

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 Аналитическая часть	6
1.1 Постановка задачи	6
1.2 Формализация данных	8
1.3 Выбор модели данных	9
1.3.1 Реляционная модель	9
1.3.2 Документо-ориентированная модель	10
1.3.3 База данных временных рядов	11
1.3.4 Объектно-ориентированная модель	11
1.3.5 Графовые базы данных	11
1.4 Выбор системы управления базами данных	12
1.5 Вывод	13
2 Конструкторская часть	14
2.1 Проектирование базы данных	14
2.1.1 Таблицы базы данных	14
2.1.2 Хранимые процедуры и функции	17
2.1.3 Триггеры базы данных	18
2.2 Вывод	19
3 Технологическая часть	20
3.1 Анализ систем управления базами данных	20
3.1.1 Выбор СУБД для решения задачи	20
3.2 Выбор средств реализации	21
3.3 Детали реализации	22
3.3.1 Создание таблиц	22
3.3.2 Хранимые процедуры и функции	24
3.3.3 Триггеры базы данных	27
3.4 Пример работы программы	27
3.5 Вывод	30

4 Исследовательская часть	31
4.1 Технические характеристики	31
4.2 Замеры времени выполнения деформации в зависимости от количества сечений	31
4.3 Замеры времени выполнения деформации в зависимости от количества точек	32
4.4 Вывод	33
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	34
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	35

ВВЕДЕНИЕ

Тонкостенные трубчатые поверхности используются при моделировании объектов в системах автоматизированного проектирования, медицинской визуализации и промышленном дизайне. В процессе их построения возникает задача плавной интерполяции между заданными сечениями после деформации трубы, обеспечивающей непрерывность и гладкость полученной поверхности [1].

Целью работы является разработка базы данных для хранения и управления историей изменения поперечных сечений трубы после деформации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1 определить информационную модель предметной области и выделить ключевые сущности;
- 2 спроектировать структуру базы данных и установить ограничения целостности данных;
- 3 выбрать СУБД для хранения геометрических данных трубы;
- 4 разработать интерфейс доступа к базе данных;
- 5 исследовать зависимость времени выполнения операции деформации от количества сечений;
- 6 исследовать зависимость времени выполнения операции деформации от количества точек в сечении.

1 Аналитическая часть

В данном разделе проводится формализация задачи хранения истории деформаций трубчатых поверхностей и формализация данных, рассматриваются систем управления базами данных и обосновывается выбор решения для поставленной задачи.

1.1 Постановка задачи

Дана трубчатая поверхность T , представляющая собой упорядоченное множество сечений $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$, соединенных сегментами Γ . Каждое сечение S_i определяется набором точек $P_i = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in_i}\}$ в трехмерном пространстве, где $p_{ij} = (x_{ij}, y_{ij}, z_i)$. Сегмент Γ_k между сечениями S_k и S_{k+1} содержит множество ребер $E_k = \{e_{k1}, e_{k2}, \dots, e_{kl}\}$, соединяющих точки соседних сечений. Конечные точки ребра e_{kj} не обязательно являются вершинами сечений, а могут лежать на ребрах сечений.

Трубка характеризуется кривой центров $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$, где центр i -го сечения определяется как:

$$c_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} p_{ij} \quad (1)$$

Требуется реализовать процесс деформации трубы с сохранением истории изменений геометрии. Далее рассмотрены этапы процесса деформации.

1. Выбор точки деформации

На кривой центров C выбирается точка деформации p_{def} с координатами $(x_{def}, y_{def}, z_{def})$.

2. Определение целевой точки

На плоскости $z = z_{def}$ выбирается целевая точка p_{target} с координатами $(x_{target}, y_{target}, z_{def})$, определяющая направление и величину деформации. Вектор смещения вычисляется как:

$$\vec{d} = p_{target} - p_{def} = (x_{target} - x_{def}, y_{target} - y_{def}, 0) \quad (2)$$

3. Применение локальной деформации с затуханием

К кривой центров применяется локальная деформация с функцией

затухания. Для каждого центра c_i вычисляется евклидово расстояние до точки деформации:

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_{def})^2 + (y_i - y_{def})^2 + (z_i - z_{def})^2} \quad (3)$$

Вес влияния деформации определяется функцией затухания:

$$w_i(r) = e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

где σ – радиус влияния деформации.

