

Санкт–Петербургский государственный университет
Факультет математики и компьютерных наук

Можжаев Андрей Михайлович

Выпускная квалификационная работа

***Разработка метода построения упрощенной динамической
модели для задачи оптимального управления
микроклиматом помещения***

Уровень образования: бакалавриат

Направление 01.03.02 «Прикладная математика и информатика»

Основная образовательная программа СВ.5156.2019 «Прикладная
математика, фундаментальная информатика и программирование»

Профиль «Современное программирование»

Научный руководитель:

к.ф.-м.н. Дмитрий Сергеевич Шалымов

Рецензент:

зав. лаб. 37 в ИПУ РАН,

д.т.н Антон Викторович Уткин,

Санкт-Петербург

2023 г.

Содержание

Введение	3
Постановка задачи	4
Обзор литературы	5
1. Построение модели	6
1.1. Построение модели куба	6
1.2. Построение модели помещения	8
1.3. Моделирование с реальными данными температур	10
1.4. Добавление солнечной радиации	11
2. Аналитическая часть	13
2.1. Экспортирование результата в таблицу	13
2.2. Критерий оптимальности точки	15
2.3. Описание алгоритма	17
Заключение	18
Благодарность	19
Список литературы	20

Введение

Данное исследование является частью проекта по созданию централизованной системы управления потреблением энергии в зданиях общего назначения, тепловой и электрической. Одной из уникальных особенностей данной системы предполагается разработка и последующее применение интеллектуальных методов предсказания энергопотребления.

При постановке задачи регулирования для систем отопления, кондиционирования и вентиляции эксплуатирующие службы руководствуются двумя конкурирующими критериями: экономичностью работы системы и комфортом внутренней среды. По различным оценкам, от 50 до 70 процентов всей расходуемой энергии приходится на системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (ОВК). Таким образом, оптимизация потребления этого класса устройств, пусть даже на 5-10 процентов, повлечет за собой ощутимое снижение общего уровня расхода энергии.

В основе данной работы лежит идея скомбинировать два основных подхода к моделированию микроклимата помещений: методы вычислительной термодинамики (CFD) и методы сетевых воздушных потоков (NAF). Точное решение задачи CFD на небольшом временном промежутке позволит смоделировать работу измерительного комплекса, оптимизировать вектор измеряемых величин, количество датчиков и их расположение в помещении.

Эта задача решается численными методами, так как сбор данных эмпирическим путем займет много времени и ресурсов. В стандартных офисных зданиях число отдельных зон может достигать до нескольких сотен, поэтому расстановка датчиков и считывание показаний очень трудоемкий процесс. При этом, используя сгенерированную модель, мы можем определить значения на датчиках одновременно для всех интересующих расположений.

Постановка задачи

Целью является разработка метода построения упрощенной динамической модели характеристик воздуха в помещении, на основе которой может быть реализован последующий сбор реальных данных.

Достижение поставленной цели делится на два этапа, численное моделирование и анализ полученных результатов.

Первоначальное моделирование проводится методами вычислительной гидрогазодинамики (CFD), которые основаны на решении нелинейных уравнений тепло-массопереноса (Навье-Стокса). Результаты численного моделирования становятся основой для второго, аналитического этапа.

На втором этапе определяются параметры усовершенствованных моделей динамики характеристик воздуха в данном помещении, а также оптимальная пространственная конфигурация для измерительных приборов.

Обзор литературы

Существуют два основных подхода моделирования микроклимата помещения: метод вычислительной гидродинамики (CFD) и метод сетевых воздушных потоков (NAF) [1]. У каждого из этих подходов свои преимущества и недостатки.

Метод вычислительной гидродинамики может быть использован для моделирования помещения с микроскопической точностью. Динамика состояния помещения моделируется системой дифференциальных уравнений Навье-Стокса. Задаются геометрия помещения и граничные условия. Помещение разбивается на сетку, уменьшение размера которой увеличивает точность. Однако маленькая погрешность компенсируется большими временными затратами как для аналитика при построении модели и интерпретации, так и при дальнейшем решении компьютером смоделированных уравнений. Это ограничивает использование CFD в одноместных помещениях и стационарных решениях.

В свою очередь, метод сетевых воздушных потоков может дать макроскопическое представление о здании путем решения системы уравнений сохранения массы и энергии. Здание целиком представляется в виде графа, температура в комнате аппроксимируется точкой (или несколькими для больших помещений), в которой находится датчик. Весь этот процесс занимает гораздо меньше времени, что делает возможным моделирование всего здания, включая различные механические системы, в течение периода времени продолжительностью до года. Ограничения этого метода включают в себя гораздо менее детализированные результаты (например, отсутствие сведений о потоке воздуха внутри помещения)

1. Построение модели

Целью данного этапа является построение модели «демонстрационного стенда Умного дома», которая затем будет использована для определения оптимального расположения датчика температуры. В качестве платформы для моделирования был выбран COMSOL Multiphysics [2].

1.1. Построение модели куба

В начале работы было решено создать простую модель деревянного куба с ребром 1 метр и толщиной стен 15 сантиметров, а затем проанализировать изменение температуры внутри. Для создания физической модели использовался SolidWorks, а затем модель была импортирована в COMSOL. В COMSOL внутренность куба заполнили воздухом (куб воздуха с ребром 0.7 м), материал стен выбран как Wood (pine).

Начальная температура стен и воздуха внутри 293 К. Температура, действующая на внешнюю поверхность стен куба, задана по формуле:

$$300 + 50 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot t[s]}{500}\right) K$$

Промоделирован промежуток времени длиной 1000 секунд с шагом 50. Были рассмотрены различные размеры сетки разбиения: Normal (Рис. 1), Fine (Рис. 2), Finer (Рис. 3) и Extra fine (Рис. 4).

