**Практическое занятие 7.**

**Прочностной расчет стеклопакетов на действие климатических нагрузок и воздействий**

Возрастающая тенденция к массовому использованию пакетного остекления в современном строительстве заставляет обратить внимание на особенности формирования напряженно-деформированного состояния в ограждающих конструкциях наружной оболочки, изучить различные составляющие климатической нагрузки и выбрать принципы проектирования светопрозрачных конструкций (далее - спк) с учетом сохранения архитектурного облика зданий.

В подавляющем большинстве светопрозрачных фасадов современных зданий в качестве заполнения используются стеклопакеты. В отличие от ранее применявшихся спк, в стеклопакетах возникает специфическая нагрузка. В европейской строительной практике данная нагрузка получила название «климатической» или, согласно терминологии стандарта EN 13474, «внутренней нагрузки». Климатическая нагрузка возникает из-за герметичности конструкции стеклопакета. После герметизации стеклопакет становится подверженным изменению температуры: при нагреве/охлаждении внутренний воздух расширяется/сжимается, внутри возникает избыточное или недостаточное давление, деформирующее стекла. Также разница давлений внутри и снаружи стеклопакета возникает при изменении атмосферного давления.

На протяжении всего срока эксплуатации с момента его герметизации стеклопакет находится в напряженно-деформированном состоянии, создаваемом климатической нагрузкой. Цикличность и знакопеременность климатической нагрузки является основным фактором, определяющим максимальный срок эксплуатации стеклопакета в 25 – 30 лет. Практически действие климатической нагрузки можно визуально наблюдать как оптические искажения на фасадной плоскости остекления из-за деформации стекол стеклопакетов. Данный эффект в ряде случаев полностью разрушает эстетический и художественный замысел архитектора. Деформации стекол стеклопакетов от климатической нагрузки в сочетании с ветровой могут превышать максимально допустимые, что может привести к разгерметизации и даже разрушению стеклопакета. При проектировании структурного остекления данный фактор является важнейшим с точки зрения безопасности.

В европейской практике проектирования стеклопакетов климатической нагрузке уделяется серьезное внимание в нормативной документации, где расчетным является сочетание ветровой и климатической нагрузок. Но в расчете не учитываются деформации стекол и оптические искажения фасадов зданий. В нашей стране в силу специфики данной нагрузки, не характерной для иных спк, климатическая нагрузка не учитывается при проектировании стеклопакетов, информация о ней отсутствует в нормативной документации.

Совершенствование методов расчета конструкций стеклопакетов на основе разработки методики расчета прогибов стекол стеклопакета под климатической нагрузкой, что позволяет дать рекомендации для снижения прогибов стекол, увеличения срока эксплуатации стеклопакета и улучшения архитектурного облика зданий.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

* Изучить существующие методики расчета стекол стеклопакета под климатической нагрузкой.
* Разработать методику расчета прогибов стекол стеклопакета под климатической нагрузкой (физическую и математическую модели).
* Сформулировать и обосновать группу исходных данных, способ их определения и сочетания для расчета максимальных климатических нагрузок.
* Провести экспериментальные исследования работы стеклопакета под климатической нагрузкой.
* Разработать компьютерную программу по расчету прогибов стекол однокамерного стеклопакета под климатической нагрузкой.

С начала производства стеклопакетов и до настоящего времени при их изготовлении за основу был принят принцип герметичной камеры, ограниченной двумя стёклами с заполнением межстекольного пространства осушенным воздухом. Осушенный воздух внутри камеры используется для снижения точки росы, препятствуя выпадению конденсата и образованию изморози внутри стеклопакета. Герметичность стеклопакета предотвращает попадание влаги и пыли во внутреннюю камеру, а также объединяет стекла в совместно работающую пространственную конструкцию.

Началом производства современного стеклопакета считаются 70-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.  

Рис. 7. 1. Штаб-квартира фирмы Adidas г. Херцогенаурах, Германия и здание банка, г. Розенхайм, Германия.

Как и любой герметичный объем газа, воздух внутри стеклопакета расширяется при нагревании и сжимается при охлаждении, деформируя стекла. Практически это может наблюдаться визуально почти повсеместно как искажения на фасадной плоскости. С точки зрения работы конструкции стеклопакета данная нагрузка ставит ряд задач:

* 1. Ограничение срока службы стеклопакета за счет разгерметизации: сезонные и суточные температурные перепады, а также колебание атмосферного давления воздействуют циклически, деформируя стеклопакет, способствуя разрушению герметизирующего контура;
  2. Разрушение стеклопакетов от действия климатической нагрузки совместно с ветровой: такое сочетание может создать напряженно-деформированное состояние, при котором велика вероятность разрушения стекол; это особенно важно для структурного остекления, где стеклопакет закрепляется не механически, а приклеивается по периметру к несущей раме структурным клеем-герметиком;
  3. Архитектурная задача больших прогибов стекол: оптические искажения на деформированных стеклах разрушают архитектурный вид здания. Стекло должно быть управляемым инструментом архитектора при формировании облика современного здания.

