



Research Article

Received: April 11, 2022

Accepted: April 11, 2022

Published: May 11, 2022

ISSN 2304-6295

## Climate-Adaptive Facades with Automatic Control System

Nemova, Darya Viktorovna <sup>1</sup> Bochkarev, Sergey Dmitrievich <sup>1</sup> Andreeva, Daria Sergeevna<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation  
 darya0690@mail.ru (N.D.V.); bochik4@mail.ru (B.S.D.); andreeva\_ds@spbstu.ru (A.D.S.)

Correspondence:\* email [andreeva\\_ds@spbstu.ru](mailto:andreeva_ds@spbstu.ru); contact phone +79312564594

### Keywords:

Heat-gravitational convection, Heat and mass transfer, Constructive energy saving, Energy efficiency, Ventilated air gap, Fluid mechanics of air flows, Sustainable building, Building envelop, Double-skin façade, Adaptive facade

### Abstract:

**The object of research** is an innovative climate control system for an adaptive facade using an automated control system. The purpose of this work is to analyze the energy efficiency of an innovative facade control system. In an analytical study, Autodesk Insight and Autodesk Green Building Studio were used to determine the unknown characteristics of climate adaptive facade structures, energy consumption of the building, peak loads on the ventilation and air conditioning systems, as well as the efficiency of shading structures, air infiltration, etc. In an analytical study, based on the three modes of operation of the facade structure, the operating modes and the necessary equipment for control were developed. **The result** of applying the climate-adaptive facade design with the use of an automated control system turned out to be 49.3% more efficient. The average energy consumption for maintenance of a building with classic glazing was 374 kW/m<sup>2</sup>/year, and the consumption with a climate-adaptive facade structure was 374 kW/m<sup>2</sup>/year. Separately, the ACS system allowed to reduce consumption by 25% or 58 kW / m<sup>2</sup> / year compared to the double skin facade.

## 1 Introduction / Введение

Адаптивные фасады - это динамические ограждающие конструкции зданий, которые могут адаптироваться к динамическим изменениям в окружающей среде здания. Адаптивные фасады позволяют зданиям гибко реагировать на меняющиеся погодные условия и потребности потребителей. Климат-адаптивные фасады являются перспективным вариантом для достижения высокого уровня качества внутренней среды помещений при низком энергопотреблении.

В этом исследовании представлена новая платформа, которая позволяет осуществлять персонализированное управление секциями или модулями фасада в режиме реального времени. Методология использует инструменты параметрического моделирования и автономное программирование управления с использованием языка Python в рамках интегрированного рабочего процесса. Разрешение пользователям отправлять запросы о визуальном дискомфорте в серверный алгоритм управления может улучшить как их показатели визуального комфорта, так и потребление тепловой энергии здания на 61% и 29% соответственно по сравнению с двумя типичными автоматическими элементами управления затенением [1].

В этой статье предлагается метод, который может создать стратегию управления адаптивными фасадами в реальном времени путем объединения быстрой линейной суррогатной модели дневного света с алгоритмом целочисленного программирования. Предлагаемый метод позволяет достичь более высокой производительности за меньшее время, чем традиционные методы, основанные на моделировании. С помощью четырех наборов тематических исследований было обнаружено, что модульная стратегия управления может принести

Nemova, D.; Bochkarev, S., Andreeva, D.

Climate-Adaptive Facades with Automatic Control;

2022; Construction of Unique Buildings and Structures; 100 Article No 10006. doi: 10.4123/CUBS.100.6

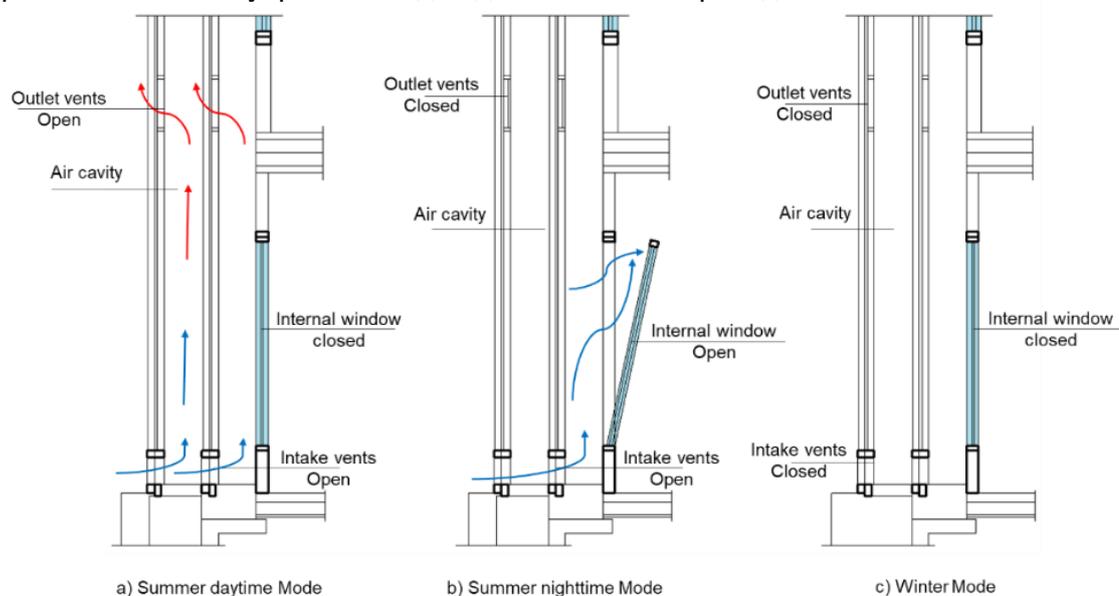
значительную пользу при адаптивном проектировании фасадов. Также было установлено, что различные формы адаптивных фасадных блоков требуют более высокой сложности управления для реализации своего потенциала [2].

