько градусов выше температуры окружающей среды. Таким образом, для проветривания помещений подаётся более тёплый приточный наружный воздух — происходит существенное снижение энергозатрат на его подогрев, снижаются общие теплотери здания за счёт вентиляции и, соответственно — нагрузка на систему отопления.

Наряду с расширением возможностей в формировании микроклимата, отражённых в многочисленных публикациях, системы

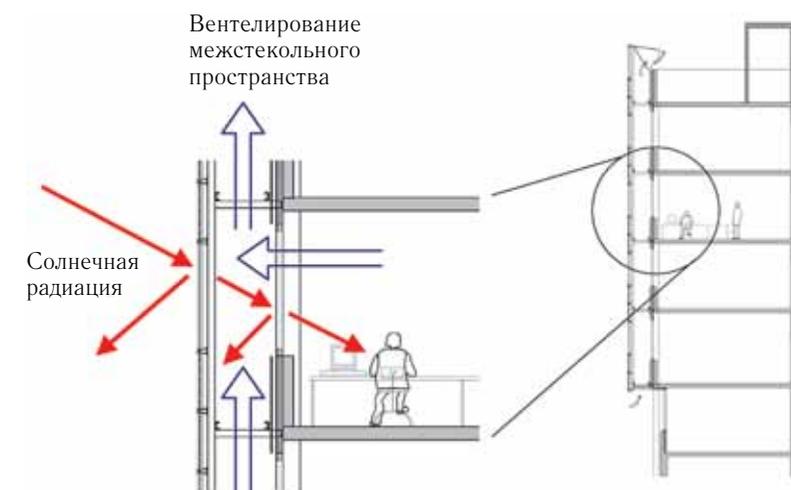


Рис.5.2. Общая энергетическая концепция «двойного светопрозрачного фасада» — создание буферной зоны между основной светопрозрачной обложкой здания и наружной средой.

«двойных фасадов», а также менее известные «двойные стеклянные кровли», построенные по аналогичному признаку, позволяют в значительной степени повысить такие показатели светопрозрачной оболочки как надёжность, долговечность и ремонтпригодность.

Несомненно, что перераспределение функций между наружным защитным экраном «в одно стекло» и основным функциональным контуром остекления из стеклопакетов, значительно разгружает стеклопакет — полностью снимает с наружного стекла пакета нагрузку от ветра (в светопрозрачных кровлях — от снега), стабилизирует и снижает циклические знакопеременные напряжения в наружном стекле и краевой зоне, вызываемые климатическими нагрузками (см. гл.4). Важным преимуществом двойного фасада является возможность размещения в буферной зоне солнцезащитных устройств, уязвимых к воздействию атмосферных осадков и ветра.

Помимо конструктивных преимуществ, связанных с возможностью перераспределения нагрузок воспринимаемых светопрозрачной оболочкой, «двойной фасад» несомненно расширяет и рамки архитектурного творчества, позволяя снять зрительные ограничения в пропорциональном соотношении стекла и непрозрачных частей при новом строительстве, и создавая новый стиль для реконструируемых зданий (рис. 5.3).

Разработки в области двойных фасадов, приоритетно характерные для стран Северной Европы, тесно увязаны с противоречивой и много обсуждаемой проблемой использования зданиями солнечной энергии. Как уже отмечалось в главе 4, энергетическая мощность солнечного излучения, достигающего поверхности Земли, достигает 1100 Вт/м^2 — таким образом, один час солнечного света в среднем эквивалентен энергии в 0,1 литра угольного топлива. По данным 1985 года ^[35] доступное на нашей планете количество солнечной энергии превышало общемировую потребность в энергии приблизительно в 2 500 раз!

В настоящее время принципиальные подходы к использованию солнечной энергии в системах инженерного оборудования зданий, уже достаточно хорошо известны и реализованы в южных странах на уровне массового строительства (рис.5.4). Не менее хорошо из-

Рис. 5.3.
Архитектурные решения зданий с двойными фасадами.
а) в новом строительстве;
б) при реконструкции

а)



Административно-офисное здание,
г. Москва

б)



Административное здание, г.Рига,
Латвия



Жилой дом, г.Пордубица, Чехия



Административное здание,
г. Розенхайм, Германия

вестны и отработаны принципы преобразования солнечной энергии в электрическую при помощи фотогальванических модулей (ФГ-модулей), обеспечивающих значительную экономию электроэнергии в летнее время даже в умеренных климатических зонах средней Европы (рис.5.5).

Вместе с тем, возможность использования солнечной энергии непосредственно для отопления внутреннего пространства здания наталкивается на целый комплекс проблем, принципиально сходных для строительства по всему миру.

Основной технический парадокс заключается в том, что дополнительные резервы энергии для систем отопления необходимы в отопительный период, а максимальная солнечная активность наблюдается в летние месяцы (рис.5.6), когда поступления тепла во внутреннее пространство здания крайне нежелательны. Более того, — как уже отмечалось в главе 4, интенсивность теплового



Рис.5.4.
Коллектор горячей воды на крыше жилого дома, обогреваемый прямым солнечным теплом и дополнительными солнечными батареями.
О. Кипр.



Рис.5.5.
Использование фотогальванических модулей в зданиях различного назначения. Германия.



воздействия солнечной радиации летом настолько высока, что мы вынуждены искать разнообразные способы защиты помещений здания от её негативного воздействия.

На рис. 5.6 показаны годовой ход температур наружного воздуха и доля солнечной радиации, поступающей в г. Москве на горизонтальную поверхность (кровлю) и южный, юго-восточный и юго-западный фасады. Из графиков хорошо видно, что наибольшая доля солнечной радиации поступает на кровлю с максимумом в летние месяцы, когда максимальная степень облучения поверхности солнцем совпадает с годовым максимумом температур наружного воздуха. Это, в свою очередь, говорит о том, что использование светопрозрачной кровли в качестве улавливателя солнечной энергии будет сопровождаться значительным перегревом находящегося под ней пространства. Таким образом, помещение, располагаемое под коллектором солнечного тепла в виде стеклянной кровли, не может иметь никакой другой полезной функциональной нагрузки; а прямое перераспределение тепла в другие помещения в жаркие летние месяцы является также нежелательным.