С точки зрения конструкции стеклопакета данная архитектурная задача сегодня не рассматривается как актуальная (рис. 1). Системные исследования, направленные на снижение деформаций стекол стеклопакетов от климатической нагрузки, не проводились. Используемые методы борьбы с искажениями – устройство дорогостоящих двойных фасадов, применение вакуумных стеклопакетов или установка стекол различной толщины.

Опыт исследования проблемы климатической нагрузки в стеклопакетах имеется как за рубежом, так и в нашей стране. Основные исследования в Европе были проведены в 60-80х годах 20-го века. Результатом этих исследований являются европейские строительные нормы (EN), содержащие краткое описание принципа действия климатической нагрузки, исходные данные, необходимые для расчета, а также простой инженерный способ расчета толщины стекол на разрушение от климатической нагрузки. Для описания основного принципа работы стеклопакета под климатической нагрузкой приводится краткая, но важная информация: климатическая нагрузка, как внутреннее изохорное давление в стеклопакете, снижается за счет гибкости стекол и, частично, за счет деформативности герметика. Стекла прогибаются до достижения баланса внешних и внутренних давлений. Прогибы вызывают напряжения в стеклах и должны учитываться при проектировании стеклопакетов.

Большее внимание в EN уделено величине климатической нагрузки, а также необходимости ее учету в различных случаях. Согласно EN 13474-1 климатическая нагрузка может достигать +20,4 кПа и –23,4 кПа. Эти данные рассчитаны для европейских климатических условий. Расчет климатической нагрузки проводится из трех основных климатических факторов: температуры воздуха, барометрического давления и изменения давления с высотой.

Пик отечественных исследований проблемы внутренней нагрузки в стеклопакете приходится на 75-78 годы. Главным образом, данной проблемой занимались в ЦНИИПромзданий: проблема расчета стеклопакета рассматривалась комплексно – на различные как внешние, так и внутренние нагрузки. Исследования носили характер базовых. Физико-математическая модель работы стеклопакета под климатическими нагрузками не достаточно проработана. Понятие климатической нагрузки получило название «пневмоэффекта», который возникал в герметичной камере стеклопакета при изменении атмосферного давления и температуры. В результате проведенных исследований был описан механизм действия «пневмоэффекта» на стеклопакет, предложен инженерный метод расчета, основанный на матричном исчислении и графиках-номограммах.

Рассмотрены также современные программные расчетные комплексы, основанные на МКЭ (SJ MEPLA).

Исследование состояния вопроса по данной проблеме выявило:

* Существующий инженерный метод расчета, основанный на опыте эксплуатации стеклопакетов, не учитывает относительные деформации стекол стеклопакетов, что потенциально снижает срок эксплуатации стеклопакетов и создает архитектурную задачу искривления фасадов;
* Недостаточное обоснование физической модели работы стеклопакета под действием климатической нагрузки;
* Неполноту методики сбора нагрузок и определения критических сочетаний климатических нагрузок для условий РФ;
* Недостатки метода проектирования стеклопакета, не позволяющие прогнозировать оптические искажения стеклянных фасадов зданий.

pic3Под термином «климатическая» (внутренняя) нагрузка понимается избыточное или недостаточное давление во внутренней герметичной камере стеклопакета, возникающее при изменении атмосферного давления и температуры окружающей среды (рис. 7.2.). Возникает климатическая нагрузка в момент герметизации стеклопакета и действует на него в течение всего дальнейшего срока эксплуатации.

Рис. 7.2. Деформации стеклопакета под действием внутренней нагрузки.

Герметизация сохраняет неизменное количество воздуха внутри, однако температура газа, его давление и объем могут изменяться. Термодинамическое состояние, устанавливающее связь между внутренним давлением, температурой и объемом газа в стеклопакете, описывается уравнением идеального газа Менделеева-Клапейрона (7.1):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7.1.) |

где: Р0, V0 и T0 – внутреннее давление, температура и объем при герметизации;

Р1, V1 и Т1 – внутреннее давление, температура и объем при эксплуатации.

В расчете толщины стекол стеклопакета на климатическую нагрузку согласно EN 13474 предлагается следующая методика: определяется максимальная климатическая нагрузка как внутреннее давление (+20,4; -23,4 кПа), затем вычисляется понижающий коэффициент, составляющий около 0,04 – 0,06. Таким образом, внутреннее давление на стекла снижается на 94% – 96%.