Новое положение центра i -го сечения вычисляется по формуле:

$$c'_i = c_i + w_i(r_i) \cdot \alpha \cdot \vec{d} \quad (5)$$

где α – коэффициент силы деформации, $0 \leq \alpha \leq 1$.

Деформированная кривая центров $C' = \{c'_1, c'_2, \dots, c'_m\}$ образует новую осевую линию трубы.

4. Построение новых сечений

Для каждого деформированного центра c'_i необходимо построить новое сечение, перпендикулярное касательной к кривой центров в данной точке.

Вектор касательной к кривой в точке i определяется методом центральных разностей:

$$\vec{\tau}_i = \begin{cases} \frac{c'_{i+1} - c'_i}{\|c'_{i+1} - c'_i\|}, & i = 1 \\ \frac{c'_i - c'_{i-1}}{\|c'_i - c'_{i-1}\|}, & i = m \\ \frac{c'_{i+1} - c'_{i-1}}{\|c'_{i+1} - c'_{i-1}\|}, & 1 < i < m \end{cases} \quad (6)$$

Плоскость нового сечения определяется уравнением:

$$\vec{\tau}_i \cdot (P - c'_i) = 0 \quad (7)$$

где $P = (x, y, z)$ – произвольная точка плоскости.

Точки исходного сечения S_i проецируются на новую плоскость с сохранением их относительного положения относительно центра.

1.2 Формализация данных

Исходя из сформулированных требований, база данных должна содержать информацию о таких объектах, как точка, сечение, ребро, сегмент и трубка.

1. Точка

Точка содержит сведения о координатах в трехмерном пространстве (x, y, z) и порядковом номере внутри сечения.

2. Сечение

Сечение состоит из упорядоченного списка точек. Благодаря его упорядоченности, появляется возможность не хранить данные о ребрах сечения, так как ребра образуются посредством соединения точек с соседними индексами. Сечение содержит данные о координатах центра сечения $(x_{cen}, y_{cen}, z_{cen})$ и порядковом номере сечения в трубке.

3. Ребро

Ребро соединяет две точки соседних сечений и содержит сведения о длине ребра и порядковом номере в сегменте.

4. Сегмент

Сегмент состоит из упорядоченного списка ребер, соединяющих соседние сечения и содержит сведения о порядковом номере в трубке.

5. Трубка

Трубка объединяет сечения и сегменты и хранит общую длину трубы.

При применении операции деформации к трубчатой поверхности изменяются координаты точек сечений, что приводит к необходимости сохранения новой версии геометрии. Для отслеживания истории таких изменений каждый геометрический объект также сохраняет номер версии и ссылки на предыдущую и следующую версии объекта.

На рисунке  представлена ER-диаграмма сущностей.