В этой статье рассматриваются ключевые аспекты современных и новых технологий адаптивного фасада. К ним относятся механизмы и технологии, используемые для регулирования потоков тепло-и массообмена, дневного света, производства электроэнергии и тепла, эффективность адаптивных фасадов, соответствующие алгоритмы управления для адаптивных фасадов и информация датчиков, необходимая для адаптации фасада для поддержания желаемого уровня комфорта жильцов при минимизации энергопотребления [3].

В статье обсуждаются существующие типологии адаптивных систем на основе их ключевых характеристик, проводится обзор, основанный на систематическом поиске для определения возможных подходов к проектированию нетрадиционных адаптивных фасадов посредством моделирования на ранней стадии проектирования [4].

На основании анализа климат адаптивных фасадных конструкций были сделаны выводы об отсутствии научно-обоснованных разработок новых конструкций фасадов с буферными зонами с АСУ, которые могли бы обеспечить энергоэффективность (и тем самым сократить потребление ТЭР) зданий жилого, общественного и производственного назначения [5–34].

В работе будет рассматриваться несколько базовых режимов работы климатического фасада, на основании которых и будет рассмотрено использование систем автоматизации и способы их управления. На сегодняшний день нет никаких аналогов применения автоматизированных систем управления для динамического фасада.



**Рис.1 - Режимы работы фасада, а) Летний режим (день): внутренняя заслонка закрыта, 2 нижние и 2 верхние вентилируемые решетки открыты, б) Летний режим (ночь): внутренняя заслонка открыта, 2 нижние вентилируемые решетки открыты, 2 нижние вентилируемые решетки закрыты. в) Зимний режим: внутренняя заслонка закрыта, 2 нижние и 2 верхние вентилируемые решетки закрыты.**

**Fig. 1 - Modes of operation of the facade, a) Summer mode (day): the internal damper is closed, 2 lower and 2 upper ventilated grilles are open, b) Summer mode (night): the internal damper is open, 2 lower ventilated grilles are open, 2 lower ventilated grilles grids are closed. c) Winter mode: internal damper closed, 2 lower and 2 upper ventilation grilles closed.**

## 2 Materials and Methods / Материалы и Методы /

Внедрение мер по оптимизации расходования энергии эффективно только в том случае, если есть информация о реальном потреблении энергоресурсов. Шинный адаптер счетчика электроэнергии ZS/S предоставляет возможность оценки и визуализации значений, измеренных счетчиками.

Анализ информационных источников наглядно демонстрирует существенные возможности по оптимизации, направленной на снижение энергопотребления за счет применения современных инсталляционных систем:

Средние значения тепловой энергии, расходуемой на различные параметры управления зданием, выведенные из анализа литературы представлены в Таблице 1.

**Таблица 1. Средние значения энергосбережения**  
**Table 1. Average Energy Savings**

№	Категория	Тепловая энергия, %
1	Управление отоплением помещений	14 - 25 %
2	Автоматизация отопления	7 - 17 %
3	Управление жалюзи	9 - 32 %
4	Управление освещением	25 - 58 %
5	Управление вентиляцией	20 - 45 %

Таким образом, благодаря общим мерам по оптимизации и автоматическому управлению, среднее энергосбережение составляет 11 - 31 %.

Максимально возможное снижение энергопотребления благодаря интеллектуальному управлению фасадной конструкции и здания в целом представлено на рисунке 2.



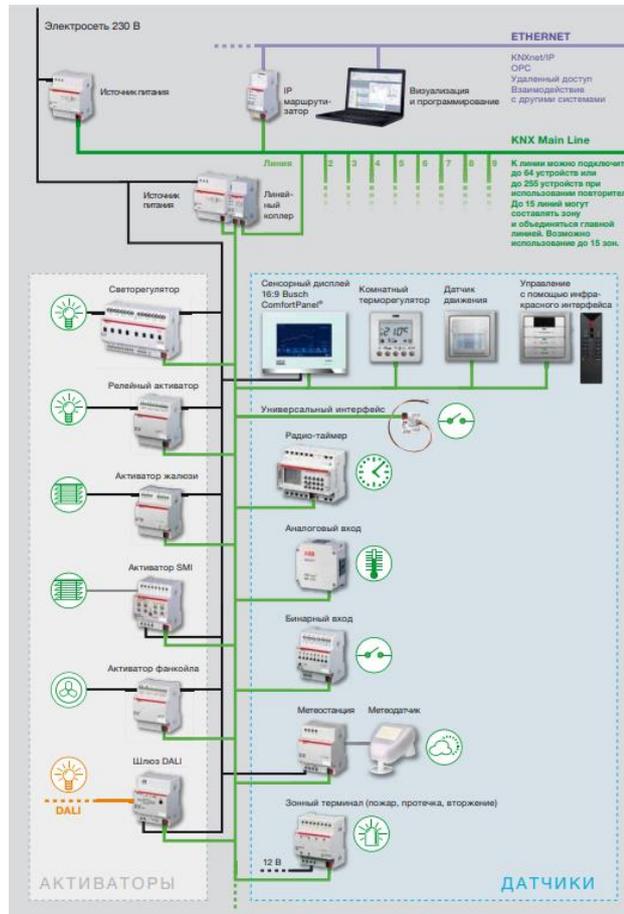
**Рис. 2 - Снижение энергопотребления здания с интеллектуальным управлением фасадных конструкций**

**Fig. 2 - Reduction of building energy consumption with intelligent control of facade structures**

Приведенные в рамках разработки и исследования расчеты позволяют существенно экономить энергию при использовании автоматизации фасадной системы здания. Уровень экономии зависит от объема используемых функций или их комбинаций, а также правильно настроенным и рассчитанным сценариям работы системы. Теоретические расчеты и исследования показывают о возможности экономии до 40% энергии в офисных зданиях.