В данной работе при рассмотрении физической модели стеклопакета как герметичной газовой камеры предлагается разделить конструкции на два типа.

В первом типе конструкций снижение внутреннего давления не происходит, если допустить, что стекла обладают высокой жесткостью, и их деформации близки к нулю (аналогично методике EN). Разница наружного, атмосферного и внутреннего давлений воспринимается за счет напряжений в конструкциях. Для проектирования таких конструкций можно не учитывать зависимость внутреннего давления от деформаций стекол.

Если изменение объема незначительно ΔV ≈ 0 и V1 ≈ V0, то перепад давлений при изменении температуры будет максимальным ΔP ≈ ΔТ.

К такому типу конструкций относятся телевизионные трубки, электрические лампочки, стеклоблоки.

Во втором типе конструкций внутреннее давление за счет деформаций стекол снижается почти до нуля. Жесткость их стенок весьма мала и не оказывает влияния на внутреннее давление, которое очень близко к атмосферному. Равенство наружного атмосферного давления и внутреннего достигается за счет изменения объема камеры. Для расчета их деформаций (в пределах их прочности) можно использовать только законы газодинамики, т.к. сопротивление стенок незначительно.

Если изменение давления равно нулю ΔP ≈ 0 и P1 ≈ P0, то изменение объема будет пропорционально изменению температуры ΔV ≈ ΔТ.

Такая расчетная схема применима для воздушного шарика в начальный период его наполнения, мыльных пузырей или подобных конструкций.

Данные два типа конструкций являются краевыми условиями по принципу работы конструкций под климатической нагрузкой.

Согласно проведенным экспериментальным исследованиям было установлено, что обычные стеклопакеты находятся между краевыми схемами в промежуточном положении, близком к системе с гибкими стенками, но которое нелинейно изменяется в зависимости от прогиба стекол.

В начальный момент времени стекла пакета представляют собой тонкие жесткие пластины и могут рассчитываться на изгиб, график деформаций стекла под нагрузкой является линейным. С увеличением прогибов стекла начинают работать не как плоские пластины, а как пространственная оболочка, появляется геометрическая нелинейность. Стекла должны рассчитываться на изгиб со сжатием-растяжением (как гибкие пластины).

Так для расчета прогибов стекол стеклопакета под климатической нагрузкой необходимо одновременно учитывать изменяемость величины внутреннего давления от деформаций стекол и изменения внутреннего объема, а также нелинейность в работе стеклянных пластин.

В каждый момент времени деформированные стекла находятся в состоянии статического равновесия, когда внутреннее давление почти равно внешнему. В силу упругости стекол внешнее и внутреннее давления не будут абсолютно равны. Небольшая часть внутреннего давления, как равномерно распределенная нагрузка, создает напряженно-деформированное состояние стеклянных пластин. Так необходимо различать климатическую нагрузку (внутреннее изохорное давление) и фактическое внутреннее давление (остаточное), деформирующее стекла. Нахождение баланса скомпенсированного и остаточного внутреннего давления, деформирующего стекла, является ключевым для вычисления прогибов стекол и напряжений в них.

Согласно проведенным расчетам, около 93-97% внутреннего давления компенсируется изменением объема. Оставшиеся 3-7% климатической нагрузки воспринимается за счет работы стекол (рис. 3).

Схема работы стеклопакета 93-97%Величина климатической нагрузки определяется как разница внутреннего давления, зафиксированного при герметизации, и максимально возможного внутреннего изохорного давления при эксплуатации. После определения климатической нагрузки необходимо определить, насколько прогнутся стекла пакета при достижении напряженно-деформированного состояния равновесия внутреннего и внешнего давлений с учетом работы самих стеклянных пластин. Вычисления производятся методом итерирования.

Рис. 7. 3. Схема изменения объема камеры и напряжений в стеклах под климатической нагрузкой в зависимости от жесткости стенок стеклопакета: Р – изменение напряжений в стеклах  
V – изменение объема камеры.

Алгоритм расчета однокамерного стеклопакета:

1. Ввод начальных данных:
   1. Задается исходное состояние стеклопакета при герметизации на производстве: атмосферное давление – P0, температура – Т0, объем – V0 и отн. влажность воздуха φ;
   2. Задается расчетное состояние стеклопакета при эксплуатации: атмосферное давление – P0, температура – Т0;
2. Вычисление климатической нагрузки как изохорного давления Рклим из условия, что стеклопакет работает по схеме первого типа (P1→P0, ΔV = 0), из суммы 4х нагрузок по формуле:

;

1. Задается внутреннее давление q, деформирующее стекла;
2. Вычисляется прогибы f1 и f2 в центре стекол как гибких пластин от равномерно распределенной нагрузки q по формуле:



где ,  - известные табличные коэффициенты;

1. Вычисляем изменение объема с учетом деформаций стекол V(q);
2. Определяем давление, которое может компенсироваться изменением объема с прогибом обоих стекол;
3. Проверка баланса внутренних и внешних давлений:

;

1. Проверка 7 повторяется с соответствующим корректированием начального значения внутреннего давления q;
2. Вычисляются внутренние напряжения в каждом стекле по формуле:



где ,  - известные табличные коэффициенты.

