

**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

|   |    |
|---|----|
| <b>Введение</b> . . . . .                                   | 3  |
| <b>Постановка задачи</b> . . . . .                          | 4  |
| <b>Обзор литературы</b> . . . . .                           | 6  |
| <b>1. Построение модели</b> . . . . .                       | 9  |
| 1.1. Построение модели куба . . . . .                       | 9  |
| 1.2. Построение модели помещения . . . . .                  | 11 |
| 1.3. Моделирование с реальными данными температур . . . . . | 13 |
| 1.4. Добавление солнечной радиации . . . . .                | 14 |
| <b>2. Аналитическая часть</b> . . . . .                     | 16 |
| 2.1. Экспортирование результата в таблицу . . . . .         | 16 |
| 2.2. Критерий оптимальности точки . . . . .                 | 18 |
| 2.3. Описание алгоритма . . . . .                           | 20 |
| <b>Заключение</b> . . . . .                                 | 21 |
| <b>Благодарность</b> . . . . .                              | 22 |
| <b>Список литературы</b> . . . . .                          | 23 |

## 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

Основной вопрос - где в помещении расположить датчик температуры, который будет использоваться в составе централизованной системы эксплуатации здания, направленной на оптимизацию энергопотребления и обеспечение комфорта внутренней среды? Подобные системы используют методы управления с предсказывающими моделями. Они эффективны потому, что... Поэтому предлагается критерий размещения датчика, учитывающий качество регрессионных моделей, получаемых на основе показаний.

Для сокращения времени обследования здания, ускорения процесса развертывания сети, было предложено выделить в проекте два этапа - численное моделирование исследуемого помещения и анализ полученных данных. Промоделировать помещение максимально подробно методами вычислительной газодинамики. Проанализировать "каждую" потенциальную точку методами Пашенко / Рассадин [3], сравнительным анализом выбрать наилучшую точку размещения микроклиматического датчика.

На первом этапе будет смоделирован "Демонстрационный стенд Умного дома". Геометрия помещения задана в формате CAD. Моделирование будет производиться в COMSOL Multyphysics [2]. Цель смоделировать некоторый промежуток времени с хорошей точностью. Будет смоделирован процесс теплообмена внутри помещения и с окружающим воздухом, а также солнечная радиация. Значения внешней температуры будут взяты из собранного ранее датасета. Полученная модель будет использована далее.

На втором этапе будут выбраны точки возможного расположения датчика. Температуры в них будут импортированы в таблицу. Дальнейшая работа с полученными таблицами будет реализована на языке Python. Итогом работы будет точка, значение критерия в которой будет оптимальным. Для небольших помещений достаточно перебора потенциальных точек размещения, для больших помещений со сложной конфигурацией возможно применение градиентного метода поиска, набор локальных максимумов, возможно, ведёт к решению задачи зонирования сложных холлов.

Результатом дипломного проекта станет отработанный метод построения упрощенной динамической модели характеристик воздуха в помещении, на основе которой может быть реализован последующий сбор реальных данных.

## Обзор литературы

Существуют два основных подхода моделирования микроклимата помещения [1]: метод вычислительной гидродинамики (CFD) и метод сетевых воздушных потоков (NAF). 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. В общем случае граничное условие определяет физическую задачу в определенных положениях. Часто физические явления осложняются одновременными тепловыми потоками (например, теплопроводностью через ограждение здания, получением тепла от обогреваемых внутренних объектов, солнечным излучением через остекление здания), фазовыми изменения (например, конденсация и испарение воды), химические реакции (например, горение) и механические перемещения (например, вентиляторы, перемещения пассажиров).

Первым шагом в проведении CFD-анализа является разделение области на большое количество более мелких областей, называемых ячейками. Совокупность ячеек, составляющих область интереса, обычно называется сеткой или решеткой. Размер ячеек позволяет контролировать точность расчета.

CFD включает в себя решение связанных дифференциальных уравнений в частных производных, которые должны решаться одновременно или последовательно. Аналитических решений для моделирования внутренней среды не существует. Компьютерные численные процедуры являются единственным средством получения полных решений этих наборов уравнений.

Однако высокая точность CFD компенсируется большими временными затратами как для аналитика при построении модели и интерпретации результатов, так и при 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. Сетевые модели воздушного потока идеализируют здание как совокупность зон, таких как комнаты, коридоры и места соединения воздуховодов, соединенных путями потока, представляющими двери, окна, вентиляторы, воздуховоды и т.д. Таким образом, пользователь собирает описание здания, соединяя зоны с помощью соответствующих путей потока. Сетевая модель прогнозирует потоки воздуха от зоны к зоне на основе характеристик давления и расхода в моделях путей и различий в давлении на путях. Три типа сил управляют потоком по путям: ветер, перепады температур (эффект стекания) и механические устройства, такие как вентилятор.

Как показано на рис. 1, модели сетей воздушного потока напоминают электрические сети. Поток воздуха соответствует электрическому току, при этом давление в зоне действует подобно напряжению в электрическом узле. Пути прохождения потока реагируют на резисторы и другие электрические элементы, включая активные элементы, такие как батареи (вентиляторы).