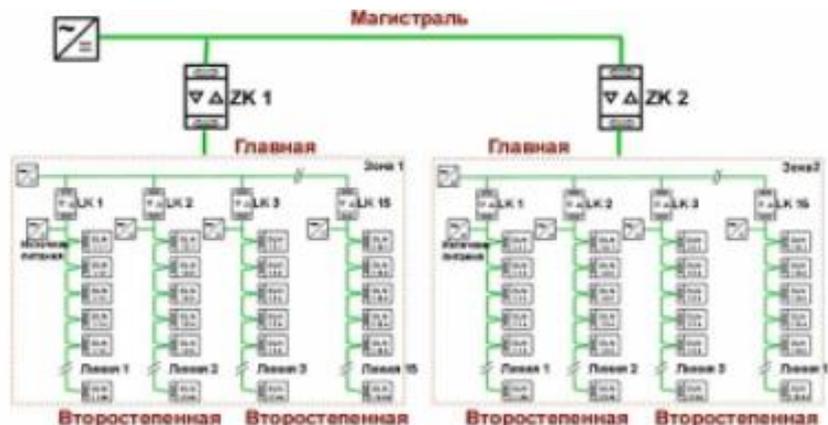
Для управления системой климатического фасада выбрана технология KNX, благодаря такой системе все сенсоры и датчики соединяются через шину с своими активаторами с помощью одной шины данных. В свою очередь активаторы способны управлять цепью питания фасада и остальных потребителей.

Связь между всеми устройствами шинной системы осуществляется с помощью информационных телеграмм, передаваемых через шину. Датчики посылают команды, активаторы их принимают и сразу же выполняют определенные функции. С помощью KNX можно параметризовать широкий ряд функций, таких как формирование групповых команд, логические последовательности, задачи контроля и регулирования. Один из таких вариантов представлен на рисунке 3.



**Рис. 3 - Пример общей системы KNX**  
**Fig. 3 - Example of a general KNX system**

Топология KNX представляет собой линии, которые могут объединяться друг с другом с помощью линейных коплеров в зависимости от размера сети. Питание устройств (датчиков и активаторов) в соответствующих линиях осуществляется с помощью источника питания (30 В), благодаря чему конфигурация всей шинной системы KNX может насчитывать более 50 000 устройств.



**Рис. 4 - Топология системы**  
**Fig. 4 - System topology**

Система KNX характеризуется высокой степенью гибкости. Рабочие параметры и функции систем задаются с помощью программного обеспечения. Кроме того обеспечивается взаимная связь приложений различных функций здания. Без проводов и новой проводки благодаря системе можно перепрограммировать датчики и активаторы удаленно. Модификация системы возможна спустя любое время, благодаря тому, что были приняты стандарты для платформы и все



производители должны их соблюдать. Таким образом любая система, поддерживающая технологию KNX, превращается в универсальный конструктор.

Для ориентированного на практическое применение проектирования, ввода в эксплуатацию и технического обслуживания установок KNX используется программное обеспечение ETS (Engineering Tool Software). После успешного ввода системы KNX в эксплуатацию, программное обеспечение ETS помогает в создании проектной документации. Программное обеспечение ETS совместимо с современными версиями Microsoft Windows®. Таким образом есть возможность стандартизации управления климатическими конструкциями в зданиях.

Системная интеграция с использованием устройств KNX и соответствующего программного обеспечения позволяет удовлетворить все требования инвесторов и владельцев зданий.

1. Планирование На стадии планирования предварительные требования владельца здания объединяются в концепцию и обобщаются в техническом задании.

2. Проектирование Выбираются наиболее подходящие компоненты и программные приложения. На этапе проектирования выбирается топология шинной системы и определяются системные устройства, необходимые для построения сети KNX. Кроме того, на данном этапе осуществляется проектирование с использованием программного инструмента ETS на основе технического задания.

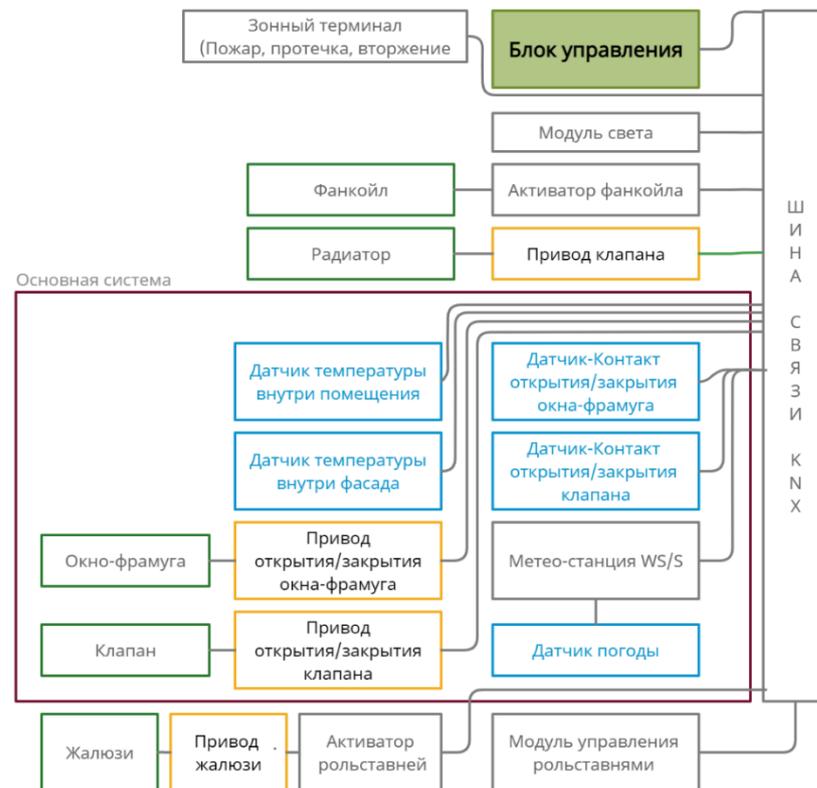
3. Ввод в эксплуатацию На этапе ввода в эксплуатацию производится монтаж и программирование KNX-устройств. ПО ETS создает и загружает в устройства ETS-проект.