**Определение величины климатической нагрузки**

Можно выделить 4 наиболее важных фактора, формирующих климатическую нагрузку:

1. Изменение температуры наружного воздуха;
2. Климатические изменения атмосферного давления;
3. Геодезические изменения атмосферного давления;
4. Изменение внутреннего парциального давления (новый).

Положим, в момент герметизации, температура газа равнялась температуре воздуха на производстве ≈ +20 °С. Последующее хранение, транспортировка и эксплуатация стеклопакета связана с изменением температуры окружающей среды, влекущей за собой изменение температуры внутри стеклопакета. Транспортные и эксплуатационные условия не являются критическими. При строительстве новых зданий неизбежно остекление дома до обеспечения нужных температурных условий. Проходит некоторый период времени, при котором стеклопакет находится в экстремальных для себя температурных условиях, на которые он не рассчитан. Согласно проведенным расчетам, ввиду малой тепловой инерции стеклопакета, за расчетные необходимо принимать абсолютные наиболее холодные и теплые температуры. Снижение температуры с +20 °С до -42 °С (абсолютный минимум для г. Москвы), эквивалентно снижению внутреннего давления в стеклопакете на 21,2% - 161 мм.рт.ст.

Нормальным атмосферным давлением, т.е. одной физической атмосферой принято считать 760 мм.рт.ст., что соответствует приблизительно 100 кПа или 10,33 т/м2. Для г. Москвы, расположенной на возвышенности, нормальным давлением является около 750 мм.рт.ст. По данным гидрометеоцентра аэропорта Внуково, г. Москва, за период с 1973 г. до настоящего времени, отмечены колебания атмосферного давления в пределах от 726,5 до 790,11 мм рт. ст. Разница относительно нормального уровня давления по Москве соответственно достигает -33,5 и +30,11 мм. рт. ст. Учитывая, что производство стеклопакетов может происходить и при пониженном и при повышенном значении атмосферного давления, логично предположить критический негативный случай максимальной разницы производственного и эксплуатационного атмосферных давлений составляет 63,61 мм. рт. ст. Эта разница давлений может быть приложена как изнутри стеклопакета, так и в обратном направлении.

Нужно отметить, что необходимая информация об атмосферном давлении для расчета климатической нагрузки в нормативной строительной документации отсутствует.

При расчете изменения атмосферного давления необходимо учитывать геодезическую разницу высот в месте производства и эксплуатации здания. Высота тропосферы, содержащей около 80% всей массы воздуха и 90% всей атмосферной влаги, находится в пределах 8-10 км в полярных зонах, 10-12 в умеренных и 16-18 в тропических. Зимой высота атмосферы уменьшается, летом – повышается. До высоты в 1 км, зависимость давления от высоты можно считать линейной. Скорость снижения атмосферного давления в этом диапазоне составляет примерно 0.1 мм.рт.ст. на каждый метр высоты. При совместном действии как территориального, так и высотного фактора влияния на разницу давлений внутри и снаружи стеклопакета, перепад давлений в Москве может составлять до 61,7 мм.рт.ст.

Внутри стеклопакета, как правило, находится осушенный воздух, реже – инертный газ. Согласно ГОСТ 24866-99 Стеклопакеты клееные строительного назначения выпадение конденсата не допускается в обычных стеклопакетах до температуры -45 °С, а в морозостойких – до -55 °С. При различной температуре, в воздухе может находиться разное количество влаги. При этом влагоемкость воздуха понижается с уменьшением температуры. Для достижения необходимой температуры точки росы, парциальное давление воды в воздухе должно быть снижено с 10,5-5,3 мм.рт.ст. (60% – 30% отн. влажн. при +20 °С) до 0,5 мм.рт.ст., т.е. на 5-10 мм.рт.ст. Данный фактор предлагается включить в расчет, в EN он не учитывается.