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)

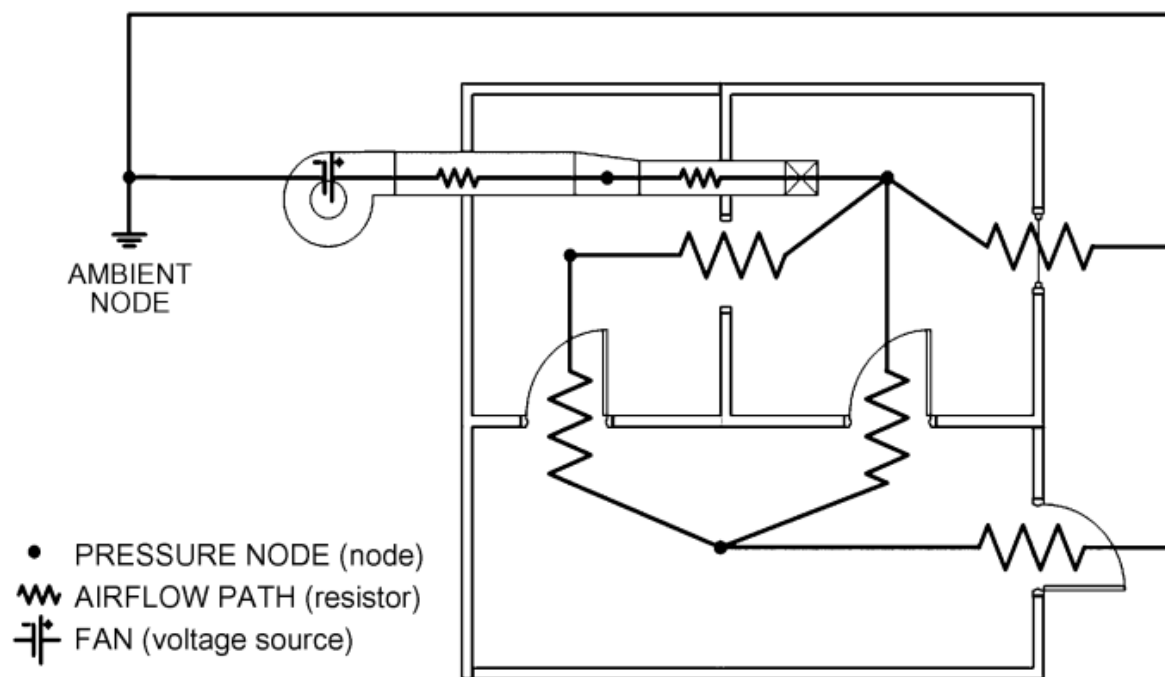


Рис. 1



# 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. 2), Fine (Рис. 3), Finer (Рис. 4) и Extra fine (Рис. 5).

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.

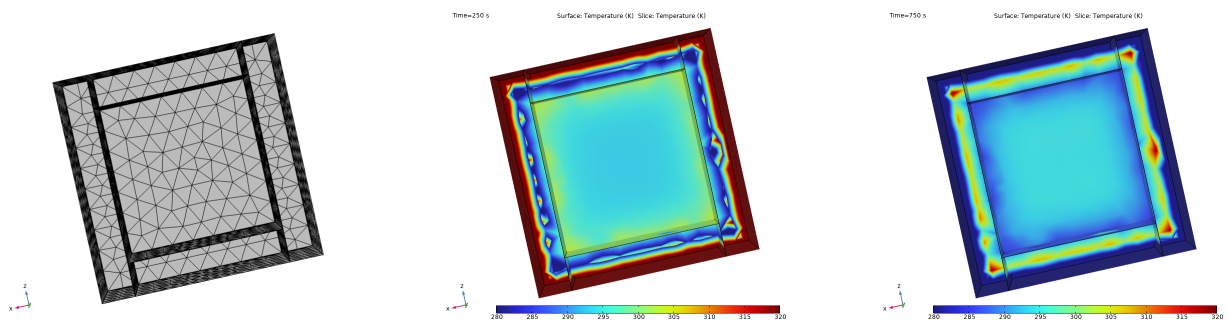
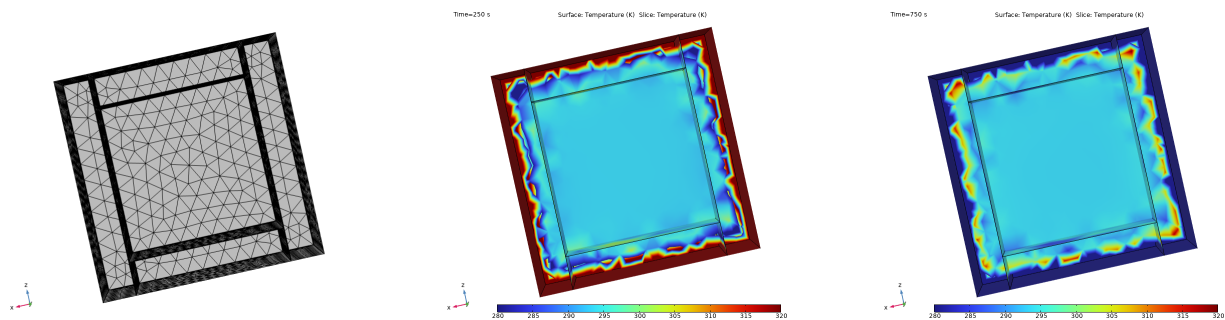
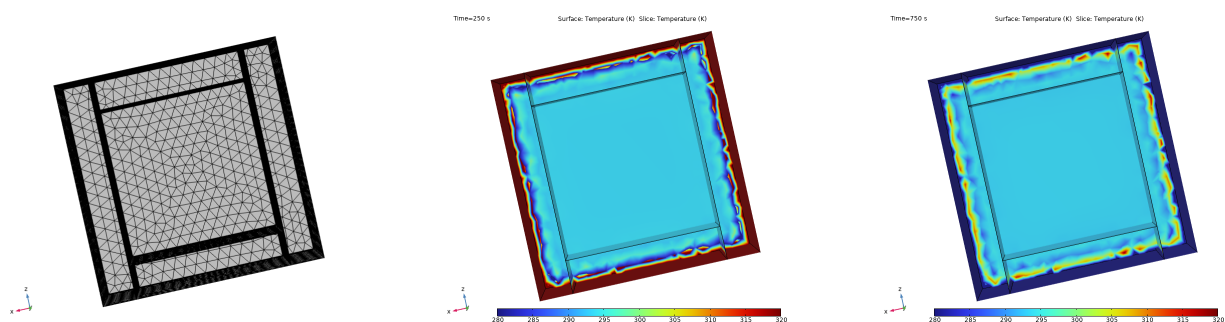