Ниже можно увидеть полученные результаты. На первой картинке изображена сама сетка, на второй и третьей температура в разрезе в момент 250 и 750 секунд соответственно.

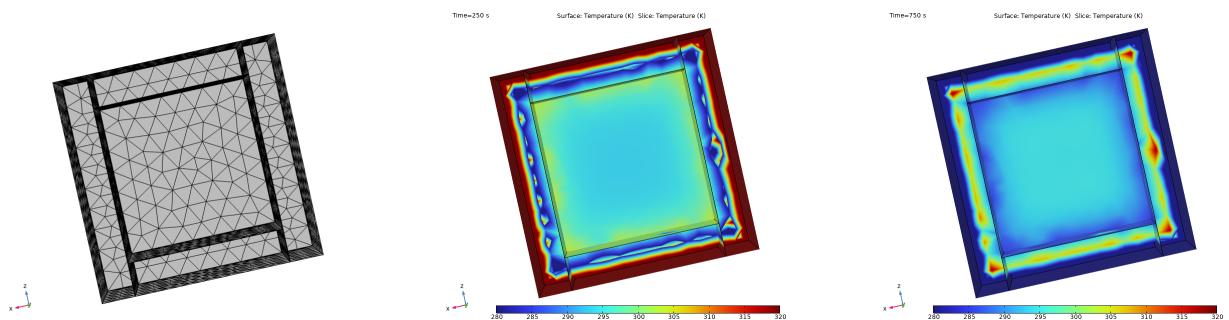


Рис. 1: Normal

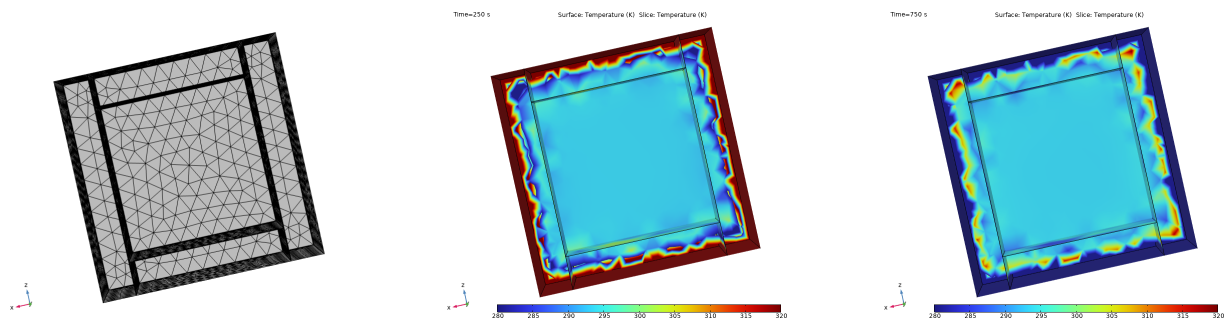


Рис. 2: Fine

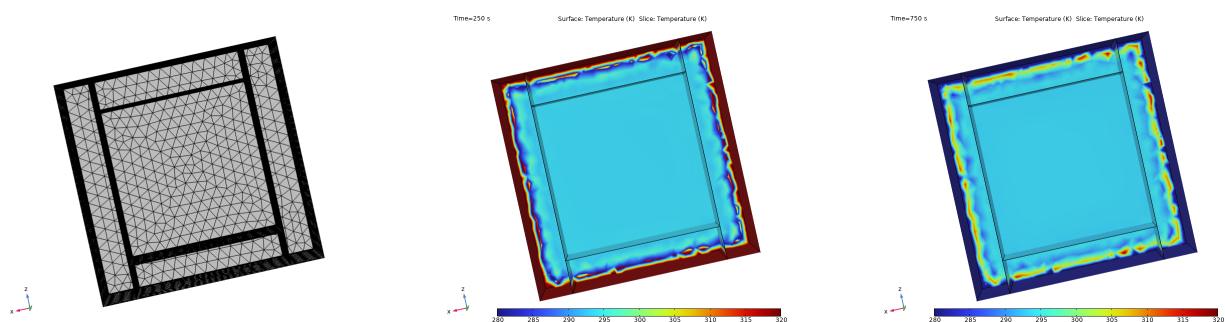


Рис. 3: Finer

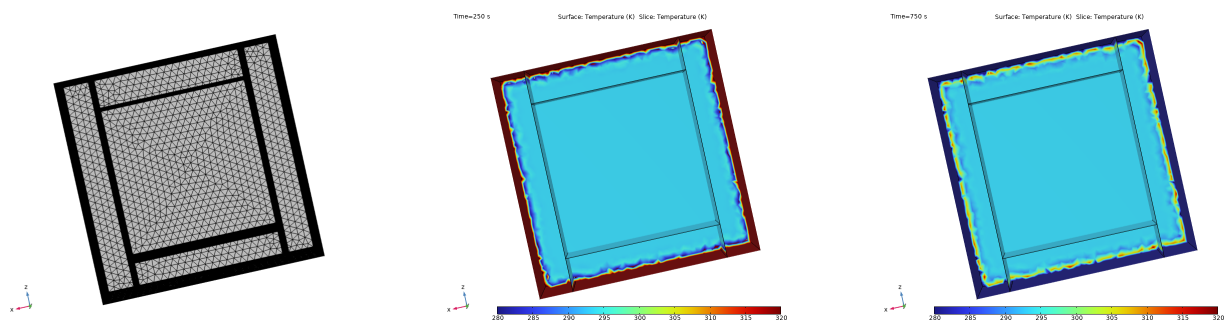


Рис. 4: Extra fine

Можно видеть, что у Normal и Fine сеток большая погрешность, тогда как начиная с Finer результат выглядит достаточно гладко. Время вычисления для Finer составило 20 секунд, для Extra fine - 80 секунд.