Наиболее привлекательная картина наблюдается для вертикальных фасадов южной ориентации, где максимум поступления солнечного тепла на средних и северных широтах совпадает с отопительным периодом. Этот фактор определяет основной акцент в проектировании «солнечных домов», разрабатываемых на экспериментальном уровне в европейских странах именно на использовании южного фасада в качестве улавливателя солнечной энергии. Экономическая эффективность таких решений тесно увязана с климатическими особенностями района строительства и определяется соотношением затрат на возведение «солнечного дома» с количеством солнечной энергии, которая может потенциально улавливаться южным фасадом на данной широте.

Вместе с тем, как показывает опыт европейских проектов [29],[30], этот подход также наталкивается на наиболее болезненную для полностью остеклённых фасадов проблему солнечного перегрева. Из рис. 5.6, иллюстрирующего климатические условия средней полосы России (г. Москва), также хорошо видно, что, наряду

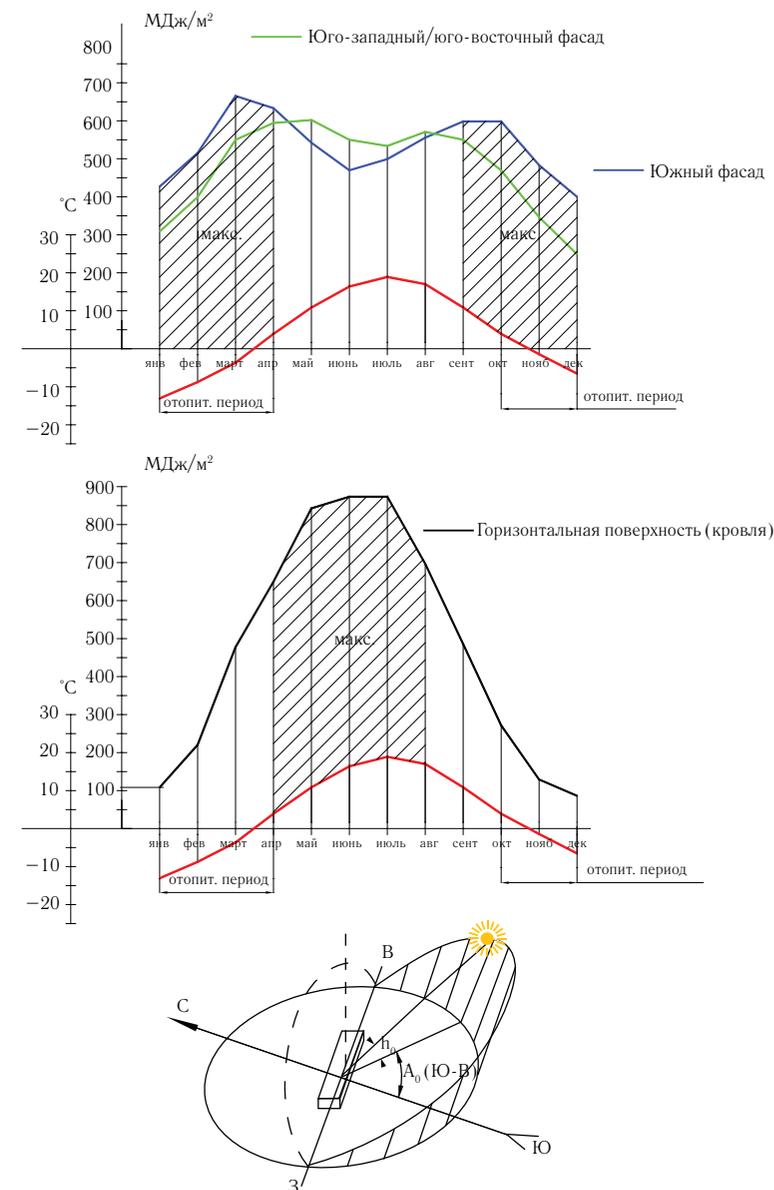


Рис. 5.6.

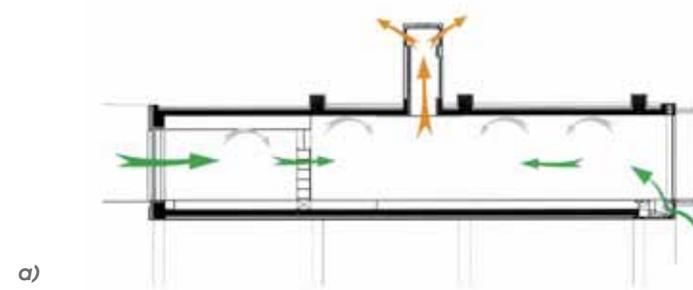
Годовой ход температур наружного воздуха и доля солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность (кровлю) и южный, юго-восточный и юго-западный фасады в г. Москве.

с высокой долей солнечного тепла, поступающего через южный и юго-западный фасад в отопительный период, она не менее высока и в жаркие летние месяцы.

Как уже отмечалось в предыдущих главах, решение проблемы перегрева остеклённых помещений является наиболее эффективным при условии применения систем дополнительной наружной солнцезащиты в комбинации с солнцезащитными стёклами. В качестве альтернативы дорогостоящему летнему кондиционированию, в странах средней и северной Европы часто используется принцип сочетания систем наружной солнцезащиты с разнообразными режимами управляемого интенсивного охлаждения здания (особенно в ночное время) за счёт естественной или принудительной вентиляции (рис. 5.7). Наиболее простой и дешёвый способ организации приточной вентиляции в зданиях с полностью остеклёнными фасадами, основывается на подаче наружного приточного воздуха через открывающиеся окна или специальные приточные клапаны, располагаемые в плоскости остекления, приоритетно на северном фасаде. Создаётся эффект сквозного проветривания, аналогичный использовавшемуся в бывшем СССР при проектировании зданий для крайних южных районов (Ташкент, Ашхабад и т.п.). Предотвращение поступления в здание перегретого наружного воздуха в дневное время суток достигается за счёт расположения вентиляционных окон или клапанов южного фасада за экраном наружной солнцезащиты (см. рис. 5.7).