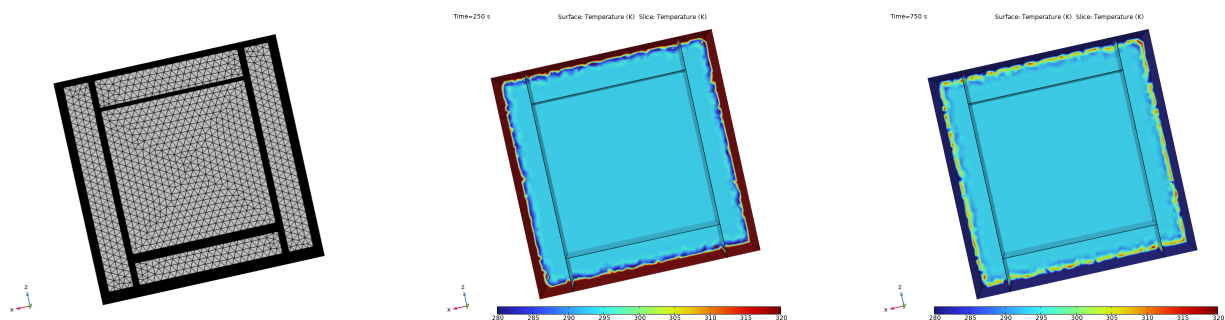
Рис. 2: Normal



**Рис. 3: Fine**



**Рис. 4: Finer**



**Рис. 5: Extra fine**

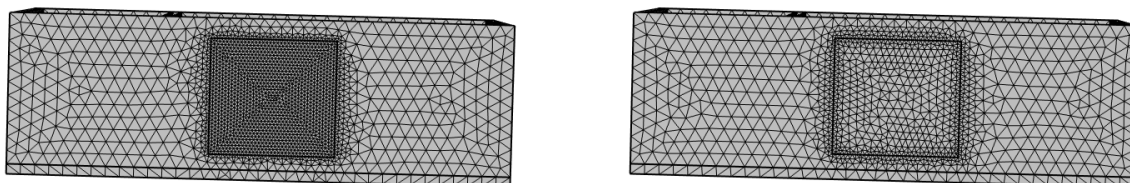
Можно видеть, что у Normal и Fine сеток большая погрешность, тогда как начиная с Finer результат выглядит достаточно гладко. Время вычисления для Finer составило 20 секунд, для Extra fine - 80 секунд.

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

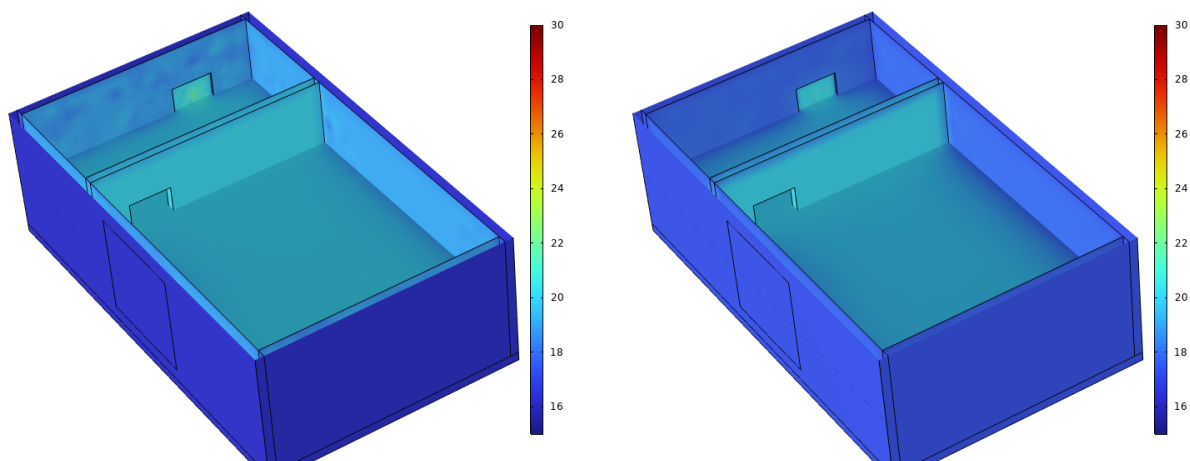
За основу было выбрано помещение, смоделированное в программе FreeCAD, экспортированное сначала в формат STL (но из-за особенности формата не подошло), затем в STEP (не удалось построить сетку разбиения из-за неточностей в геометрии помещения). В итоге было принято решение построить упрощенную модель 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  $20^\circ\text{C}$ , внешняя температура задается синусоидой с периодом 24 часа и амплитудой  $4^\circ\text{C}$ . 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. 6). 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.