Была попытка запустить вычисления на сетке размером Extremely fine, но ожидаемое время было слишком большим и требовалось много памяти. В итоге было решено остановиться на Finer как достаточно точной при приемлемых затратах.

1.2. Построение модели помещения

За основу было выбрано помещение, смоделированное в программе FreeCAD, экспортированное сначала в формат STL (но из-за особенности формата не подошло), затем в STEP (не удалось построить сетку разбиения из-за неточностей в геометрии помещения). В итоге было принято решение построить упрощенную модель сразу в COMSOL. Помещение размером $10 \times 6 \times 3 \text{ м}^3$ с окном, дверью и внутренней стеной с проходом. Материал стен - Concrete, дверь - Wood (pine), окно - Glass (quartz).

Начальная температура стен и воздуха внутри 20°C , внешняя температура задается синусоидой с периодом 24 часа и амплитудой 4°C . Временной промежуток 1 день, шаг 5 минут. Размер сетки *Finer*. При этом можно увидеть, что окно разбито на более мелкую сетку, чем все остальное (Рис. 5). Если отдельно сделать сетку для окна поглубже (*Normal*), то можно добиться снижения количества элементов разбиения на 22% (в данном примере было 98659, стало 76413) без ухудшения качества.

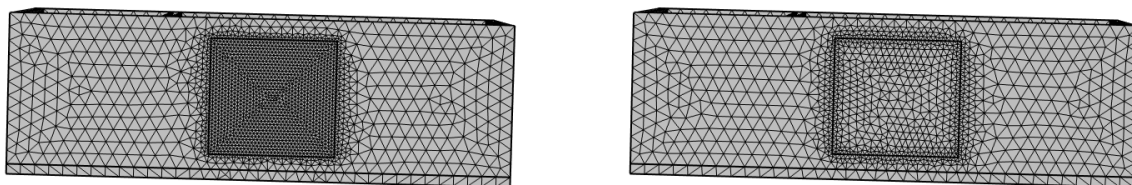


Рис. 5: Сетка разбиения окна

Полученные результаты можно увидеть на изображениях снизу. На них показана температура стен и температура воздуха в горизонтальном разрезе.