В любом случае, очевидно, что круглогодичный цикл эксплуатации здания с большими площадями остеклённых ограждений предполагает гораздо большую долю энергозатрат по сравнению с традиционными сооружениями, а «стеклянная архитектура» является наиболее проблемным звеном в общеевропейской концепции здания будущего с «нулевым» или положительным энергетическим балансом. Основные архитектурно-конструктивные принципы реализации этой идеи могут быть в общем виде описаны тремя конструктивными концепциями концерна Schüco KG. А именно:

Концепция Е (Энергия (Energy)) — энергоэффективное здание, обеспечивающее экономию энергии, требуемую территориальными законодательными актами и нормативными документами.



а)



б)



в)

Рис. 5.7.

Организация естественного воздухообмена в зданиях с полностью остеклёнными фасадами.

а) Концепция охлаждения внутреннего пространства здания в летнее время за счёт комбинированной системы приточной вентиляции и наружной солнцезащиты (Концепция Здорового Здания, Ренсон, Бельгия);

б) Открывающиеся окна, расположенные за экраном наружной солнцезащиты.

в) Вентиляционные приточные клапаны

Концепция E² (Энергия² (Energy²)) — здание, обеспечивающее экономию энергии, и её генерирование, достаточное для организации самостоятельного цикла жизнеобеспечения. Потребность в дополнительной энергии от внешних источников, необходимая такому зданию, не должна превышать 400 кВт/м² в год.

Концепция E³ (Энергия³ (Energy³)) — здание-генератор энергии, производящее её в количествах, превышающих потребление. Объемно-планировочное и конструктивное решение такого здания предполагает наличие аккумулятора энергии и возможности передачи её на удалённое расстояние.

Системные концепции E² и E³, удачно сочетающие в себе оба базовых европейских постулата, — энергоэффективность и зрительное единство с природой, построены на экономии энергии за счёт наружной светопрозрачной оболочки с мобильно изменяемыми свойствами и преобразовании тепловой энергии Солнца. Выразительная архитектура зданий такого типа обеспечивается интегрированными техническими решениями для панорамного остекления на всю высоту помещения, обеспечивающего зрительную невесомость и максимум пространства.

Основная функция генерирования энергии в концепции E² возложена на инновационные комбинированные фотогальванические модули, выполняемые на всю высоту этажа (рис. 5.8) и сочетающие в себе функции улавливания энергии и частичного затенения помещения (вместо штор). Солнечная энергия, улавливаемая этими элементами, преобразуется в электрическую и используется для абсорбирующего модуля охлаждения воды в системе кондиционирования здания. Для осуществления естественного проветривания помещения солнечный модуль может быть совмещён с открываемой створкой.

Основная функция сохранения тепловой энергии в зимний период в концепции E² возложена на систему вентиляции, осуществляемой по принципам, отличным от традиционных зданий. На смену традиционным системам централизованной вентиляции здания, требующим устройства подвесных потолков и промежуточных технических этажей, в концепции E² приходят компактные приточно-