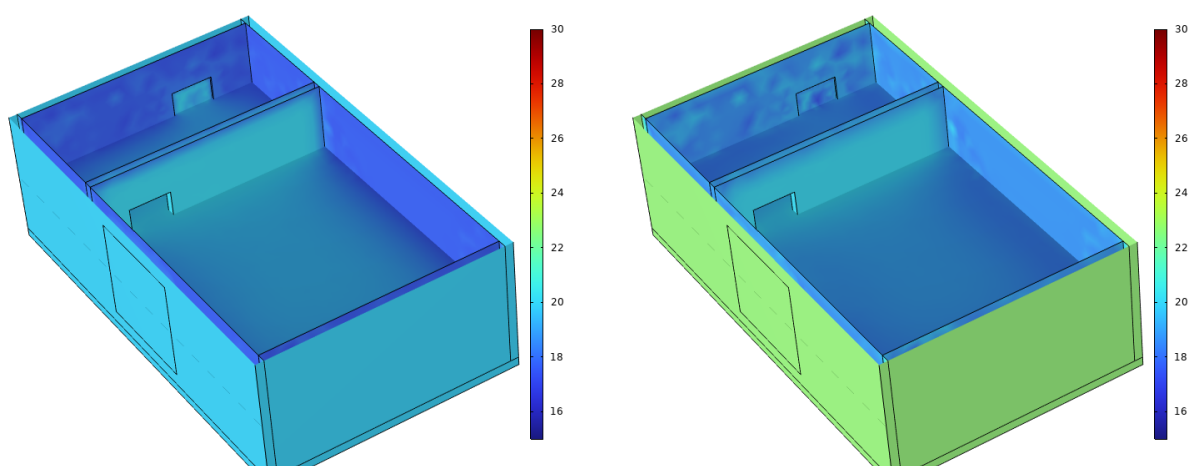


**Рис. 6:** Сетка разбиения окна

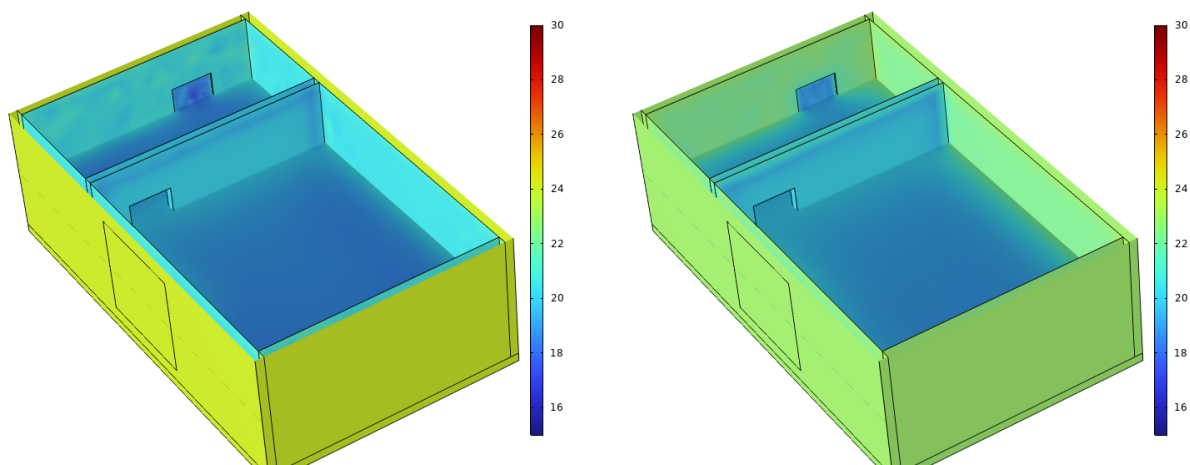
Полученные результаты можно увидеть на изображениях снизу. На них показана температура стен и температура воздуха в горизонтальном разрезе.