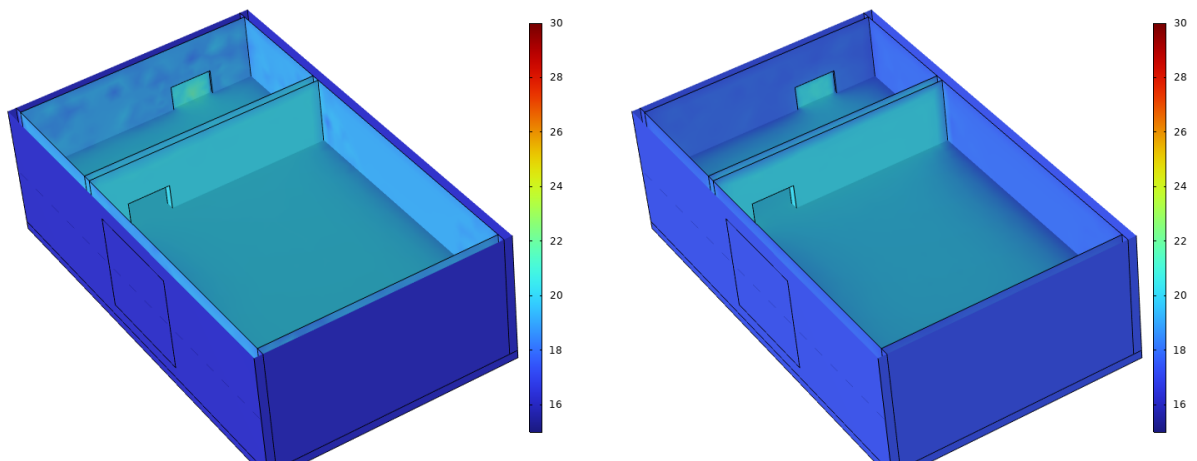


Рис. 6: 6 и 9 часов

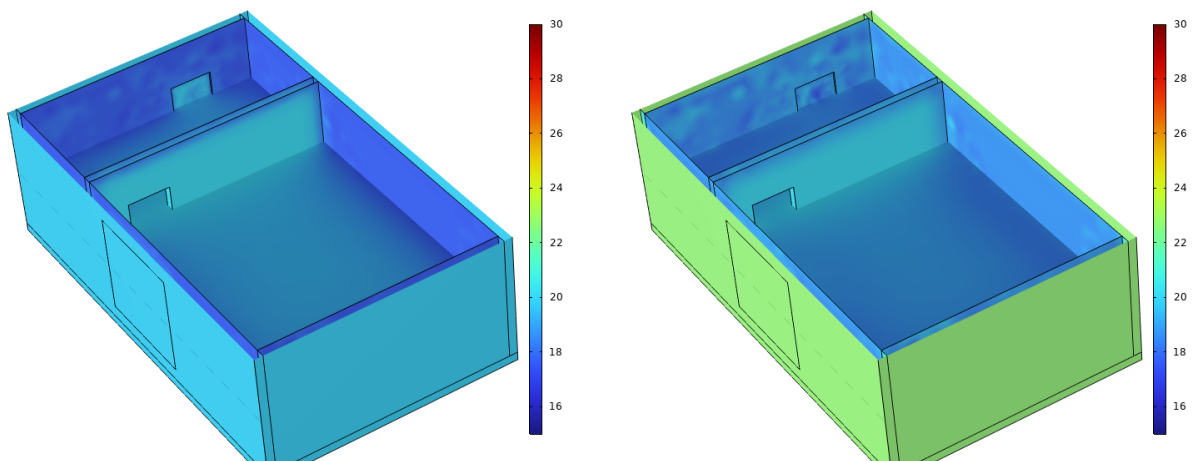


Рис. 7: 12 и 15 часов

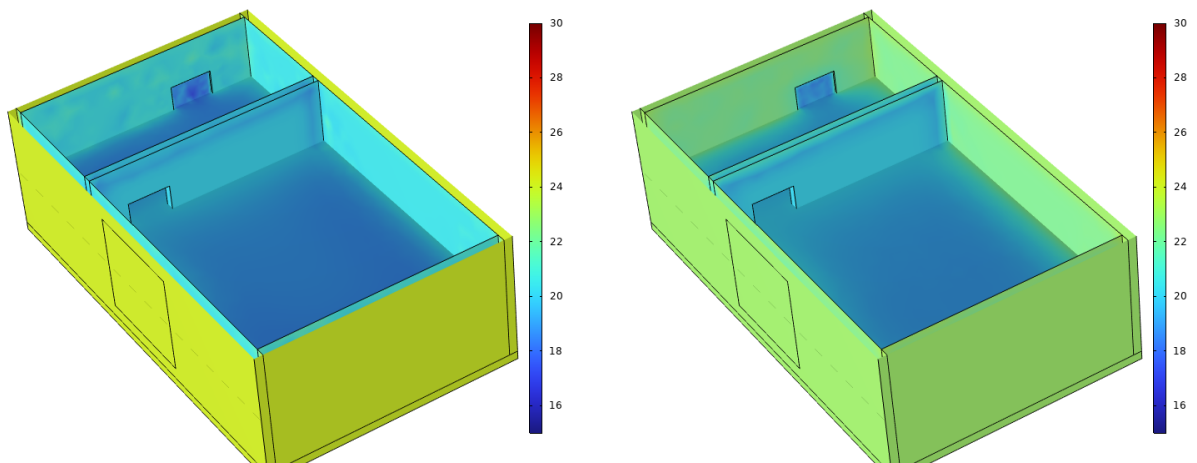


Рис. 8: 18 и 21 час

1.3. Моделирование с реальными данными температур

Для моделирования погодных условий был использован датасет с температурами, использованный для прошлых исследований, за май-август 2020 года. В нем с шагом примерно 1 секунда записаны показания датчика, расположенного снаружи (Рис. 9). Было решено промоделировать 4 дня с шагом в 5 минут.

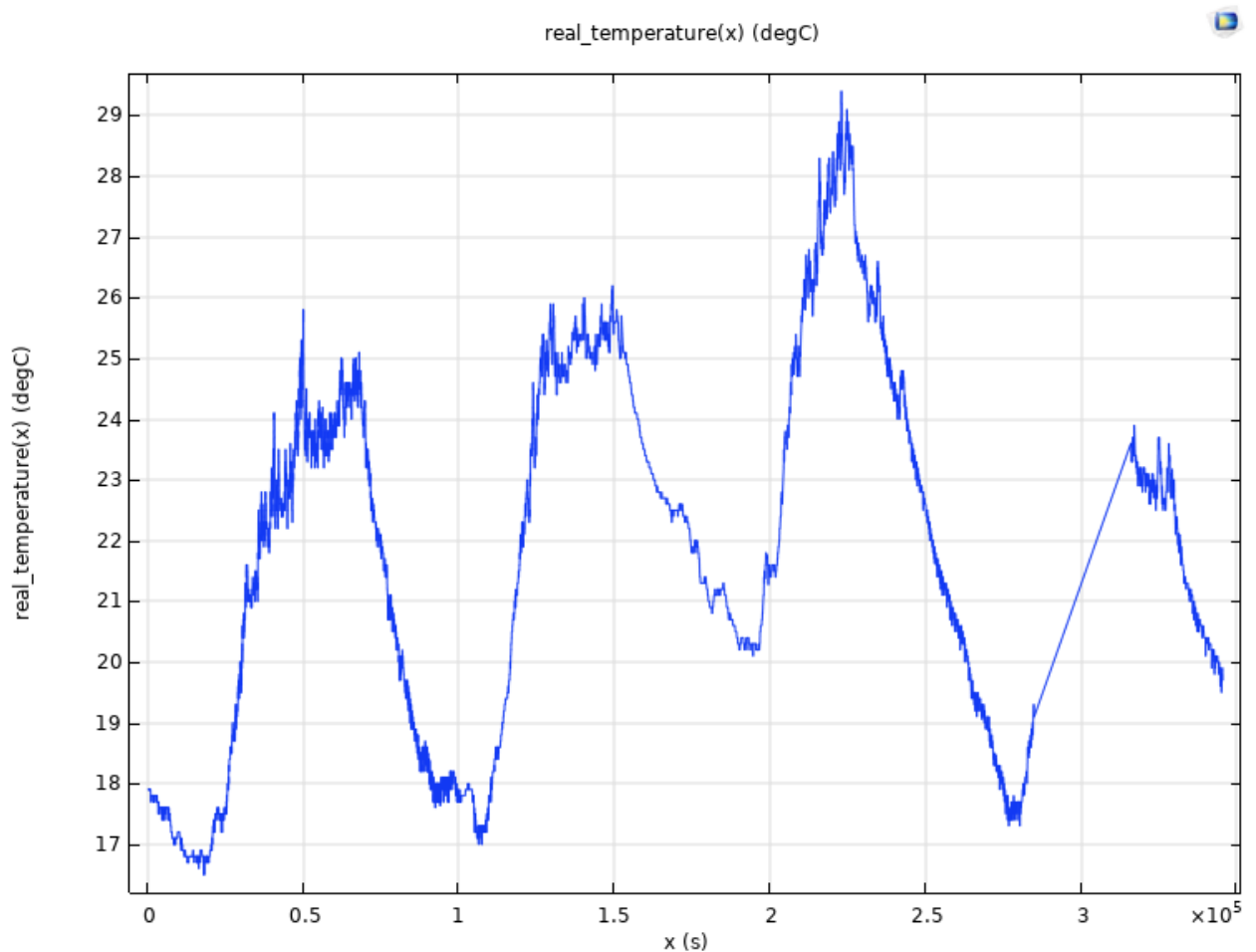


Рис. 9: График внешней температуры

1.4. Добавление солнечной радиации

Следующим шагом стало добавление солнечной радиации. Все внешние стены комнаты и потолок, а также внутренние стены и пол, на которые могло светить солнце сквозь стекло, были подвержены тепловому излучению. Окно расположено стороной на юг.