4. Внедрение На этапе внедрения программные функции проверяются на соответствие требованиям технического задания. Таким образом проверяется и документируется корректная работа установки.

5. Документация После внедрения установки потребитель получает проектную документацию (схемы, техническое задание и данные ETS-проекта).

### **3 Results and Discussion / Результаты и Обсуждение**

Для автоматизированного управления климат-адаптивными фасадными конструкциями здания была разработана схема, представленная на рисунке 5. На схеме указан набор датчиков и систем управления фасадной конструкцией. Для наглядности она поделена на основную и минимально необходимую систему и дополнительную, которую инвестор/заказчик может добавлять по желанию для более эффективной и комплексной работы всей экосистемы здания.



**Рис. 5 – Схема автоматизированного управления климат-адаптивными фасадными конструкциями здания**

**Fig. 5 - Scheme of automated control of climate-adaptive facade structures of the building**

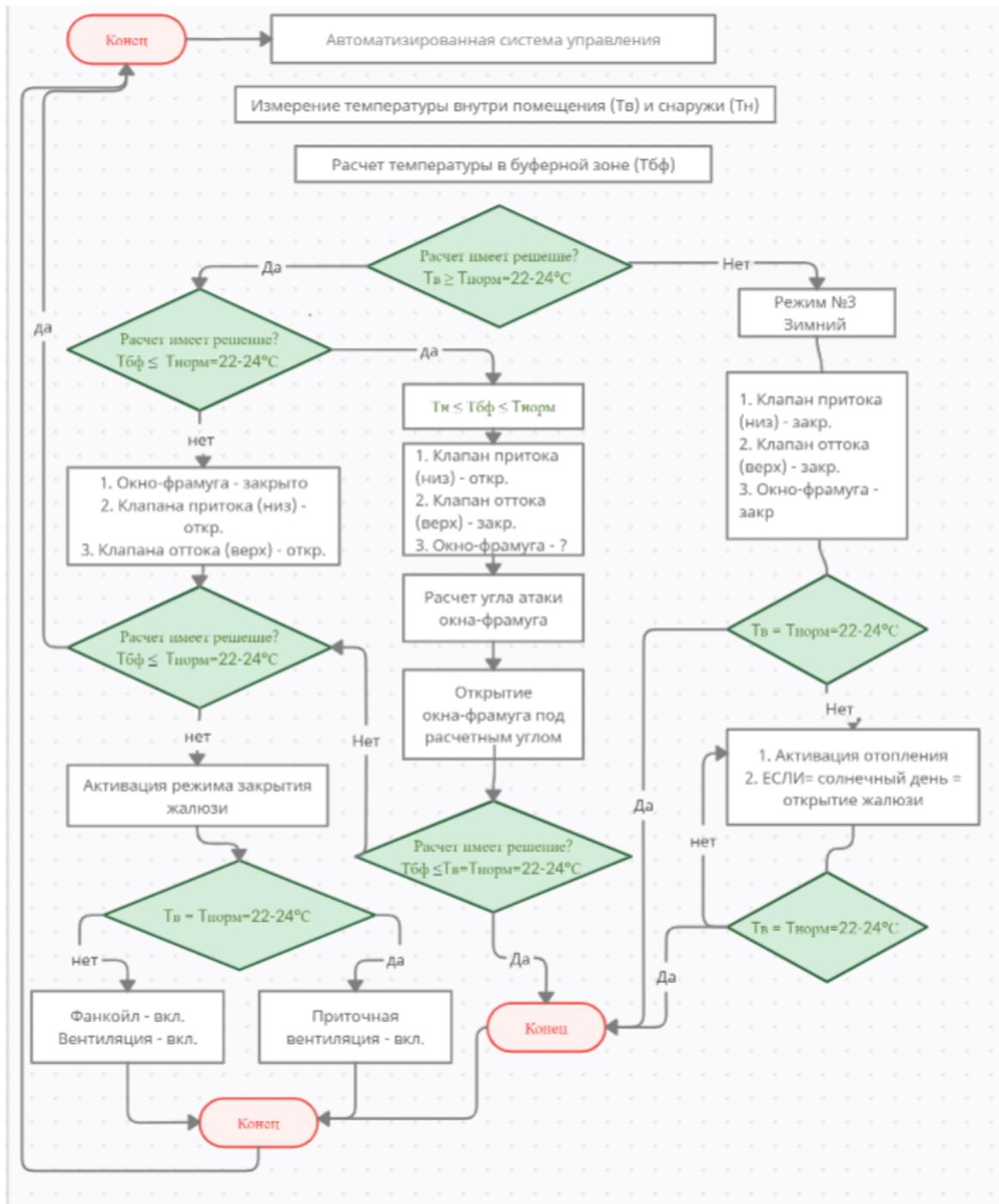
Основная система состоит из:

1. Блок управления
2. Датчик температуры внутри помещения
3. Датчик температуры внутри фасада
4. Датчик-контакт открытия/закрытия окна-фрамуги
5. Датчик-контакт открытия/закрытия клапана
6. Метео-станция
7. Датчик погоды
8. Привод открытия/закрытия окна-фрамуги
9. Окно-фрамуга
10. Привод открытия/закрытия клапана
11. Клапан.