**Рис. 7:** 6 и 9 часов



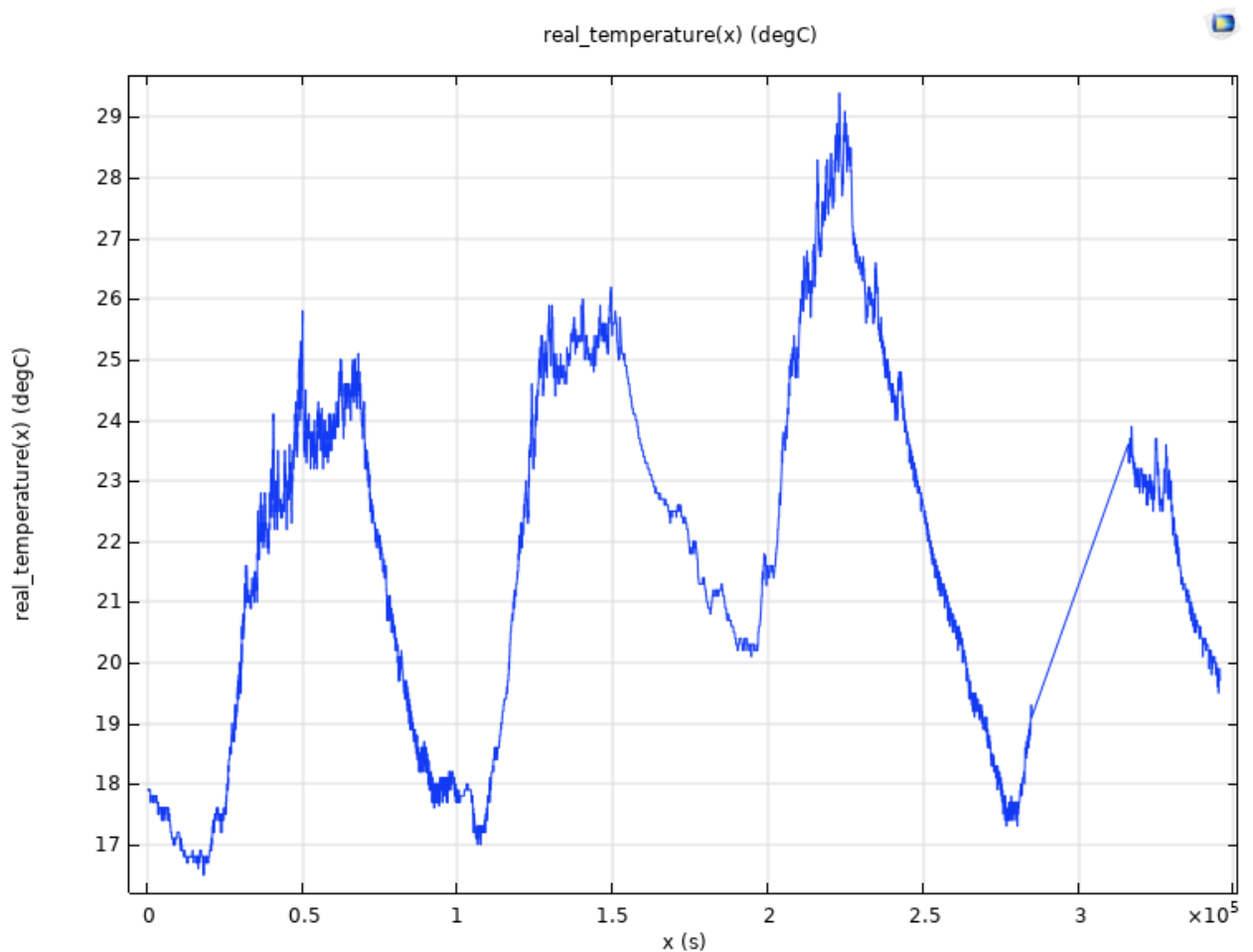
**Рис. 8:** 12 и 15 часов



**Рис. 9:** 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. 10). Было решено промоделировать 4 дня с шагом в 5 минут.



**Рис. 10:** 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. 11). На этих изображениях можно отметить нагрев части пола, на которую светит солнце через окно.