Различные факторы могут сочетаться, взаимоусиливая или ослабляя действие друг друга. Прогибу стекол наружу стеклопакета способствует: увеличение температуры, снижение геодезической высоты, снижение атмосферного давления. Обратные изменения условий производства и эксплуатации приводят к прогибу стекол внутрь. Осушение внутреннего воздуха после герметизации неизбежно создает небольшую отрицательную климатическую нагрузку и деформирует стекла внутрь. Соответственно можно выделить два сочетания нагрузок для расчета климатической нагрузки: максимальные прогибы стекол наружу стеклопакета («летнее» сочетание) и максимальные прогибы стекол внутрь стеклопакета («зимнее» сочетание). Согласно расчетам максимальное внутреннее давление в зимний период может составлять около -240 мм.рт.ст. (-31,3 кПа), в летний период +144 мм.рт.ст. (+18,9 кПа).

В результате второй главы:

Разработана методика расчета прогибов стекол стеклопакетов под климатической нагрузкой, включающая:

* физическую модель, учитывающую возможный диапазон работы стекол от абсолютно гибких до абсолютно жестких пластин; а также, что при малых прогибах стекла работают на изгиб, а с увеличением прогибов начинают работать как пространственная оболочка - на изгиб со сжатием-растяжением.
* улучшенную способ подготовки исходных данных для расчета климатической нагрузки, в котором введен новый фактор, формирующий климатическую нагрузку, определены исходные данные, обоснована новая расчетная температура и условия эксплуатации в остекленном неотапливаемом здании, критические сочетания климатических нагрузок (для г. Москвы) и способ их определения.

Общей целью постановки данной серии экспериментов являлось последовательное выявление влияния различных конструктивных элементов стеклопакета на его работу под климатической нагрузкой для последующего анализа и внедрения в физико-математическую модель. Для достижения данных целей было методически последовательно поставлены 4 эксперимента, так, чтобы каждый последующий мог быть сравнен с предыдущими:

1. Работа одинарного стекла под односторонней нагрузкой;
2. Работа герметичного однокамерного пакета;
3. Работа негерметичного однокамерного пакета;
4. Нагнетание внутреннего давления (симулирование клим. нагрузки).

В эксперименте №1 была получена зависимость нагрузка-прогиб (равномерно распределенная нагрузка 500 Па с шагом нагружения 100) для одинарного стекла толщиной 4 мм (рис. 7а). Во втором эксперименте идентично (рис. 6) нагружался герметичный однокамерный стеклопакет 4-24-4. В данном случае стеклопакет работал комплексно: 2 стекла работали совместно посредством герметичной воздушной прослойки, плюс влияние краевого герметика. В эксперименте №3 нагружался разгерметизированный однокамерный стеклопакет 4-24-4. В данном случае оба стекла работали без учета герметичной прослойки, связанные только посредством краевого герметика. При сравнении всех трех экспериментов предполагалось определить степень влияния на прогибы стекол стеклопакета отдельно стекла, краевого герметика и воздушной прослойки:

Таблица 7.1.

*Испытания*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Испытание | Эксперимент №1 | Эксперимент №2 | Эксперимент №3 |
| Стекло | ● | ● | ● |
| Герметик |  | ● | ● |
| Возд. прослойка |  | ● |  |

В результате анализа результатов экспериментов №1-3 установлено, что влияние герметичности воздушной прослойки в работе стеклопакета весьма значительно и вносит самые существенные изменения в прогибах стекол стеклопакетов под нагрузкой. Без учета влияния герметичности воздушной камеры, учитывая только работу стекол и влияние краевого герметика, объединяющего стекла, невозможно рассчитать и спрогнозировать прогибы стекол стеклопакета. Разработанная физико-математическая модель работы стеклопакета основана на физических законах поведения газа и работе стеклянных пластин.

Эксперимент №4. Нагнетание воздуха внутрь пакета. Цель эксперимента – искусственное создание климатической нагрузки. Внутрь стеклопакета нагнетался воздух, замерялись прогибы стекол и внутреннее давление. Внутреннее давление достигло величины 1,7 кПа, прогибы стекол – 6 мм.

При сравнении данных о прогибах стекол экспериментально полученная кривая зависимости прогибов от нагрузки укладывается в теоретические рамки и лежит между расчетным шарнирным и жестким закреплением гибких пластин. Это показывает качественную сходимость экспериментальных и теоретических данных, и свидетельствует о принципиальной работоспособности предложенной методике расчета, учитывающей влияние воздушной прослойки и работу стекол. Дальнейшая проработка математической модели путем введения таких неучтенных факторов, как работа герметизирующего слоя, позволит увеличить сходимость результатов. В рамках действующей модели введением поправочного коэффициента можно построить кривую приблизительного расчета, имеющую расхождение менее 5% с экспериментальными результатами при нагрузке до 1 кПа.