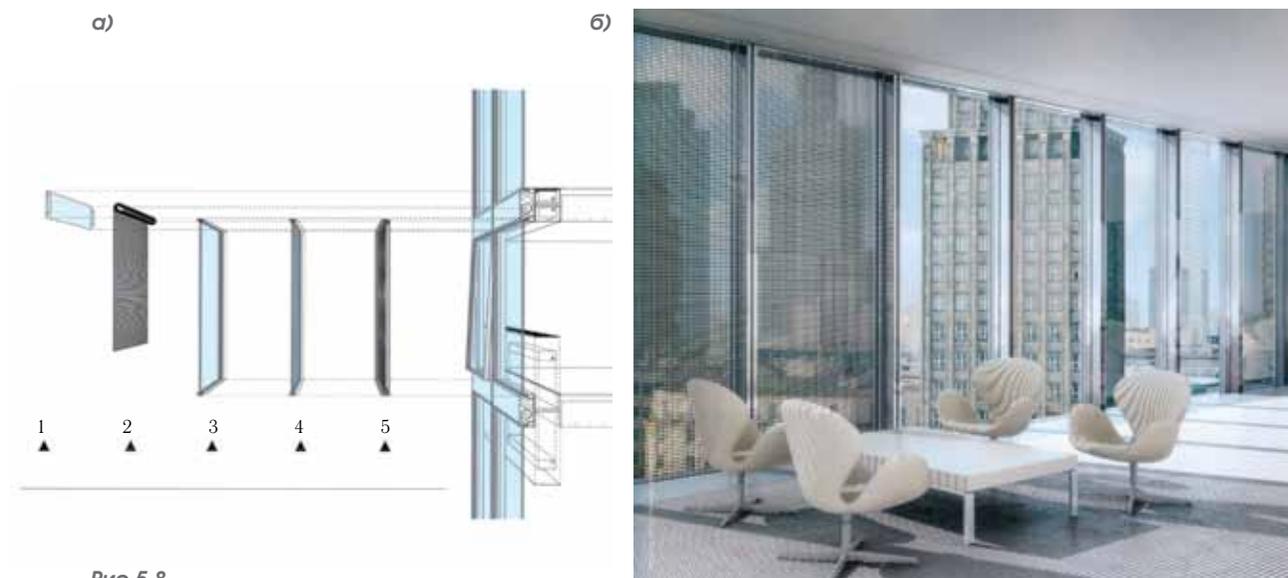
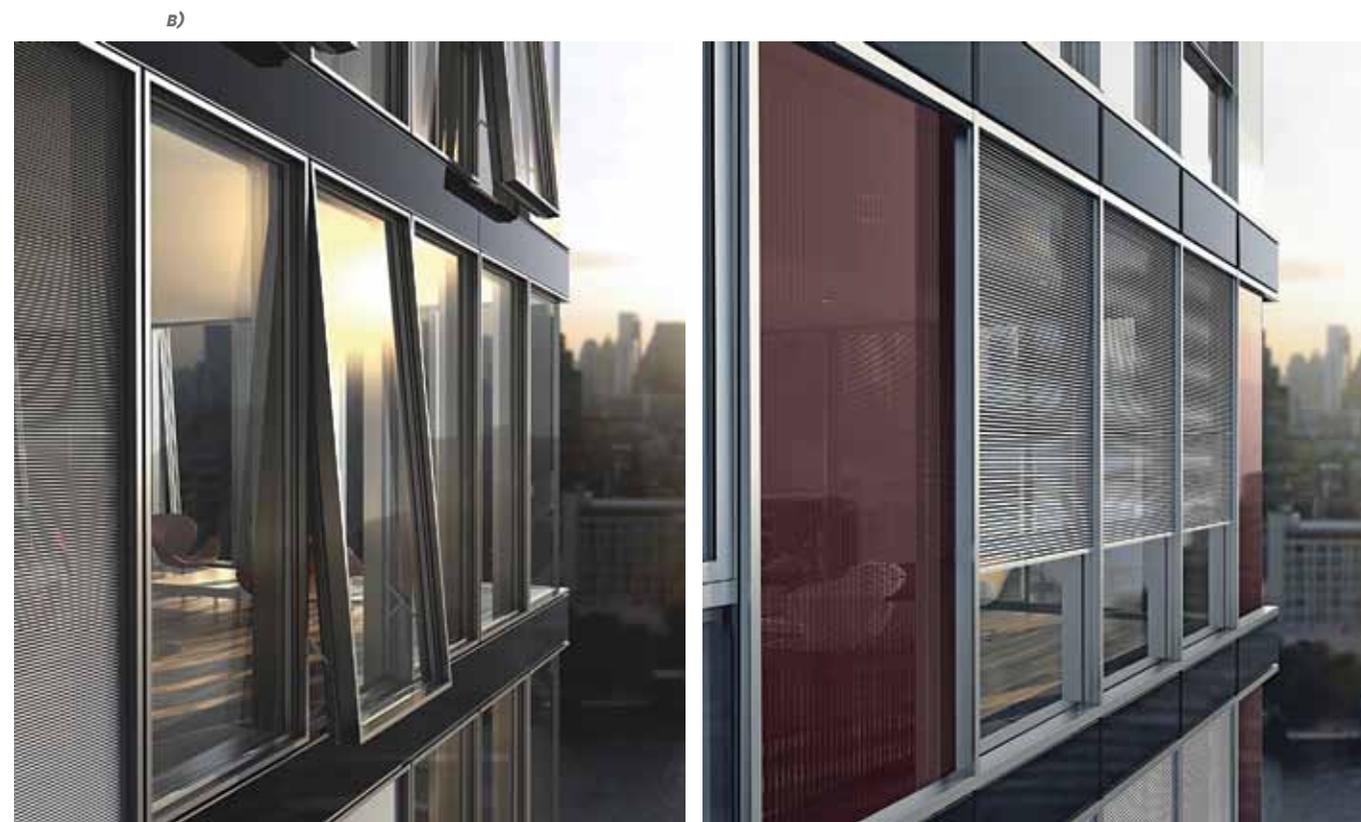


Рис. 5.8.

Комбинированный панорамный фотогальванический модуль. Schüco Prosol TF

а) Принципиальное конструктивное решение; б) общий вид в интерьере; в) общий вид на фасаде в комбинации с экранами активной солнцезащиты и открываемыми окнами

1 — облицовочная панель; 2 — солнцезащита; 3 — оконный блок; 4 — ФГ-элемент; 5 — тепловой коллектор



вытяжные приборы с электроприводами, располагаемые в уровне перекрытий вместе со сворачивающимися роллетами солнцезащиты (см. раздел 3.3) и оснащённые устройствами рекуперации тепла (рис.5.9). Каждый из приборов или некоторая интегрируемая группа приборов программируется для обеспечения требуемого режима вентиляции в отдельном помещении и может быть гибко адаптирована в зависимости от потребностей находящихся в нём людей и условий внешней среды в данный момент. В европейских странах вентиляционные системы, построенные по такому принципу, получили название децентрализованной вентиляции.

Еще одним инновационным конструктивным элементом энергоэффективной оболочки здания может стать термоактивный стеновой модуль РСМ с сотовыми ячейками (рис.5.10), заполненными полупрозрачным материалом на основе парафина (англ. — РСМ — phase change materials). За счёт фазовых переходов при нагревании-охлаждении заполняющего материала, в разное время суток происходит аккумулирование тепла или холода. В дневное время солнечное тепло, падающее на фасад здания, расходуется на расплавление парафина, не проникая в помещение. Стеновой модуль РСМ аккумулирует тепло. При охлаждении помещения в ночное время парафин затвердевает, постепенно отдавая тепло в помещение.

Преобразование солнечной энергии в электрическую в системе E³ осуществляется при помощи полупрозрачных тонкоплёночных фотогальванических модулей Prosol TF. Гелиоэнергия вырабатывается фотогальваническими модулями как постоянный ток, передаваемый в аккумуляторные батареи, и преобразуется далее в инверторе в переменный ток с напряжением 230 В.

Приведённый выше краткий анализ инновационных идей отражает приоритетные направления европейской инженерно-строительной науки в области проектирования зданий со светопрозрачными наружными оболочками. В концептуальном отношении они объединяют новые технологические и архитектурно-конструктивные решения с общей тенденцией к созданию полностью автоматизированных комплексов, контролирующих параметры микроклимата и безопасности (возникновение пожара и задымление)