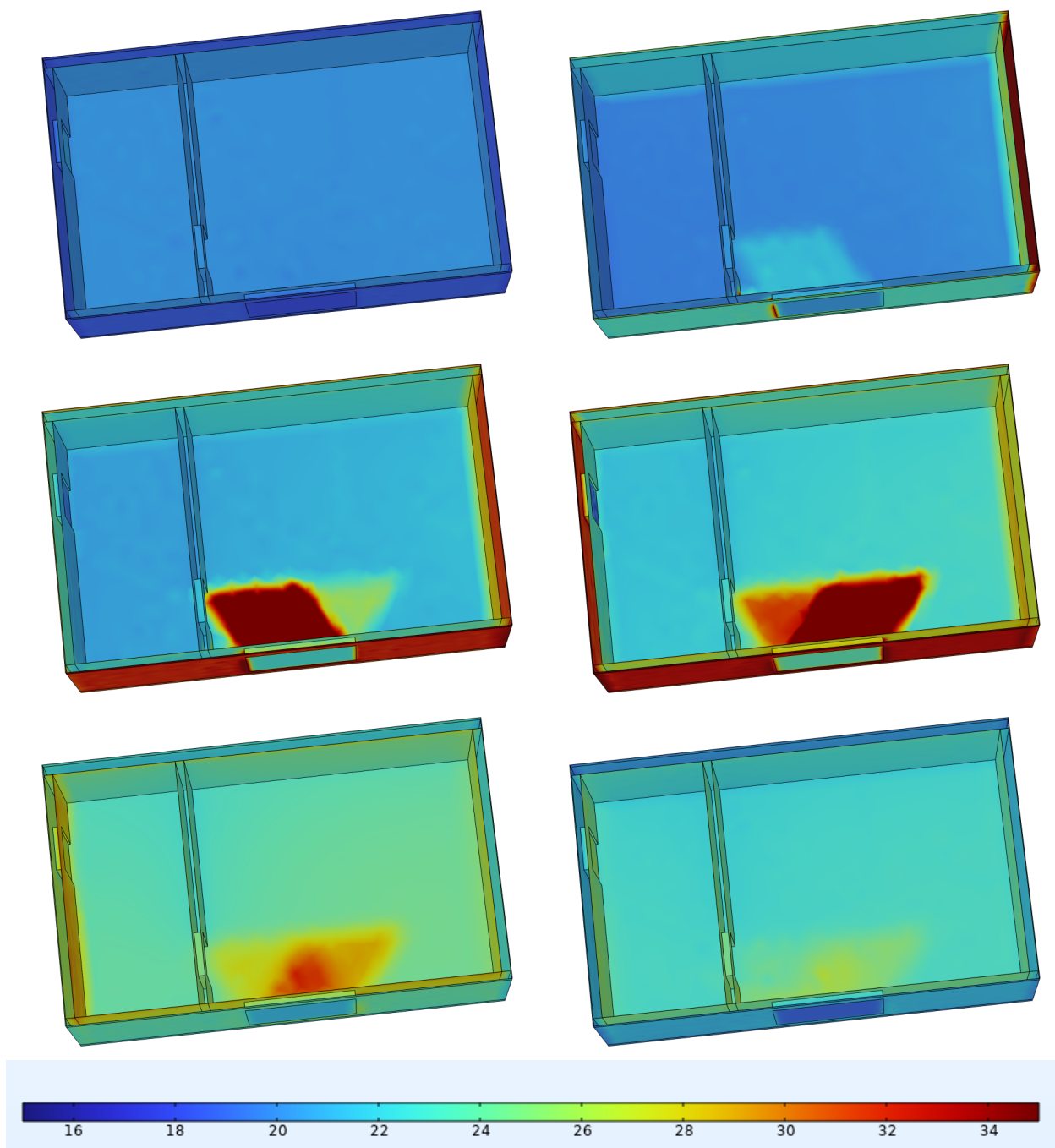


Рис. 11

## 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. 12).

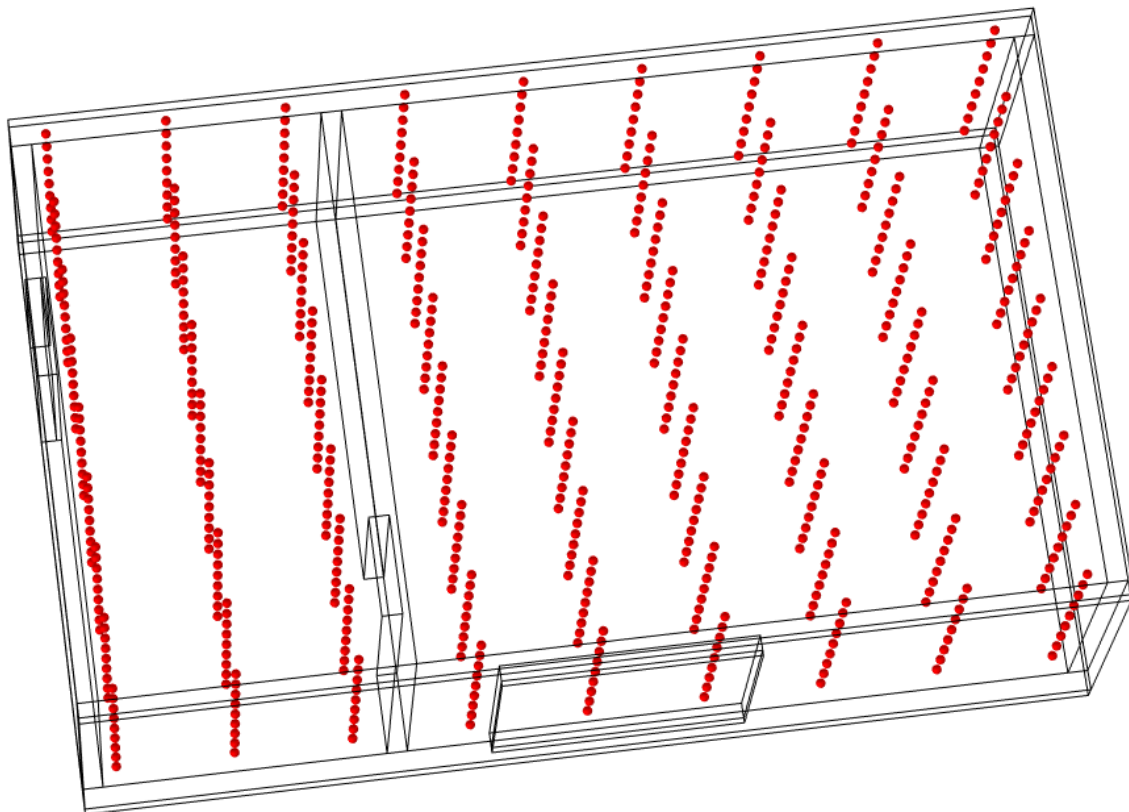


Рис. 12

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. 13). 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.