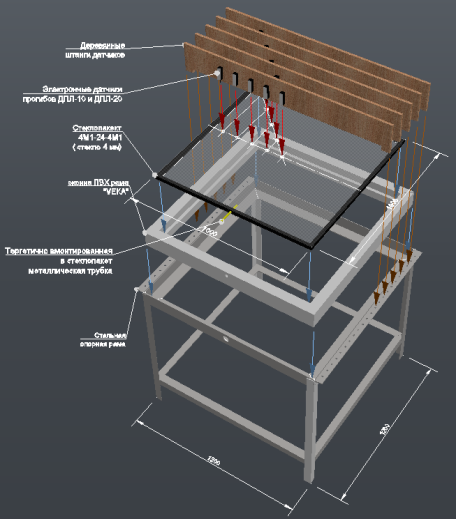
а)plastinkaб)  в)  г)

Рис. 7.4. Расчетная схема испытаний и модель экспериментального стенда. Прогибомеры ДПЛ-10 и ДПЛ-20. Цифровой портативный микроманометр ЗОНД-10.



Рис. 7.5. Этапы равномерного нагружения 100 – 500 Па с шагом 100.

Замечено, что различные стеклопакеты могут по-разному воспринимать действие климатической нагрузки. Многолетний опыт проектирования и эксплуатации показал, что некоторые конструктивные решения могут оказывать отрицательное влияние на работу стеклопакета под климатической нагрузкой. Некоторые из них описаны в современных российских нормах, такие как: запрет проектирования стеклопакетов с соотношением длин сторон более 5/1; нежелательность использования жестких герметиков и др. Эти меры в той или иной степени способствуют снижению влияния климатической нагрузки на стеклопакет, однако систематизированные исследования в данной области отсутствуют. Однако остается неясным, насколько действенными являются те или иные меры.

На основании разработанной физико-математической модели были проведены исследования различных конструктивных параметров стеклопакетов, влияющих на его работу под климатической нагрузкой. Были исследованы 5 различных параметров (см рис. 9):

- площадь остекления;

- соотношения сторон;

- межстекольное расстояние;

- степень жесткости герметика;

- толщина стекол (одинаковые и различные по толщине стекла).

Увеличение площади остекления с 0,5 до 3 м2 позволяет снизить относительные деформации стекол с 0,0057 до 0,0024. Снижение жесткости закрепления стекол от жесткого до шарнирного уменьшает относительные деформации стекол с 0,0047 до 0,0028. Снижение соотношения длин сторон a/b с 4 до 1 уменьшает относительные деформации стекол с 0,0057 до 0,0028. Уменьшение расстояния между стеклами с 24 до 8 мм значительно снижает относительные деформации стекол с 0,0057 до 0,002. Симметричное утолщение обоих стекол с 4 до 12 мм оказывают малое влияние на кривизну обоих стекол 0,004 - 0,0038. При утолщении одного из стекол с 4 мм до 12 и сохранении толщины второго 4 мм, снижается прогиб первого стекла с 0,004 до 0,0021.

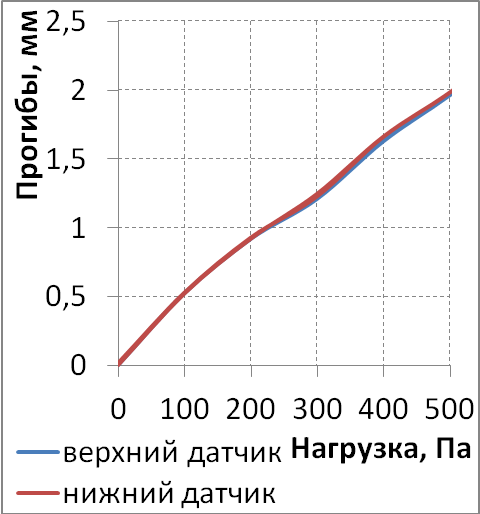
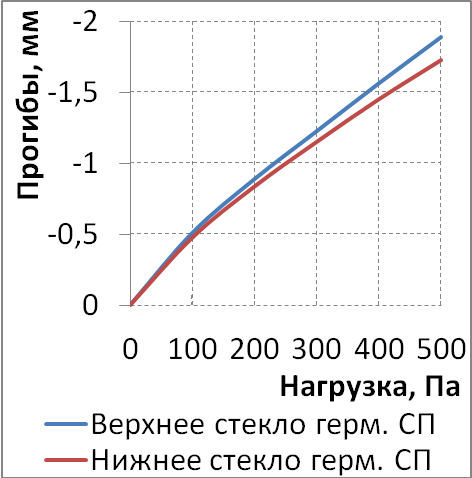
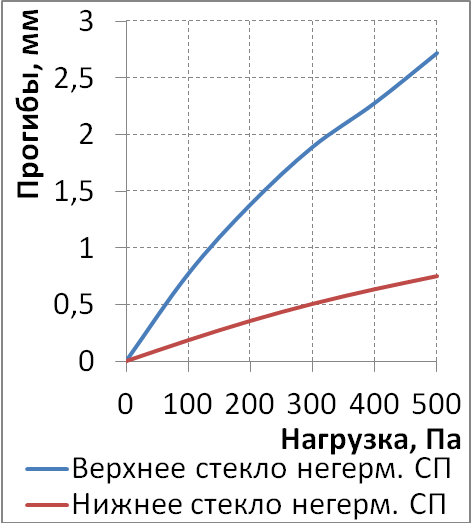
а) б) в)