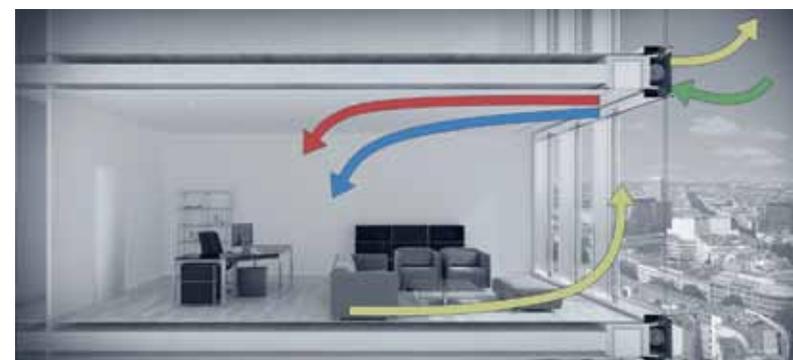
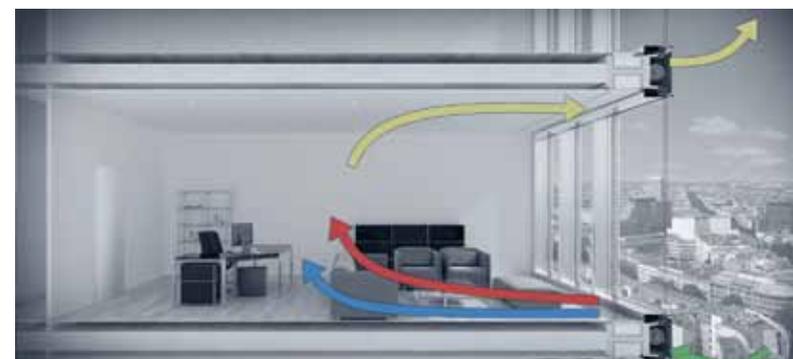
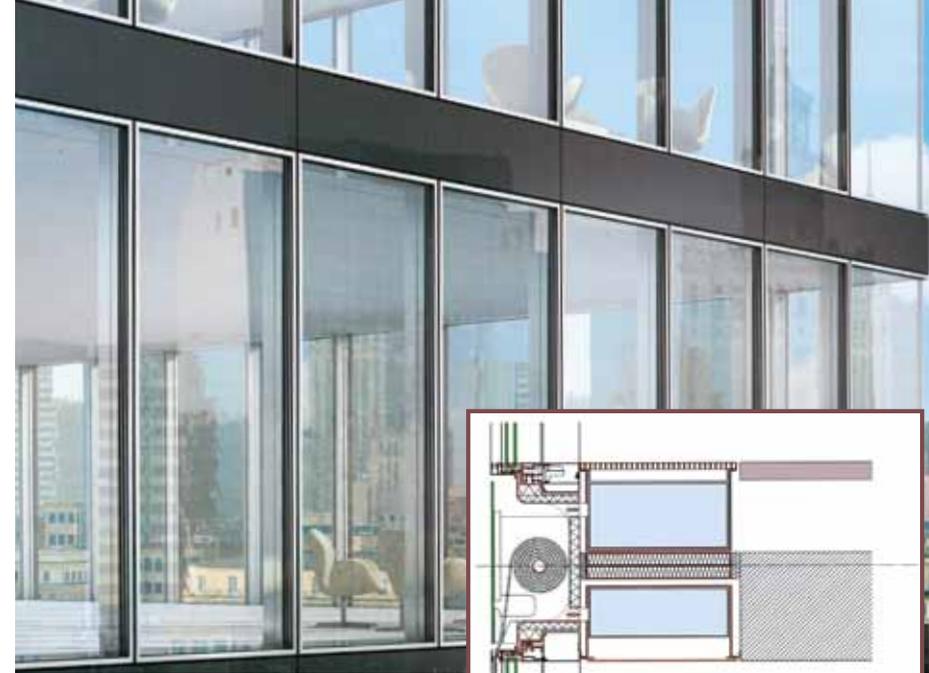


Рис.5.9. Устройства децентрализованной вентиляции с системой рекуперации тепла, и элементы активной солнцезащиты располагаемые в уровне перекрытия. Schüco E2

и осуществляющих мобильное централизованное управление светопрозрачными конструкциями в так называемых системах «интеллектуального здания».

Этот непрекращающийся инженерный поиск определяет значительный по времени и трудоёмкости этап работы, отделяющий современное здание со светопрозрачной наружной оболочкой и общую концепцию его развития от некоторого устоявшегося конструктивного совершенства и эталона, в достаточной степени присущего возводимым в настоящее время традиционным зданиям. При интенсивности и многочисленности европейских проектов и исследований в области формирования микроклимата и конструктивной надёжности подобных сооружений, до сегодняшнего дня не найдено адекватное решение многих принципиальных проблем.

Рис. 5.10.

Термоактивный стеновой модуль Schüco PCM (англ. — Phase Change Materials) с преобразованием энергии фазовых переходов конструкционного материала



К ним, прежде всего, необходимо отнести перегрев помещений при тепловом воздействии инсоляции, а также фактор непредсказуемого хрупкого разрушения строительного стекла, перед которым человечество остаётся практически бессильным. Из этого логично вытекает ключевой принцип построения конструктивных схем «стеклянных зданий», общепринятый сегодня на европейском континенте, и базирующийся на допустимости разрушения отдельного элемента светопрозрачной оболочки без нанесения вреда зданию как единой конструктивной системе и человеку, в нём находящемуся.

Таким образом, профессиональному строительному сообществу и представителям инвестиционной сферы сегодня пока ещё необходимо думать, в частности, о таких принципиальных вещах как ограничение этажности зданий подобного типа, а также о всевозможных аспектах разумного использования стекла в архитектуре.

Иными словами, решение задач комфортного микроклимата, надёжности и безопасности зданий со светопрозрачными фасадами и большепролётными кровельными покрытиями на современном этапе может быть обеспечено только при условии тщательно продуманного выбора общей архитектурной концепции, рационального объёмно-планировочного решения и конструктивной схемы, обеспечивающей оптимальное распределение нагрузок на светопрозрачную оболочку. В отличие от хорошо отработанных строительных технологий традиционных сооружений, ошибки, допущенные на этой стадии проектирования «стеклянного здания» пока ещё не имеют достаточного страхового резерва в области технологических решений, совершенствование которых является огромным потенциалом для развития строительной индустрии на ближайшие десятилетия.