В качестве источника радиации выбрано солнце, географическое расположение помещения - город Москва, дата 04.08.2020. Полученные результаты ниже (Рис. 10). На этих изображениях можно отметить нагрев части пола, на которую светит солнце через окно.

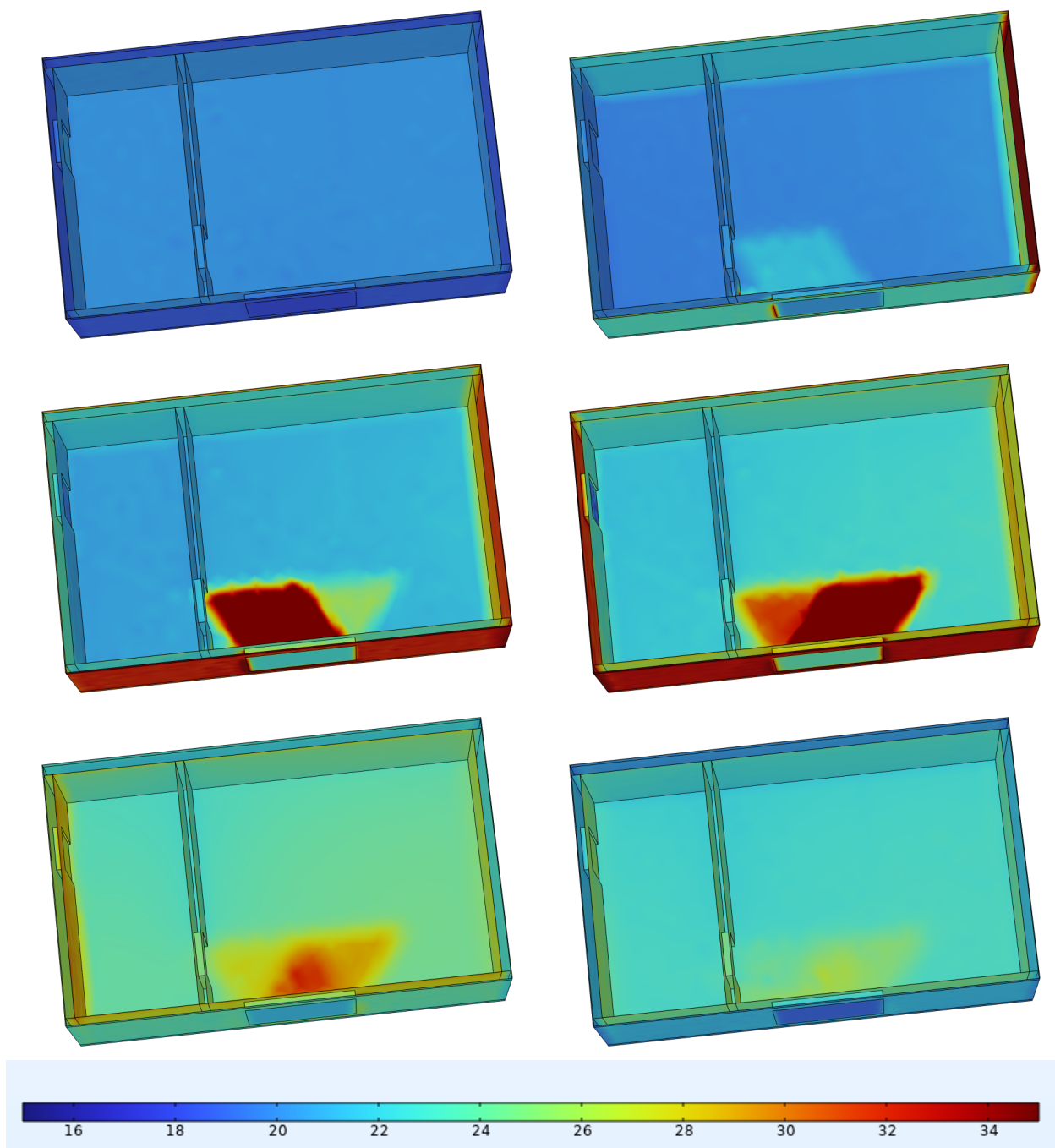


Рис. 10

2. Аналитическая часть

2.1. Экспортирование результата в таблицу

Для нахождения оптимального расположения датчика, будем перебирать некоторые точки, и температуру в них запишем в таблицу для дальнейшего сравнения. Самым простым вариантом будет рассмотреть сетку из точек $9 \times 9 \times 9$ (Рис. 11).