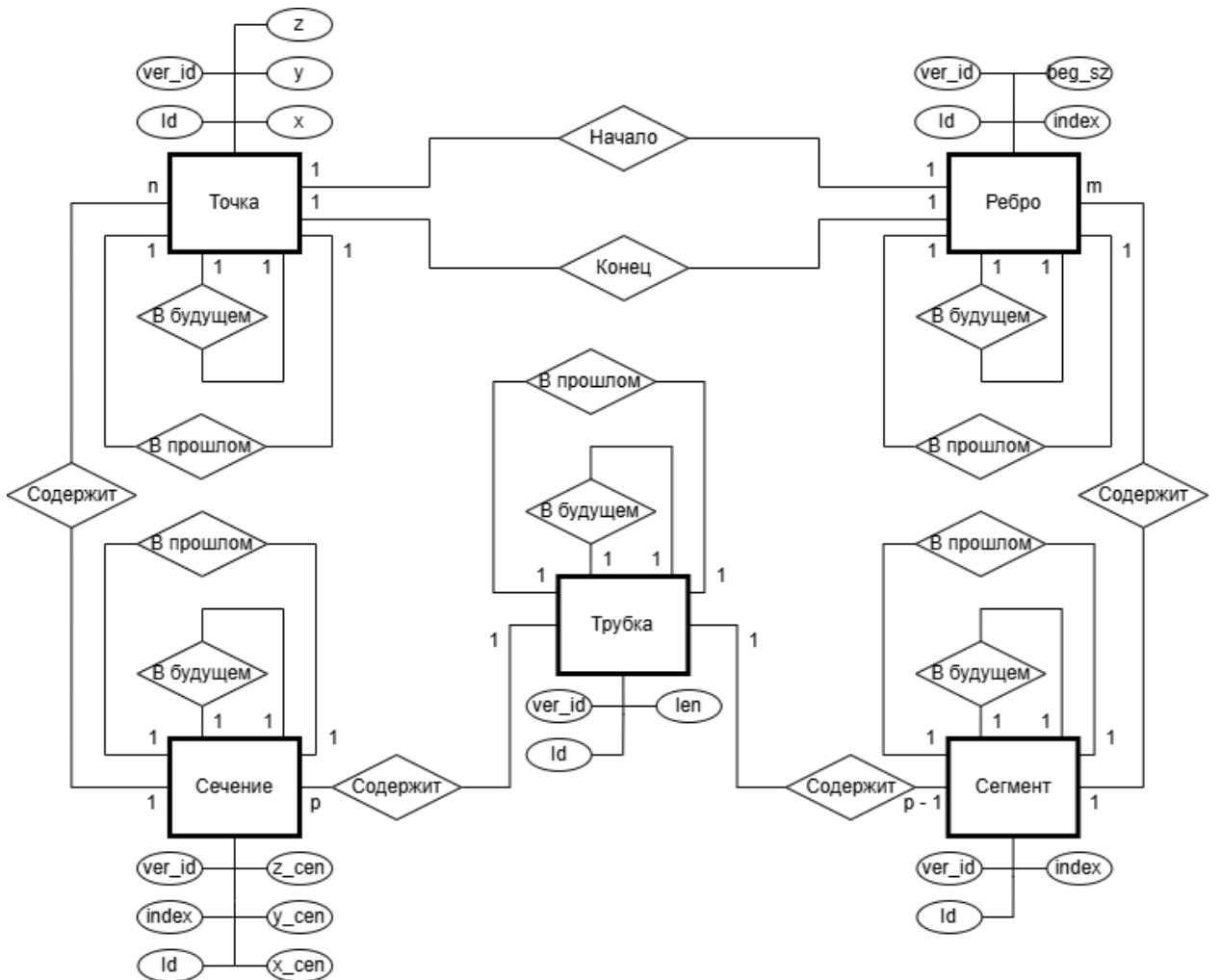


Рисунок 1 – ER-диаграмма сущностей

1.3 Выбор модели данных

Модель данных — это совокупность абстракций и методов, с помощью которых мы стремимся имитировать понятия реального мира [10].

1.3.1 Реляционная модель

Реляционные СУБД (PostgreSQL, MySQL, Oracle) основаны на реляционной модели данных, где информация организуется в таблицы, состоящие из строк и столбцов. Каждая таблица имеет определенную структуру, а связи между таблицами устанавливаются с помощью внешних ключей [11].

Реляционные СУБД обеспечивают:

- строгую типизацию данных с контролем на уровне схемы;

- поддержку принципов ACID (атомарность, согласованность, изолированность, долговечность);
- механизмы обеспечения ссылочной целостности через внешние ключи;
- возможность определения сложных ограничений целостности (CHECK, UNIQUE);
- транзакционную модель с поддержкой уровней изоляции [11].

По способу обработки запросов реляционные СУБД делятся на:

- OLTP (строковые) — подходят для систем с частыми изменениями данных;
- OLAP (колоночные) — подходят для частых запросов с объединениями таблиц [11].

1.3.2 Документо-ориентированная модель

Документо-ориентированные СУБД (MongoDB, CouchDB) хранят данные в виде документов, обычно в формате JSON или BSON. Каждый документ содержит пары ключ-значение и может иметьложенную структуру [12].