Рис. 7.6. Экспериментальные данные нагрузка-прогиб стекол

: а) одинарное стекло; б) стеклопакет; в) разгерметизированный стеклопакет.

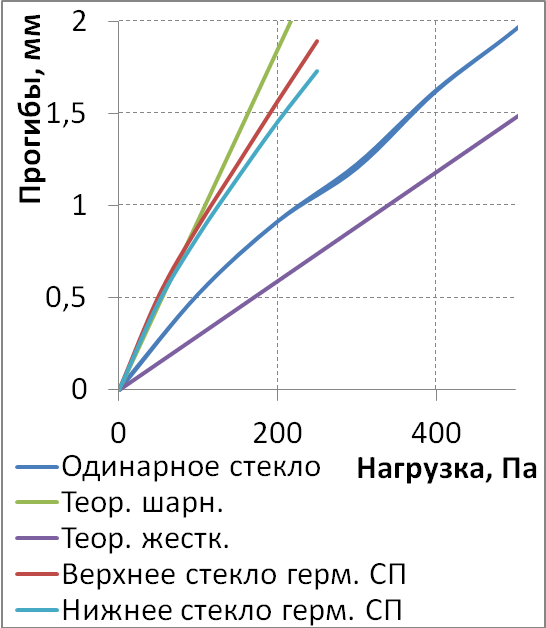
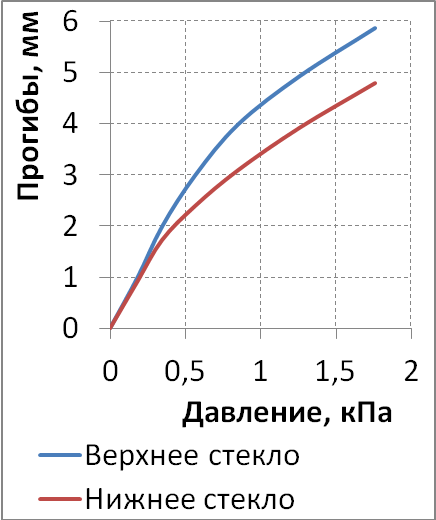
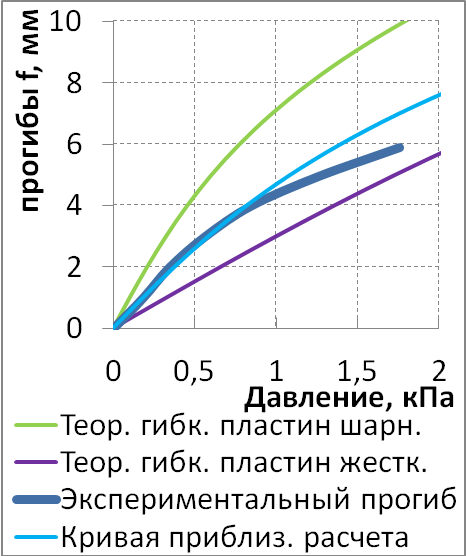
а)  б)  в) 

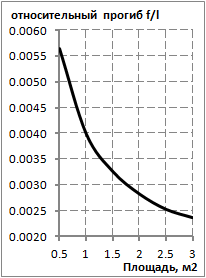
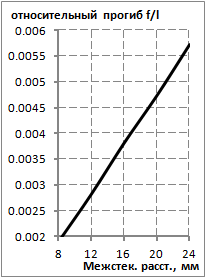
Рис. 7.7. а) сравнение теоретических результатов и экспериментов №1-3; б) экспериментальные кривые нагрузка-прогиб стекол эксперимента №4; в) сравнение экспериментальных результатов эксперимента №4с расчетным.

На основании полученных результатов исследования можно дать рекомендации по проектированию стеклопакетов на климатическую нагрузку. Проведем сравнение неоптимизированного стеклопакета, среднестатистического, применяемого в жилищном строительстве, и оптимизированного согласно проведенным исследованиям.

Под неоптимизированным стеклопакетом примем стеклопакет малых габаритных размеров вытянутой прямоугольной формы (2х0,5м), установленный на первом этаже общественного здания. Внутреннее стекло выполнено из высокопрочного стекла повышенной толщины (10 мм). Межстекольное расстояние составляет 24 мм.