Дополнительная система состоит из:

- A. Зонный терминал (пожар, протечка, вторжение)
- B. Модуль света
- C. Активатор фанкойла
- D. Фанкойл
- E. Привод клапана радиатора
- F. Радиатор
- G. Модуль управления рольставнями
- H. Активатор рольставней
- I. Привод жалюзи.
- J. Жалюзи

На основании схемы (рисунок 5) была составлена логистическая цепь для трех базовых режимов работы климатического фасада (рисунок 6).



**Рис.6 - Логистическая блок схема управления фасадом**  
**Fig. 6 - Façade management logistics block diagram**

Под блоком Автоматизированной системы управления (АСУ) подразумевается сервер, в котором проводится обработка данных, а также настройка всех систем, расчеты.

Управление фасадной конструкции начинается с обработки данных изменения температуры:

- Температура внутри помещений  $T_v$ ,
- Температура наружного воздуха  $T_n$ ,
- Температура воздуха в буферной зоне фасада  $T_{бф}$ .

Задается постоянная температура  $T_{const}=22-24$  °C, которая должна поддерживаться вне зависимости от климатических условий в буферной зоне фасада. Значение принимается по СанПиН 2.2.4.3359-16 "Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах" для офисных помещений.



На основании разницы температур  $T_b$  и  $T_n$ , а также данных с метеодатчика определяется температура в буферной зоне и проводится анализ о возможности достигнуть необходимые значения в 22-24°C в буферной зоне фасада. На основании этих расчетов принимается необходимый сценарий:

1. Если расчетное значение в буферной зоне невозможно достигнуть, и оно превышает норму, то производится опрос системы. Необходимо охладить воздух внутри, для этого открываются заслонки/клапаны внутри и снаружи, тем самым скопившейся горячий воздух удаляется из системы.

2. Производится повторный опрос системы.

Если расчет имеет решение  $T_{бф} \leq T_{норм}=22-24^\circ\text{C}$ , то включается сценарий №2: верхний клапан закрывается, производится оптимальный расчет угла атаки окна-фрамуги и производится открытие под расчетным углом.

Производится повторный опрос системы. Если температура внутри помещения находится в нужном диапазоне, сценарий завершается и производится отчет в систему о достижении результата с дальнейшим мониторингом состояния воздуха.

Если же расчет не имеет решения, если невозможно достигнуть оптимальной температуры в буферной зоне, то включается сценарий №1: окно-фрамуга закрыто, включается опрос системы и систему жалюзи закрывается, предотвращая прямое попадание солнечных лучей внутрь, снижая влияние солнечной радиации. Производится опрос системы. Если выполненных алгоритмов недостаточно для достижения необходимой температуры, включается дополнительно система кондиционирования для достижения необходимых значений. Если выполненных действий было достаточно для достижения необходимой температуры, система вентиляции продолжает работать для удаления избытка тепла и естественного притока свежего воздуха. Сценарии заканчиваются и присылается отчет в АСУ.

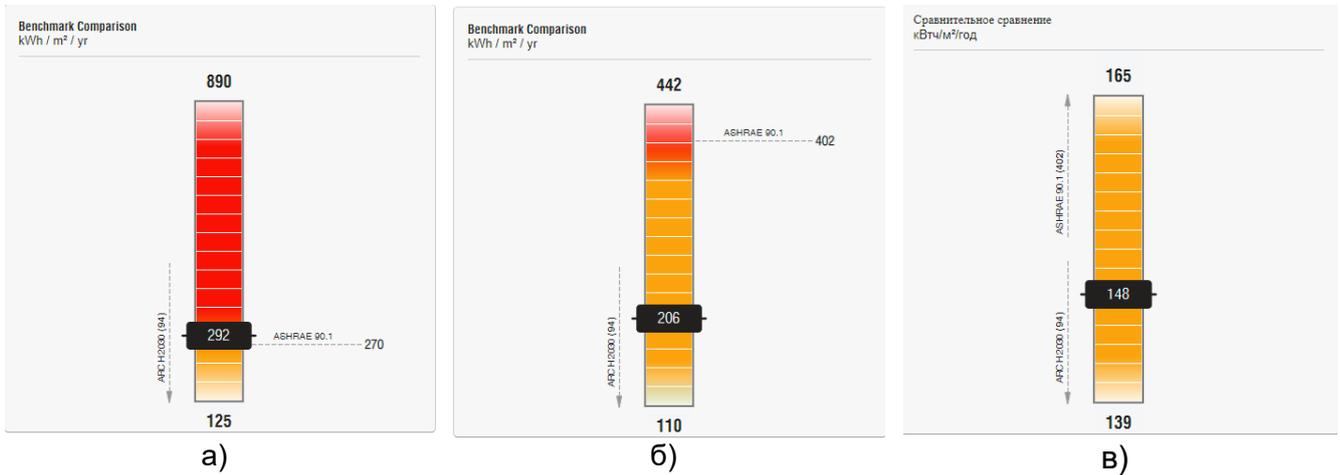
3. На основании данных температуры и метеодатчика существует сценарий №3 при неблагоприятных погодных условиях, когда Сценарий №1 не осуществим из-за большой скорости ветра и недопустимых значений воздушного потока внутри фасадной конструкции. Сценарий №3 также применяется как зимний режим работы. При сценарии №3 закрываются все клапаны притока и оттока воздуха, а также закрывается окно-фрамуга. На основе анализа данных (время года, осадки, ветер, температура воздуха) принимается решение от системы АСУ о принудительной вентиляции и кондиционировании в неблагоприятный промежуток времени для работы системы климатического фасада.