Важнейшим аспектом выбора архитектурно-композиционного решения и конструктивной схемы здания со светопрозрачной оболочкой является условие ремонтпригодности светопрозрачных конструкций (замена стеклопакета в случае разрушения на стадии эксплуатации), а также возможность их безопасного круглогодичного

обслуживания на протяжении всего расчётного эксплуатационного периода (ходовые мостики, балконы, приспособления для работы промышленных альпинистов и т.п).

В качестве хорошей философской иллюстрации, в значительной степени отражающей стремление человечества к «зданию будущего», и современные европейские тенденции к сочетанию эстетики в архитектуре, эффективных конструкций и энергетике, может быть приведено следующее высказывание: «Наше рационалистическое мышление хочет держать всё под своим контролем и объяснять это формулами и вычислениями. Однако некоторые фундаментальные законы природы до сих пор так и не имеют объяснения. Комфорт нельзя выразить посредством цифр; точно так же как нельзя определить математически ощущение свободы. Эта движущая сила, порождаемая природными явлениями, является чем-то находящимся вне нашего сознания... Поэтому самое лучшее описание концепции здорового здания выглядит следующим образом: «пребывание в здоровом здании аналогично нахождению под открытым небом в тени дерева; вся разница заключается только в невидимой прозрачной оболочке, которой ты отгорожен от всех негативных природных явлений»^[43].



ПРИЛОЖЕНИЯ





Карта районирования территории РФ и стран СНГ по весу снегового покрова

Список литературы

1. Аркин Д.Е. «Образы архитектуры и скульптуры», М., Искусство, 1990.
2. «Архитектура гражданских и промышленных зданий. Гражданские здания». Под ред. А.В. Захарова, М., СИ, 1993.
3. Богословский В.Н. «Строительная Теплофизика». М. Высшая школа, 1982.
4. Борискина И.В., Плотников А.А., Захаров А.В. «Проектирование современных оконных систем гражданских зданий». 3-е издание, С-Петербург, Выбор, 2008.
5. Винокур Р.Ю., Копылов К.П. Шумо- и теплозащитные свойства клееных стеклопакетов. Сб. МНИТЭП «Звукоизоляция и защита от шума жилых и общественных зданий» М.1983г.
6. Генри Дж. Коуэн. «Строительная наука XIX—XX вв», пер. с англ., М, СИ, 1982.
7. Грефе Р., Перче О. и др. «В.Г. Шухов. Искусство конструкции», пер. с нем., М, Мир, 1994.
8. Грушевский Б.В., Котов Н.Л., Сидорук В.И., Токарев В.Г., Шурин Е.Т. «Пожарная профилактика в строительстве», М., СИ, 1989.
9. Жан Луи Коэн. «Ле Корбюзье», TASHEN/Арт-Родник, Москва, 2008.
10. «Инновационное использование стекла», Михаэль Росса — руководитель отдела стекла и стройматериалов IFT-Розенхайм, Доклад на 2-ом Специализированном Конгрессе «Окна — Фасады — Стекло», Москва, 2007.
11. Китайгородский И.И. «Технология стекла». Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам. М., 1961.
12. Константинов А.П., Плотников А.А., Борискина И.В. «Особенности накопления снежного покрова на стеклянных купольных покрытиях отапливаемых зданий (на примере г. Москвы)». Жилищное строительство, №11 — 2010.
13. Либер И.С. «Проектирование отопления и вентиляции жилых домов на Крайнем севере», 1980.
14. Окна и фасады на практике. Применение стандарта DIN EN 14351-1/A1 2010. Рабочие характеристики окон, изготовленных из профилей классов А и В. Практические аспекты новых конструктивных концепций. Дипл.инженер Йорн П.Ласс, ift Розенхайм, Сборник докладов Международной конференции «Окна и Фасады 2010» в Розенхайме, ift Rosenheim, October 2010.
15. Партон В.З. «Механика разрушения. От теории к практике». М. ЛКИ, 2007.
16. Пичот А., Агер М., Пуч Ж. «Театр-музей Дали в Фигерасе», Фонд «Гала-Сальвадор Дали», Триангле Посталс, 2005.
17. Разживин В.М. «Изоляция воздушного шума легкими ограждающими конструкциями здания с учетом их закрепления». Диссертация. М. 1989г.
18. Рольф Шааль. «Конструкции навесных стен», пер. с нем. Издательство литературы по строительству, М, 1965.
19. Саксон.Р. «Атриумные здания», пер. с англ.,М, СИ,1987.
20. Собурь С.В. «Заполнение светопроёмов в противопожарных преградах», М., Спецтехника, 2002.
21. Солнцев С.С., Морозов Е.М. «Разрушение стекла». М., Издательство ЛКИ, 2007.
22. Стратий П.В., Борискина И.В., А.А. Плотников А.А. «Климатическая нагрузка на стеклопакеты». Жилищное строительство, №4 - 2011.
23. Теория тепломассообмена. Под.ред. А.И.Леонтьева, Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, М. 1997.
24. Техническое руководство AGC, YourGlassPocket.
25. «Технология металлов и сварка», Москва, Высшая школа, 1977.
26. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. «Пластинки и оболочки». М. Изд-во Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009.
27. Холщевников В.В., Луков А.В. «Климат местности и микроклимат помещений», М., АСВ, 2001.
28. Юрген Бениц-Вильденбург, Дипл. Инженер, начальник отдела PR & Kommunikation, ift Розенхайм, доклад на международном Конгрессе «Окна. Двери. Фасадные системы», Киев, январь 2008, журнал СК/СБ «Оконные системы», №1-2008.
29. BP SOLAR SKIN. “A facade concept for a sustainable future”. Oyvind Aschehoug, Dagfinn Bell SINTEF Civil and Environmental EngineeringArchitecture and Building Technology. May 2003.
30. “Double skin facades — Structures and Building Physics“ О. Tenhunen, K. Lintula, T. Lehtinen, J. Lehtovaara, M. Viljanen, J. Kesti, P. Mäkeläinen. Laboratory of Steel Structures 2Building Technology, Department of Architecture 3Laboratory of Structural Engineering and Building Physics. Lighting Laboratory Helsinki University of Technology, P.O.BOX 2100, FIN-02015 HUT, Finland.
31. “Comment of DIN EN 14351-1. Product standart, perfomance characteristics”. IFT-Rosenheim, Fraunhofer IRB Verlag, 2008.
32. “Conception of a New notification of Building Glass Design in Japan”. Masashi Kikuta (Nippon Sheet Glass Co. Ltd, Japan), Takahiro Murakami (Asahi Glass Co. Ltd, Japan), Shin'ichi Aratani (Central Glass, Co. Ltd, Japan). Glass Processing Days, 18-21 June 2001.