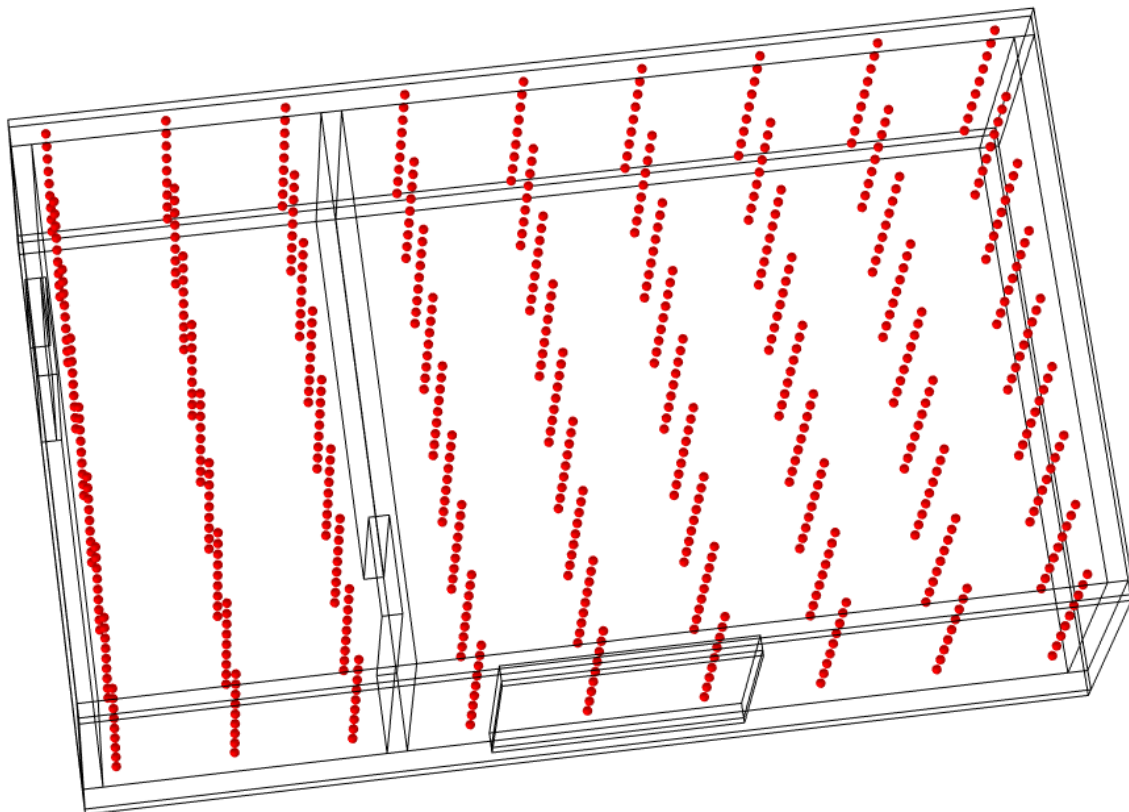


Рис. 11

Однако можно заметить, что большинство точек находятся не у стены, а значит и установить датчик в них будет проблематично. Поэтому более оптимальным вариантом будет рассмотреть сетку вдоль каждой из стен, пола и потолка (Рис. 12). Точки будем располагать на некотором расстоянии от стены (15 см), так как температура воздуха может достаточно сильно отличаться от температуры стены, и датчик измеряет именно температуру воздуха.