В рамках пилотного проекта изменение режима работы должно происходить не чаще, чем раз в 1 час и не реже, чем раз в 4 часа. Если частота изменения режима будет более частой, это может привести к ускоренному износу оборудования и некорректной работе. Частота изменения определяется на основании математического анализа данных и приведении результатов к усредненным значениями. Информацию опроса датчиков, климатического модуля можно получать каждую минуту. Имея эти данные с помощью IP-связи можно получать актуальный прогноз погоды. Это позволяет заранее запускать необходимые сценарии, прогнозировать работу системы и тем самым уменьшать динамику изменений фасада. Конструкция заранее будет подготовлена к началу рабочего дня, проветривая или прогревая помещение за счёт солнечной энергии, далее перейдет в дневной режим. Необходимо следить за изменениями, и только при экстренных продолжительных изменениях температуры менять свой режим. В конце дня конструкция переключается в вечерний-ночной сценарий.

Благодаря интеллектуальной системе значительно снижается нагрузка на узлы фасада и уменьшаем их износ: 24 активных сценария в сутки и 8760 изменений в год, уменьшаем до 3-4 сценариев в сутки, 1460 изменений в год. Использование интеллектуальной системы продлит срок службы приводов и остальных механических частей фасадной конструкции в 6 раз.

#### *Эффективность использования системы АСУ*

На основании математической модели была оценена эффективность использования системы АСУ. С помощью программы Autodesk Revit Insight были заданы характеристики для затенения конструкции, а также инфильтрации воздуха в помещении с помощью окно-фрамуга, оптимизирована работа системы вентиляции и кондиционирования.



**Рис.7 – Результаты энергомоделирования в Green Building Studio а) фасад с одинарным остеклением, б) двойной вентилируемый фасад без АСУ, в) двойной вентилируемый фасад с применением АСУ**

**Fig. 7 – Energy modeling results in Green Building Studio a) single skin facade, b) double skin facade without ACS, c) double skin facade with ACS**

Результаты энергомоделирования в Autodesk Revit Insight получены с использованием сервиса Green Building Studio. Анализ результатов представлен на рис. 7. С помощью фасада с буферной зоной и автоматизированной системы управления была повышена энергоэффективность всего здания.

Показатели энергоэффективности здания с классическим одинарным остеклением и фасадом с буферной зоной представлены в таблице 2.

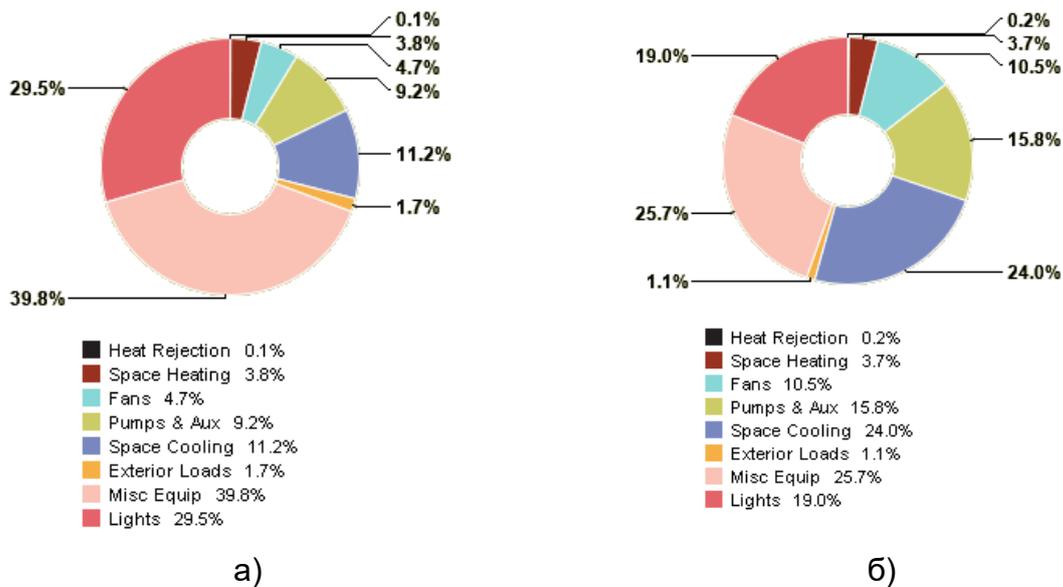
**Таблица 2. Теплотехнические показатели здания с разными типами фасадов**  
**Table 2. Thermal performance of a building with different types of facades**

<b>Сводка по энергии, углероду и затратам</b>		
	Классический фасад	Фасад с буферной зоной
Годовая стоимость энергии	\$287069	\$187051
Стоимость жизненного цикла	\$3909874	\$2547639
<b>Ежегодные выбросы CO2</b>		
Топливо	836.8 мг	583.3 Mg
Эквивалент SUV	83.9 SUVs/Year	58.4 SUVs/Year
<b>Годовая энергия</b>		
Интенсивность использования энергии (EUI)	1432 МДж/м²/год	959 MJ/m²/year
Электричество	4 944 904 кВтч	3185863 kWh
Топливо	16 779 020 МДж	11695520 MJ
Годовой пиковый спрос	1565.3 кВт	1034.5 kW
<b>Энергия жизненного цикла</b>		
Электричество	148 347 120 кВт	95575890 kW
Топливо	503 370 600 МДж	350865600 MJ

Если сравнивать с результатами без системы АСУ, разница расхода энергии в год составила 58кВт/ч на 1м<sup>2</sup> в год или почти 25%.