33. «Gestalten mit Glass», INTERPANE GLAS INDUSTRIE AG, 1999.
34. Glaser H.Y. «Jarge area glas coating», VON ARDENNE ANLAGENTECHNIK GMBH, 1st English edition, 2000. .
35. “Glass Construction Manual”. C. Schittich, G.Staib, D.Balkow, M.Shuller, D. Sobek. Edition Detail. Basel, Boston, Berlin. Birkhauser, 1999.
36. Jan Wurm. “Glass structures. Design and construction of self-supporting skins”. Birkhauser verlag ag 2007, Basel-Boston-Berlin.
37. Hasan-Uddin Khan, “International Style. Modernist Architecture from 1925 to 1965”, Tashen, 2001.
38. Klima-kälte-technik 1/73. Der Wärmehaushalt von Räumen unterhalb beschneiter Dächer.
39. Maritz Vandenberg. Architecture in detail. “Farnsworth House, Ludwig Mies van der Rohe”, Phaidon Press Inc., 2005.
40. Michael J. Crosbie, “The Architecture of Frank Williams”, Rockport Publishes, Inc., USA, 1997.
41. Otto W.Wetzell (Hrsg.). “Wendehorst Bautechnische Zahlentafeln”. B.G. Teubner Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Weisbaden 2007.
42. Profile. Architecture Magazine, issue 05, Shueco international KG.
43. Renson Headquaters, Maalbeekstraat 6&10 8790, Waregem, Belgium, 2008.
44. Wai-Fah Chen, Eric M.Lui. “Handbook of Structural Engineerig”. CRC Press, 2005. Ch.29. “Glass Structures”, A.K.W. So, Andy Lee, Siu-Lai Chan.
45. Weibull W.A. Statistical Theory of the Strength of Materials. Royal Swedish Institute for Engineering Research, Stockholm, Sweden, 1939.
46. СНиП 2.08.01-89* «Жилые здания».
47. СНиП 31-02-01 «Дома жилые многоквартирные».
48. СНиП 2.08.02-89* «Общественные здания и сооружения».
49. СНиП 21-01-97 «Пожарная безопасность зданий и сооружений».
50. СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение».
51. СНиП II-4-79 «Естественное и искусственное освещение», М., Госстрой СССР, 1980.
52. СНиП 2.01.01-82 «Строительная климатология и геофизика», М., Госстрой СССР, 1982.
53. СНиП 23-01-99 «Строительная климатология».
54. СНиП 2.01.07-85* «Нагрузки и воздействия».
55. СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий».
56. СП 23-101-2004 «Проектирование тепловой защиты зданий».
57. СНиП II-3-79** «Строительная теплотехника».
58. СНиП II-3-79* «Строительная теплотехника».
59. СНиП 2.04.05-91 «Отопление, вентиляция и кондиционирование».
60. СНИП II-12-77 «Защита от шума».
61. СНИП 23-03-2003 «Защита от шума».
62. СП 23-103-2003 «Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий».
63. СН 481-75 «Инструкция по проектированию, монтажу и эксплуатации стеклопакетов».
64. СанПиН 2.1.2.1002-00 «Санитарно-эпидемиологические требования к жилым зданиям и помещениям».
65. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1076-01 «Гигиенические требования к инсоляции и солнцезащите помещений жилых и общественных зданий и территорий».
66. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий».
67. ГОСТ 11214-86 «Окна и балконные двери деревянные с двойным остеклением для жилых и общественных зданий».
68. ГОСТ 30494-96 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях».
69. ГОСТ 12.1.036-81 (1996) «Шум. Допустимые уровни в жилых и общественных зданиях».
70. ГОСТ 30247.0-94 «Конструкции строительные. Метод испытания на огнестойкость. Общие требования».
71. ГОСТ 30247.1-94 «Конструкции строительные. Метод испытания на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции».
72. ГОСТ 23166-99 «Блоки оконные. Общие технические условия».
73. ГОСТ 30494-96 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях».
74. ГОСТ 22233-2001 «Профили прессованные из алюминиевых сплавов для светопрозрачных ограждающих конструкций. Технические условия».
75. ГОСТ 111-2001 «Стекло листовое. Технические условия».