Оптимизированный стеклопакет имеет большую площадь (1.8м2). Внешнее стекло более толстое (8 мм), нежели внутреннее (4 мм). Межстекольное расстояние снижено до 8 мм. Жесткость соединения стекол минимальна.

Расчеты показали, что деформации стекол (f/l) неоптимизированного с точки зрения климатической нагрузки стеклопакета составляют 0,0212 (1/50), обычного оконного стеклопакета жилого дома - 0,0045 (1/220) и оптимизированного - 0,0031 (1/320). Путем только оптимизации рассмотренных конструктивных параметров стеклопакетов можно добиться снижения относительных деформаций в 1,5 – 7 раз.

а)  б) 

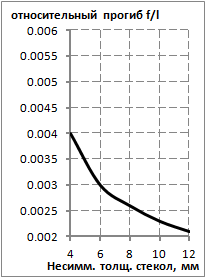
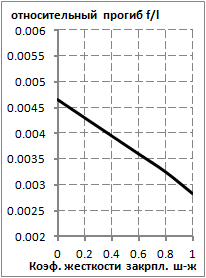
в)  г) 

Рис. 7.8. Зависимость относительных прогибов стекол с изменением параметров стеклопакета: а) площади; б); межстекольного расстояния; в) толщины наружного стекла при постоянной внутренней; г) жесткости соединения стекол.

По результатам данной работы очевидно, что климатическая нагрузка представляет собой серьезный фактор влияния на конструкцию стеклопакета, который необходимо учитывать при проектировании остекления. В этой связи рекомендуется внести исправления, дополнения и поправки в следующие нормативные документы: СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия»; СНиП 23-01 «Строительная климатология»; ГОСТ Р 54175-2010 Стеклопакеты клееные. Технические условия.

В главе 4 рассмотрены пять конструктивных параметров стеклопакетов (площадь, соотношение длин сторон, толщина стекол, величина межстекольного расстояния, жесткость герметика), определена степень их влияния на прогибы стекол пакета под климатической нагрузкой, предложены практические рекомендации по оптимизации стеклопакетов, позволяющие снизить относительные деформации стекол с 1/50L до 1/320L (в 1,5 – 7 раз), что повысит долговечность стеклопакета и улучшит архитектурный облик зданий.

Общие выводы и результаты работы

1. Существующие инженерные методы расчета стеклопакетов, основанные на опыте эксплуатации, не учитывают относительные прогибы стекол, определяющие не только срок эксплуатации стеклопакетов, но и оптические искажения стеклянных фасадов зданий.
2. Усовершенствована физическая модель работы стеклопакета, позволяющая рассчитывать прогибы конструкции стеклопакета, как с гибкими, так и жесткими стенками. В модели учтено, что в начальный момент времени стекла пакета при малых прогибах представляют собой плоские пластины, работающие на изгиб, а с увеличением прогибов стекла начинают работать как пространственная оболочка - на изгиб со сжатием-растяжением.
3. Предложен способ подготовки исходных данных: для конкретных условий г. Москвы определены критические сочетания климатических нагрузок - летние и зимние условия; введен новый фактор - снижение парциального давления водяного пара; при расчете учитываются условия эксплуатации стеклопакета в остекленных неотапливаемых зданиях.
4. Разработана компьютерная программа, основанная на предложенной методике расчета прогибов стекол и способе подготовки исходных данных, позволяющая рассчитывать прогибы стекол в составе однокамерного стеклопакета под климатической нагрузкой.
5. Экспериментально полученная кривая зависимости прогибов от нагрузки укладывается в рамки между теоретически полученными зависимостями для шарнирно и жестко закрепленных пластин, что подтверждает работоспособность предложенной методики.
6. Проведено исследование пяти конструктивных параметров стеклопакетов (площадь, соотношение длин сторон, толщина стекол, величина межстекольного расстояния, жесткость герметика), численно определены степени их влияния на прогибы стекол пакета под климатической нагрузкой.
7. Предложены практические рекомендации по оптимизации рассмотренных конструктивных параметров, позволяющие снизить относительные прогибы стекол с 1/50L до 1/320L (в 1,5 - 7 раз), что повысит долговечность стеклопакетов и улучшит архитектурный облик зданий.
8. Результаты работы были внедрены в производственный процесс ООО «БАУ-инжиниринг групп», где были применены практические рекомендации по проектированию стеклопакетов, позволяющие снизить прогибы стекол. А также в учебный процесс ФГБОУ ВПО «МГСУ», и используются студентами на практических занятиях при курсовом и дипломном проектировании.