Срок службы составляет около 30 лет, ставка дисконтирования затрат - 6,1 %. Расчет не включает потери при передаче электроэнергии или возобновляемый потенциал и потенциал естественной вентиляции. Годовой расход электроэнергии сократился почти на 1/3, сократились расходы на топливо и пиковый спрос, благодаря уменьшению трансмиссионных потерь здания и уменьшению нагрузки на систему отопления и вентиляции. На основе анализа результатов можно

сделать вывод о сокращении нагрузки на систему вентиляции, отопления, кондиционирования. Расход годовой электроэнергии, рассчитанный с помощью GBS, представлен на рисунке 8.



**Рис.8 – Диаграмма расхода энергии, а) для фасада с буферной зоной б) для классического фасада с одинарным остеклением**  
**Fig. 8 – Energy consumption diagram, a) for a facade with a buffer zone b) for a classic facade with single glazing**

На основе анализа результатов можно сделать вывод о том, что при расчетном количестве людей в помещении нагрузка на приточную вентиляцию уменьшилась с 10.4 до 4.1 LPerSec/m<sup>2</sup>, а также расходы на удельное охлаждение с 11 м<sup>2</sup>/кВт до 4 м<sup>2</sup> / кВт. Значение удельного нагрева уменьшилось с 9 м<sup>2</sup>/кВт до 4 м<sup>2</sup> / кВт. Таким образом общий приток от системы вентиляции сократился с 249,958л/с до 98 747 л/с. Общая мощность, необходимая для системы кондиционирования и отопления, сократилась на 52%. Форма здания и конструкция проема должны обеспечивать эффект дымохода или перекрестную вентиляцию.

## 4 Conclusion / Выводы

Исходя из полученных результатов можно сделать к выводу, что применение климат адаптивных фасадов с системой АСУ позволило:

- Повысить сопротивление теплопередачи здания
- Повысить класс энергетической эффективности с А до А++
- Годовое энергопотребление здания сократилось на 30% (86кВтч/м<sup>2</sup>/год)
- Годовая стоимость энергии сократилась на 29,5% (101 018\$)
- Годовые расходы на электричество сократились на 35,6% (1759041кВтч)
- Уменьшилась нагрузка на систему вентиляции и кондиционирования более чем в 2 раза, а также увеличился потенциал экономии электроэнергии в 8 раз
- Также сократился годовой пиковый спрос 34% (530,8кВт).

Система климат адаптивной фасадной конструкции имеет большую перспективу развития, к главным плюсам такой системы можно отнести:

- Высокую энергоэффективность
- Снижение нагрузки на инженерные системы здания (Вентиляция, кондиционирование, отопление)
- Повышенные показатели шумоизоляции
- Возможность симбиоза всех систем жизнеобеспечения здания с помощью автоматизированной системы управления
- Применение в разных климатических районах.



К недостаткам можно отнести повышенную стоимость реализации.

## 5 Fundings

Проект выполнен при поддержке Российского научного фонда, соглашение 21-79-10283 от 29.07.2021 <https://rscf.ru/project/21-79-10283/>

This work is supported by the Russian Science Foundation under grant 21-79-10283, date 29.07.2021 <https://rscf.ru/project/21-79-10283/>

## References

1. Tabadkani, A., Roetzel, A., Li, H.X., Tsangrassoulis, A.: Simulation-based personalized real-time control of adaptive facades in shared office spaces. *Automation in Construction*. 138, 104246 (2022). <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2022.104246>.
2. Shen, L., Han, Y.: Optimizing the modular adaptive façade control strategy in open office space using integer programming and surrogate modelling. *Energy and Buildings*. 254, 111546 (2022). <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2021.111546>.
3. Alkhatib, H., Lemarchand, P., Norton, B., O'Sullivan, D.T.J.: Deployment and control of adaptive building facades for energy generation, thermal insulation, ventilation and daylighting: A review. *Applied Thermal Engineering*. 185, 116331 (2021). <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2020.116331>.
4. Tabadkani, A., Roetzel, A., Li, H.X., Tsangrassoulis, A.: Design approaches and typologies of adaptive facades: A review. *Automation in Construction*. 121, 103450 (2021). <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2020.103450>.
5. Gloriant, F., Joulin, A., Tittlein, P., Lassue, S.: Using heat flux sensors for a contribution to experimental analysis of heat transfers on a triple-glazed supply-air window. *Energy*. 215, 119154 (2021). <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.119154>.
6. Michaux, G., Greffet, R., Salagnac, P., Ridoret, J.B.: Modelling of an airflow window and numerical investigation of its thermal performances by comparison to conventional double and triple-glazed windows. *Applied Energy*. 242, 27–45 (2019). <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.03.029>.
7. Zhang, C., Gang, W., Wang, J., Xu, X., Du, Q.: Experimental investigation and dynamic modeling of a triple-glazed exhaust air window with built-in venetian blinds in the cooling season. *Applied Thermal Engineering*. 140, 73–85 (2018). <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2018.05.050>.
8. Choi, W., Joe, J., Kwak, Y., Huh, J.H.: Operation and control strategies for multi-storey double skin facades during the heating season. *Energy and Buildings*. 49, 454–465 (2012). <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2012.02.047>.
9. Santa Cruz Astorqui, J., Porrás-Amores, C.: Ventilated Façade with double chamber and flow control device. *Energy and Buildings*. 149, 471–482 (2017). <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2017.04.063>.
10. Hussain, S., Oosthuizen, P.H.: Validation of numerical modeling of conditions in an atrium space with a hybrid ventilation system. *Building and Environment*. 52, 152–161 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.12.016>.
11. Yu, T., Zhao, J., Zhou, J., Lei, B.: Experimental and numerical studies on dynamic thermal performance of hollow ventilated interior wall. *Applied Thermal Engineering*. 180, (2020). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115851>.
12. Giancola, E., Sanjuan, C., Blanco, E., Heras, M.R.: Experimental assessment and modelling of the performance of an open joint ventilated façade during actual operating conditions in Mediterranean climate. *Energy and Buildings*. 54, 363–375 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.035>.
13. Sanjuan, C., Sánchez, M.N., Enríquez, R., del Rosario Heras Celemin, M.: Experimental PIV techniques applied to the analysis of natural convection in open joint ventilated facades. *Energy Procedia*. 30, 1216–1225 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.134>.
14. Choi, W., Joe, J., Kwak, Y., Huh, J.H.: Operation and control strategies for multi-storey double skin facades during the heating season. *Energy and Buildings*. 49, 454–465 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.047>.