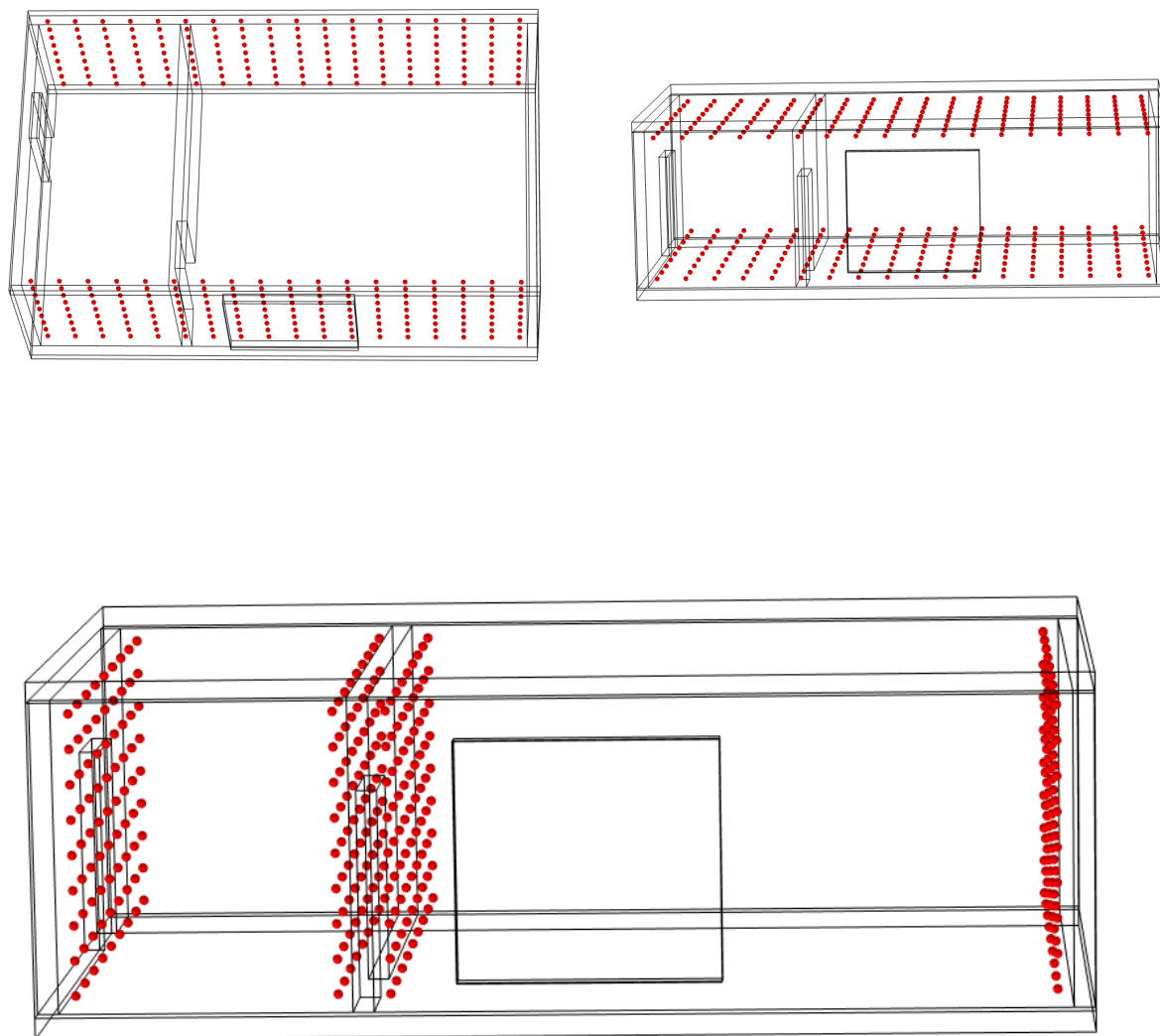


Рис. 12

Полученная таблица температур выглядит так:

Time (s)	Point 1	Point 2	...	Point N	Ambient
0	20.0	19.4		20.8	17.9
300	19.9	19.4		20.7	17.9
600	19.9	19.4		20.6	17.9
...					
345600	21.2	21.5		20.8	19.9

2.2. Критерий оптимальности точки

Теперь надо определить критерий оптимальности точки. Между внутренней температурой помещения и внешней температурой есть явная линейная зависимость [3]. Однако для нахождения наиболее точной регрессии надо определить временной сдвиг температур. Из физической сущности процесса теплообмена следует, что нагрев и охлаждение помещения под воздействием наружной температуры происходит не мгновенно, а с некоторым временным сдвигом. Например, на графике (Рис. 13) изображено изменение внешней температуры (синяя кривая) и температура в одной из внутренних точек (оранжевая кривая). Можно видеть, что точки перелома у синей кривой встречаются раньше, чем у оранжевой.

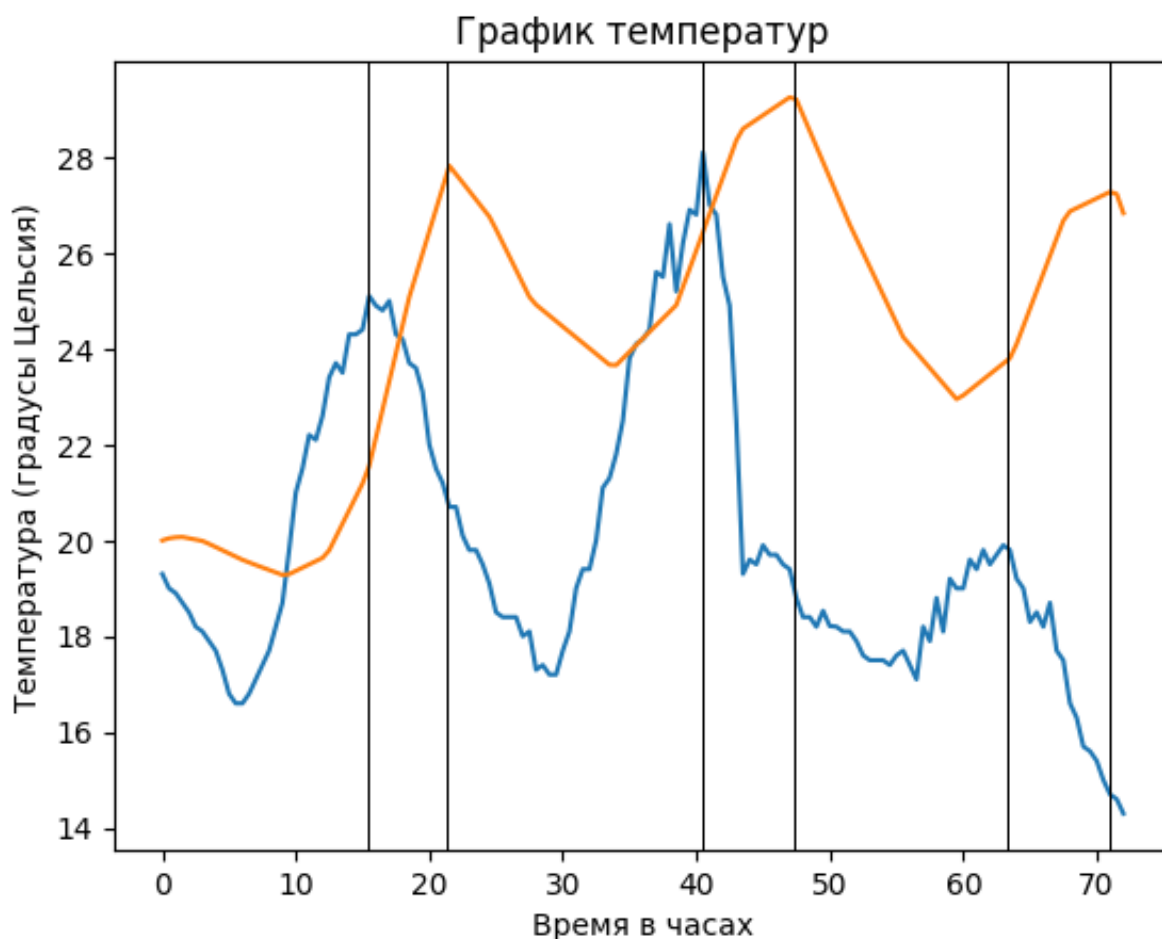


Рис. 13

Величину этого сдвига будем определять, сдвигая последовательно массив значений наружной температуры относительно массива внутренней температуры на шаг t и вычисляя значение линейной корреляции Пирсона между полученными рядами. В нашем случае шаг t равен шагу в модели и составляет 5 минут. На полученном графике (Рис. 14) видно, что после сдвига точки экстремума гораздо лучше накладываются друг на друга, что в свою очередь улучшает точность линейной регрессии. Сдвиг при этом для каждой точки может быть разный.