Документо-ориентированная модель обеспечивает, что:

- документы в одной коллекции могут иметь различную структуру, что позволяет хранить разнородные данные без необходимости изменения схемы базы данных;
- иерархические данные могут быть естественным образом представлены внутри одного документа, что упрощает извлечение связанной информации без операций объединения таблиц;
- высокую скорость чтения относительно других видов СУБД за счет минимизации количества обращений к базе данных;
- значения полей не имеют жесткой привязки к типам данных, что может привести к ошибкам на уровне приложения.

1.3.3 База данных временных рядов

БД временных рядов (InfluxDB, TimescaleDB, Prometheus) специализированы для хранения последовательных событий или измерений с временными метками [10].

Базы данных временных рядов обеспечивают, что:

- данные организованы по времени создания;
- устаревшие данные автоматически удаляются на основе правил времени жизни (TTL).

1.3.4 Объектно-ориентированная модель

Объектная модель БД (db4o, ObjectDB, Versant) строится на принципах объектно-ориентированного программирования, где данные хранятся в виде объектов с методами [13].

Объектно-ориентированные СУБД обеспечивают:

- естественное отображение объектов — объекты приложения сохраняются непосредственно в базу данных без необходимости преобразования в другую структуру;
- инкапсуляцию — данные и методы объединены в единую сущность, что обеспечивает согласованность бизнес-логики;
- наследование и полиморфизм;
- навигацию по ссылкам — связи между объектами реализуются через прямые ссылки.

1.3.5 Графовые базы данных

Графовые СУБД (Neo4j, OrientDB, ArangoDB) специализируются на хранении связей между объектами. Данные представляются в виде узлов (вершин) и связей между ними (ребер), что обеспечивает естественное представление сетевых структур [14].

Графовые базы данных обеспечивают:

- переход между связанными узлами выполняется за константное время независимо от размера графа;
- узлы и ребра могут иметь произвольные свойства, а структура графа может динамически изменяться без модификации схемы;
- Отсутствие JOIN операций.

1.4 Выбор системы управления базами данных

Для хранения истории деформаций трубчатых поверхностей база данных должна обладать следующими свойствами:

- строгая типизация данных — наличие встроенных механизмов контроля типов данных на уровне СУБД;
- ссылочная целостность — поддержка внешних ключей и автоматический контроль связей между таблицами;
- поддержка ACID — гарантии атомарности, согласованности, изолированности и долговечности транзакций;
- ограничения целостности — возможность определения ограничений на уровне схемы;
- каскадные операции — автоматическое распространение операций удаления и обновления на связанные записи.

Таблица 1 – Сравнение моделей данных

Критерий	Реляц.	Докум.	Врем. р.	Объект.	Граф.
Строгая типизация	+	—	+	+	—
Ссылочная целостность	+	—	—	+	—
Поддержка ACID	+	—	—	+	—
Ограничения целостности	+	—	—	+	—
Каскадные операции	+	—	—	—	—

На основании проведенного сравнения для решения поставленной задачи необходимо выбрать реляционную модель СУБД.

1.5 Вывод

В данном разделе была проведена формализация задачи хранения истории деформаций трубчатых поверхностей и формализация данных, были рассмотрены системы управления базами данных и был обоснован выбор решения для поставленной задачи.

2 Конструкторская часть

В данном разделе проектируется базы данных для хранения истории деформаций трубчатых поверхностей: описывается структура таблиц с типами данных и ограничениями, рассматриваются хранимые процедуры и триггеры.

2.1 Проектирование базы данных

2.1.1 Таблицы базы данных

Реализуемая база данных включает пять таблиц, соответствующих основным сущностям предметной области: трубка, сечение, точка, сегмент и ребро. Диаграмма базы данных представлена на рисунке 2.