15. Asadi, S., Hassan, M., Beheshti, A.: Development and validation of a simple estimating tool to predict heating and cooling energy demand for attics of residential buildings. *Energy and Buildings*. 54, 12–21 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.037>.
16. Shih, T.H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z., Zhu, J.: A new  $k-\epsilon$  eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows. *Computers and Fluids*. 24, 227–238 (1995). [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(94\)00032-T](https://doi.org/10.1016/0045-7930(94)00032-T).
17. Hernández-Pérez, I., Álvarez, G., Xamán, J., Zavala-Guillén, I., Arce, J., Simá, E.: Thermal performance of reflective materials applied to exterior building components - A review. *Energy and Buildings*. 80, 81–105 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.008>.
18. Suárez, M.J., Sanjuan, C., Gutiérrez, A.J., Pistono, J., Blanco, E.: Energy evaluation of an horizontal open joint ventilated faade. *Applied Thermal Engineering*. 37, 302–313 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.11.034>.
19. Sanjuan, C., Suárez, M.J., González, M., Pistono, J., Blanco, E.: Energy performance of an open-joint ventilated façade compared with a conventional sealed cavity façade. *Solar Energy*. 85, 1851–1863 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.04.028>.
20. Sanjuan, C., Suárez, M.J., Blanco, E., Heras, M.D.R.: Development and experimental validation of a simulation model for open joint ventilated façades. *Energy and Buildings*. 43, 3446–3456 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.005>.
21. Zhang, C., Gang, W., Wang, J., Xu, X., Du, Q.: Numerical and experimental study on the thermal performance improvement of a triple glazed window by utilizing low-grade exhaust air. *Energy*. 167, 1132–1143 (2019). <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.11.076>.
22. Sharma, M.K., Preet, S., Mathur, J., Chowdhury, A., Mathur, S.: Exploring the advantages of photo-voltaic triple skin façade in hot summer conditions. *Solar Energy*. 217, 317–327 (2021). <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2021.02.020>.
23. Zhang, T., Tan, Y., Yang, H., Zhang, X.: The application of air layers in building envelopes: A review. *Applied Energy*. 165, 707–734 (2016). <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.12.108>.
24. Zhao, H.X., Magoulès, F.: A review on the prediction of building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16, 3586–3592 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.049>.
25. Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., Pout, C.: A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*. 40, 394–398 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>.
26. Sozer, H.: Improving energy efficiency through the design of the building envelope. *Building and Environment*. 45, 2581–2593 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.05.004>.
27. Zhang, T., Tan, Y., Yang, H., Zhang, X.: The application of air layers in building envelopes: A review. *Applied Energy*. 165, 707–734 (2016). <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.12.108>.
28. Zhao, H.X., Magoulès, F.: A review on the prediction of building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16, 3586–3592 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.049>.
29. Ginestet, S., Marchio, D., Morisot, O.: Improvement of buildings energy efficiency: Comparison, operability and results of commissioning tools. *Energy Conversion and Management*. 76, 368–376 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.057>.
30. Capeluto, I.G.: Energy performance of the self-shading building envelope. *Energy and Buildings*. 35, 327–336 (2003). [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00105-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00105-6).
31. Fang, Z., Li, N., Li, B., Luo, G., Huang, Y.: The effect of building envelope insulation on cooling energy consumption in summer. *Energy and Buildings*. 77, 197–205 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.030>.
32. Guo, W., Qiao, X., Huang, Y., Fang, M., Han, X.: Study on energy saving effect of heat-reflective insulation coating on envelopes in the hot summer and cold winter zone. *Energy and Buildings*. 50, 196–203 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.035>.
33. Bellia, L., Marino, C., Minichiello, F., Pedace, A.: An overview on solar shading systems for buildings. *Energy Procedia*. 62, 309–317 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.392>.
34. González, A.B.R., Díaz, J.J.V., Caamaño, A.J., Wilby, M.R.: Towards a universal energy efficiency index for buildings. *Energy and Buildings*. 43, 980–987 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.023>.