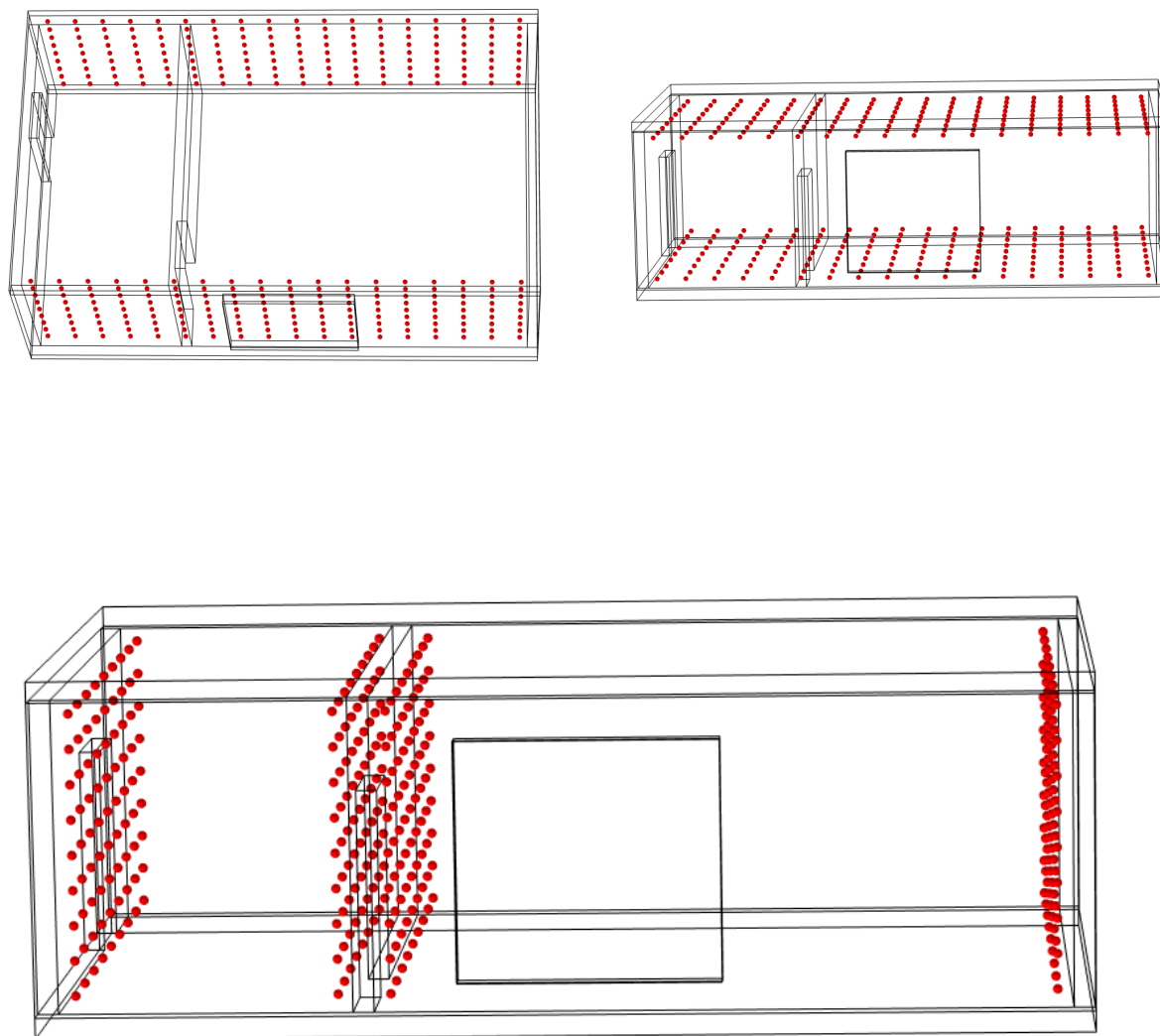


Рис. 13

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. 14) 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.