76. ГОСТ 30826-2001 «Стекло многослойное строительного назначения. Технические условия».
77. ГОСТ 30698-2000 «Стекло закалённое строительное. Технические условия».
78. ГОСТ 30733-2000 «Стекло с низкоэмиссионным твёрдым покрытием. Технические условия».
79. ГОСТ 24866-99 «Стеклопакеты клееные строительного назначения. Технические условия».
80. ГОСТ 30779-2001 «Стеклопакеты строительного назначения. Метод определения сопротивления атмосферным воздействиям и оценки долговечности».
81. ГОСТ 26602.1-99 «Блоки оконные и дверные. Методы определения сопротивления теплопередаче».
82. ГОСТ 26602.3-99 «Блоки оконные и дверные. Метод определения звукоизоляции».
83. National Standard of Canada. Structural Design of Glass for Buildings. CAN/CGSB-12.20-M89. Canadian General Standards Board, 1989.
84. National Standard of Canada CAN/CGSB-12.8-M90 «Insulating Glass Units».
85. ISO 9050 «Glass in building — Determination of light transmittance, solar energy transmittance and ultraviolet transmittance, and related glazing factors».
86. ISO 10292 «Glass in building — Calculation of steady-state U values (thermal transmittance) of multiple glazing».
87. ISO 13363-1 “Solar protection devices combined with glazing — Calculation of solar and light transmittance” — Part 1: Simplified method”.
88. EN 410 «Glass in building — Determination of luminous and solar characteristics of glazing».
89. EN 1991-1-4. Eurocode 1: Actions on structures — General actions — Part 1—4: Wind actions.
90. EN 13022-2 “Glass in building — Structural sealant glazing — Part1: Glass”.
91. EN 13022-1 “Glass in building — Structural sealant glazing — Part1: Actions, requirements and terminology”.
92. EN 572-1.
93. EN ISO 10077-1 “ Thermal performance of windows, doors and shutters — Calculation of thermal transmittance — Part 1: General” .
94. EN 673 “Glass in building — Determination of thermal transmittance (U-value) — Calculation method” “Glass in building — Design of glass panes — Part 1: General basis of design” .
95. EN ISO 140-3 “Acoustics - Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements” . .
96. EN 13474 “Glass in building — Design of glass panes — Part 1: General basis of design” — «Стекло в строительстве. Расчёты стеклянных пластин — часть 1: Основы проектирования».
97. TRLV “Technischen Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen” — «Технические правила по проектированию ленточного и панорамного остекления».
98. TRAV (“Technischen Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen” — «Технические правила по проектированию безопасного остекления»).
99. DIN EN 12337.
100. DIN EN 1863-1.
101. DIN EN 12150.
102. DIN 1249-11.
103. DIN EN 573-3.
104. DIN 1055-4: 2005-03 «Воздействия на сооружения».

Содержание

Предисловие	9
Глава 1. Светопрозрачные ограждающие конструкции в архитектуре современных зданий и сооружений.	13
Развитие архитектуры, конструкций и технологий	13
1.1. Функциональный и эстетический аспект использования стекла в архитектуре. Исторические и философские основы формирования Интернационального стиля	14
1.2. Развитие архитектуры, конструкций и технологий	45
Глава 2. Основные конструкционные материалы для возведения светопрозрачных фасадных и кровельных оболочек.	59
2.1. Конструкционные материалы для производства формообразующих несущих стержневых элементов. Алюминиевые сплавы и сталь	60
2.1.1. Алюминиевые сплавы. Химический состав. Обработка. Защита от коррозии	60
Коррозионная стойкость	65
2.1.2. Легированные стали. Химический состав. Разновидности	70
2.2. Стекло как основной конструкционный материал светопрозрачного заполнения.	72
2.2.1. Стекловидное состояние. Структурная химия стекла	73
2.2.2. Технологические особенности производства стекла	78
2.2.3. Тепловая и химическая обработка стекла. Повышение механической прочности	82
2.2.4. Физико-химические свойства стекла в твёрдом состоянии	86
2.2.5. Химическая устойчивость стекла	92
2.2.7. Факторы, влияющие на прочность стекла и резервы технического развития материала	94
2.2.8. Технологические способы повышения надёжности и безопасности строительных конструкций из стекла. Механическая обработка и ламинирование	100

2.2.9. Технологические возможности стекла для архитектуры и микроклимата	103
---	-----

Глава 3. Конструктивные решения и расчётные схемы светопрозрачных оболочек современных зданий и сооружений. Светопрозрачные фасады и кровли.	117
Введение.	118
3.1. Элементы светопрозрачного заполнения. Стеклопакеты	122
3.2. Фасадные и кровельные профильные системы. Принцип построения и расчётные схемы	144
3.2.1. Классификация и архитектурно-композиционные возможности светопрозрачных фасадов. Технология изготовления конструктивных элементов.	145
Конструктивные особенности профильных систем для фасадного остекления	145
3.2.2. Расчётные схемы стержневых фасадных оболочек. Основные критерии инженерных расчётов.	167
Выбор сечений профильных элементов	167
3.2.3. Основные конструктивные принципы проектирования светопрозрачных кровель. Кровельные профильные системы	175
3.2.4. Профильные системы из стали	182
3.3. Элементы дополнительной солнцезащиты.	185
Глава 4. Нагрузки и воздействия на светопрозрачные наружные оболочки зданий и сооружений. Формирование микроклимата помещений и напряжённого состояния ограждающих конструкций	199
Введение.	200
4.1. Специфика энергообмена через остекление. Формирование микроклимата за остеклёнными ограждениями	203
4.1.1. Земля и солнечная энергия. Энергообмен здания и наружной среды через светопрозрачные конструкции.	204
Селективное пропускание излучения	204
4.1.2. Теплообмен здания и наружной среды через светопрозрачные конструкции в зимнее время. Проектирование остекления, исходя из зимних условий эксплуатации.	212
4.1.3. Теплообмен через светопрозрачные конструкции в летнее время. Проектирование остекления, исходя из летних условий эксплуатации	231

4.2. Воздействие внешнего шума на светопрозрачные фасады. Звукоизоляционные характеристики светопрозрачных конструкций	244
4.2.1. Восприятие звука человеком. Шумовой режим помещений. Транспортный шум	246
4.2.2. Передача шума через светопрозрачные конструкции. Звукоизоляционные характеристики стеклопакетов	253
4.2.3. Индекс изоляции воздушного шума	263
4.3. Климатические нагрузки от перепадов давлений и температур в стеклопакетах	266
4.4. Ветровые нагрузки	282
4.5. Снеговые нагрузки	298
4.6. Эксплуатационные и аварийные нагрузки	312
4.6.1. Эксплуатационные нагрузки	312
4.6.2. Противопожарная безопасность	318
4.7. Расчётные схемы и пространственная работа стеклопакетов. Формирование напряжённого состояния стеклянных пластин. Разрушение стекла	329
Глава 5. Архитектурно-конструктивные принципы и инновации в строительстве зданий со светопрозрачными наружными оболочками	359
Приложения	383
Список литературы	388

ООО «Инженерно-информационный Центр Оконных Систем»
www.oknprof.info
info@oknprof.info

Дизайн и вёрстка: А. А. Дейнега

Подписано в печать 05.12.2011. Формат 180х230 мм.
Бумага мелованная. Печать офсетная. Гарнитура Literaturnaya C.
Тираж 1000 экз.