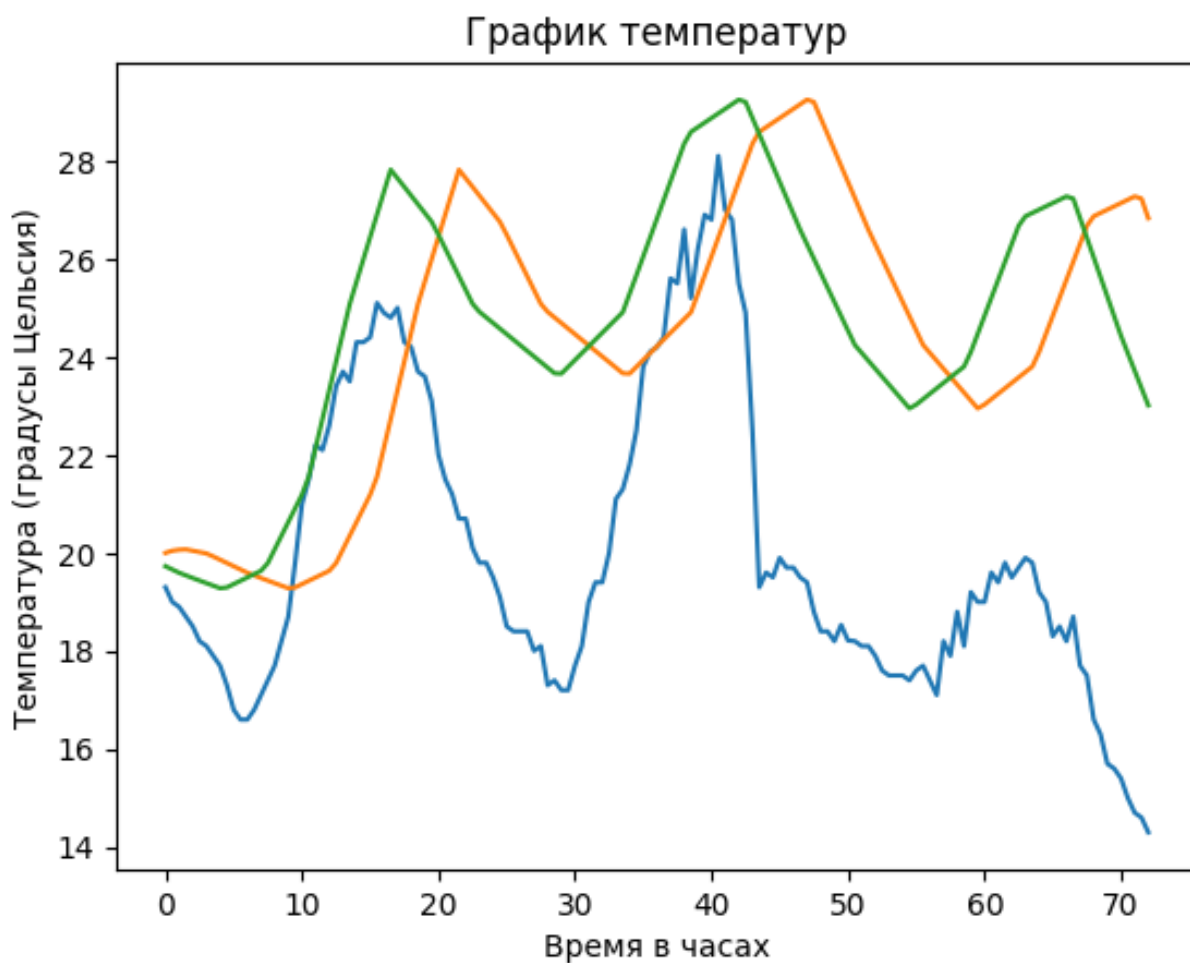


Рис. 14

2.3. Описание алгоритма

Теперь, когда определили временной сдвиг, можем строить линейную регрессию. Для этого у нас есть 2 датасета: тренировочный, в котором записаны посчитанные температуры за 4 дня с 04.08.2020 по 08.08.2020, и тестовый, в котором температуры за 3 дня с 09.08.2020 по 11.08.2020. Мы перебираем все возможные столбцы температур из тренировочной таблицы, для каждой находим свой сдвиг, при котором коэффициент линейной корреляции Пирсона со столбцом внешних температур максимален. Затем считаем коэффициенты линейной регрессии сдвинутого столбца. Далее используя полученные коэффициенты и сдвиг, аппроксимируем температуру воздуха снаружи из тестового датасета. Для полученной аппроксимации считаем коэффициент детерминации R^2 . Точка с наибольшим коэффициентом считается оптимальной.

На графике ниже (Рис. 15) показан результат работы алгоритма.



Рис. 15

Заключение

Заключение должно подводить итоги работы и содержать информацию о полученных в рамках работы результатах.

Благодарность

Автор выражает особую благодарность Юрию Рассадину за регулярное внимание и наставления к данной работе

Список литературы

- [1] 2017 ASHRAE Handbook Fundamentals SI
<https://studylib.es/doc/8956387/2017-ashrae-handbook-fundamentals-si.pdf>
- [2] COMSOL Multiphysics®. URL: <https://www.comsol.ru>.
- [3] Пащенко А.Ф., Рассадин Ю.М. Оценка взаимосвязи параметров микроклимата с учетом тепловой инерции внешних стен здания / Труды 15-й Международной конференции "Управление развитием крупномасштабных систем"(MLSD'2022). М.: ИПУ РАН, 2022. С. 1216-1224.