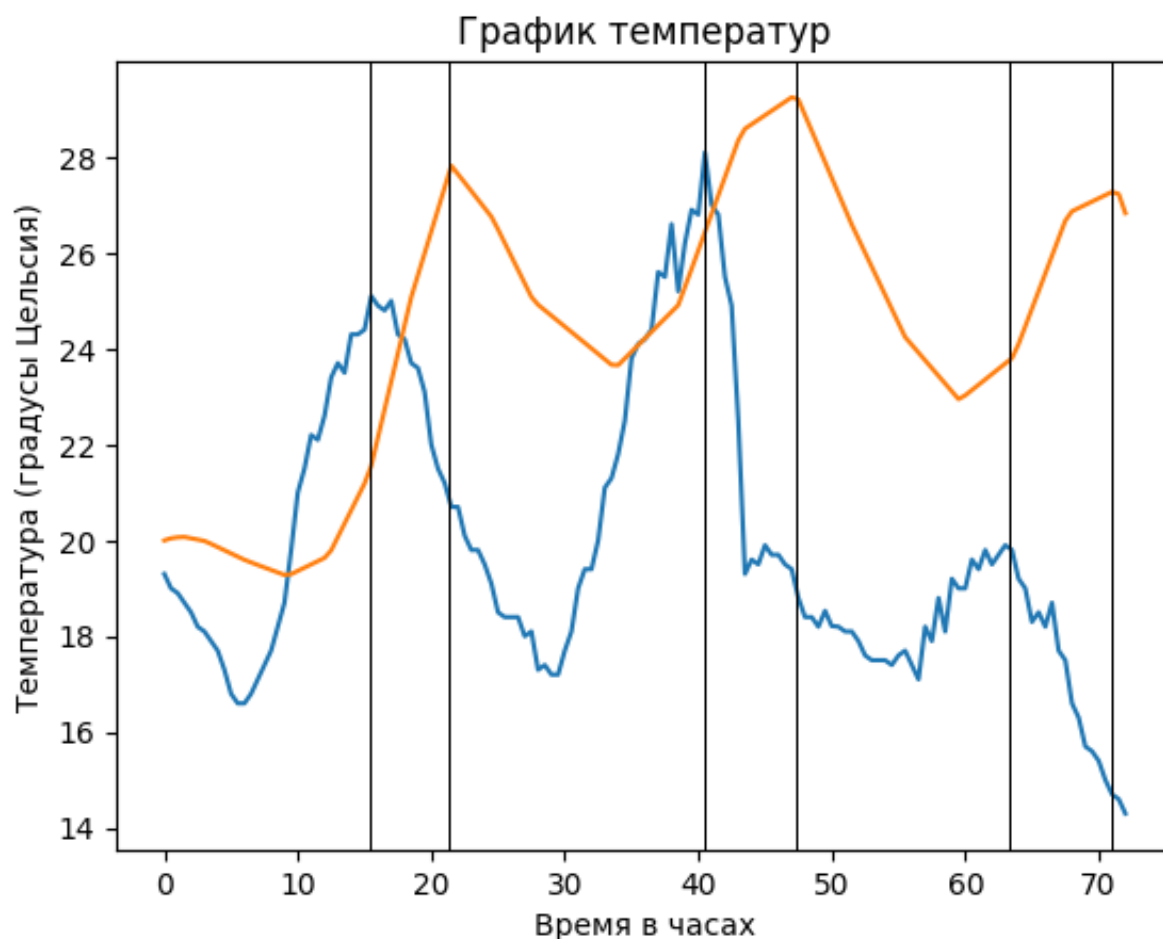
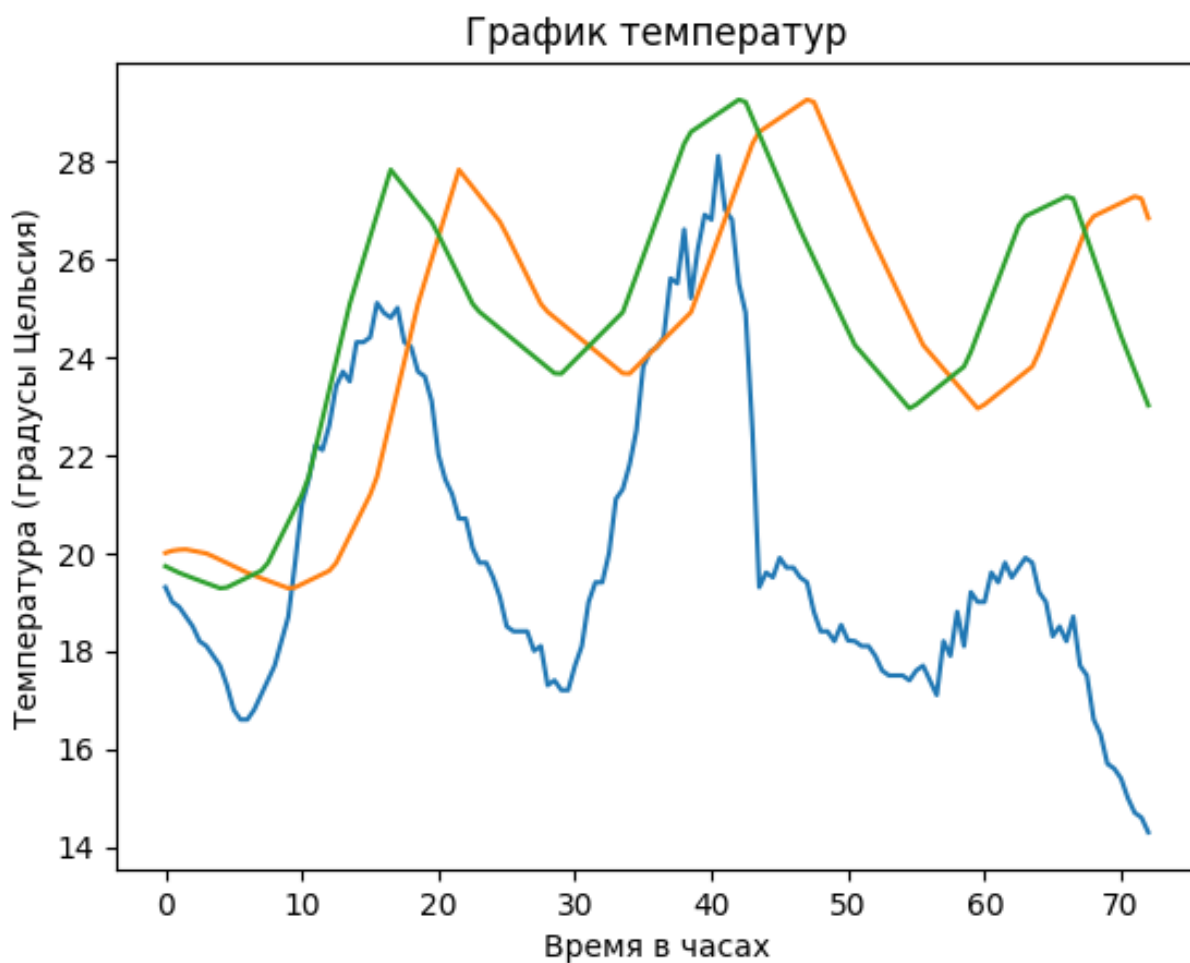


Рис. 14

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. 15) 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. 15**

## 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. 16) показан результат работы алгоритма.



Рис. 16

## **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.