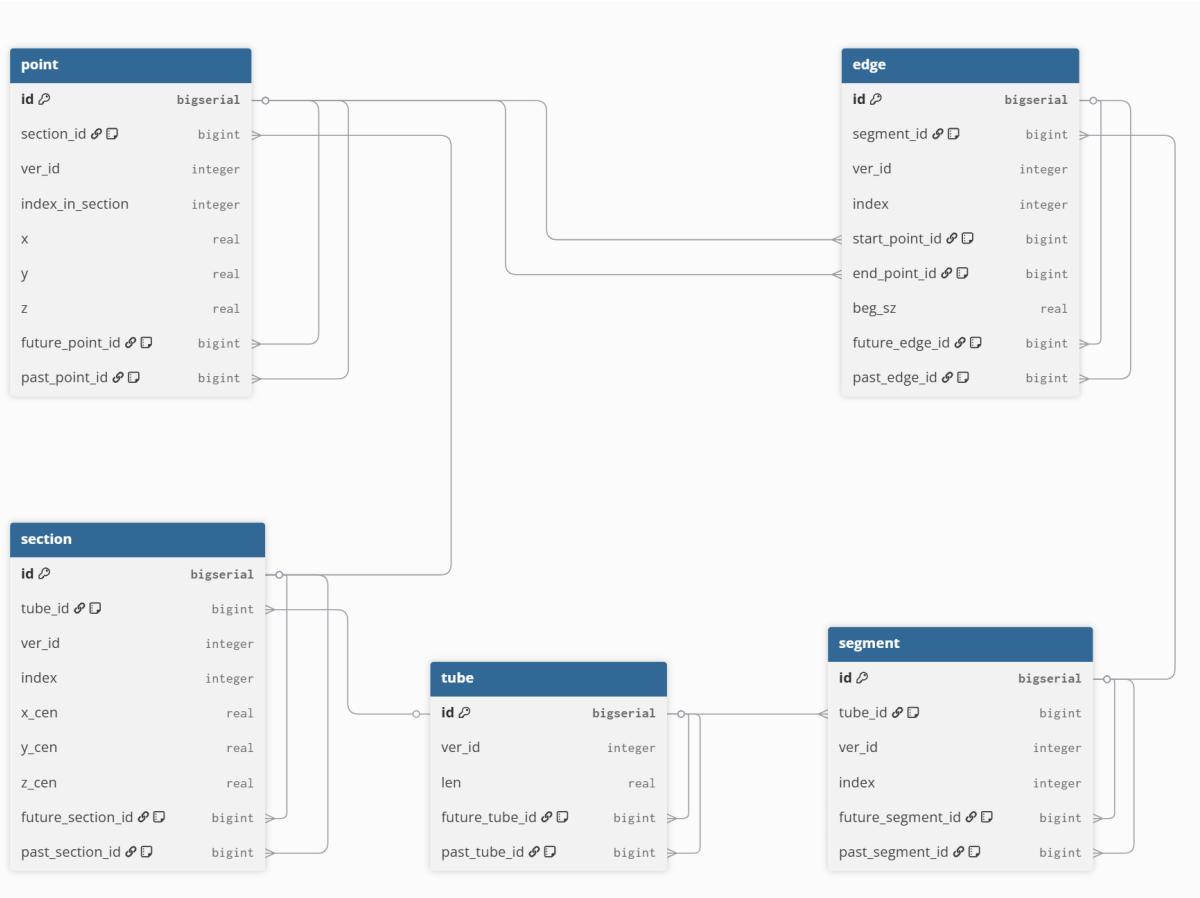


Рисунок 2 – Диаграмма базы данных

1 Таблица **point** содержит информацию о точках сечений и включает следующие поля:

- **id**: bigserial — первичный ключ;

- `section_id`: bigint — ссылка на сечение, внешний ключ на таблицу `section` с каскадным удалением, допускает NULL;
- `ver_id`: integer — номер версии точки;
- `index_in_section`: integer — порядковый номер точки в сечении, допускает NULL;
- `x`: real — координата X точки;
- `y`: real — координата Y точки;
- `z`: real — координата Z точки;
- `future_point_id`: bigint — ссылка на следующую версию точки, внешний ключ на таблицу `point`, допускает NULL;
- `past_point_id`: bigint — ссылка на предыдущую версию точки, внешний ключ на таблицу `point`, допускает NULL.

2 Таблица `section` содержит информацию о сечениях трубы и включает следующие поля:

- `id`: bigserial — первичный ключ;
- `tube_id`: bigint — ссылка на трубу, внешний ключ на таблицу `tube` с каскадным удалением;
- `ver_id`: integer — номер версии сечения;
- `index`: integer — порядковый номер сечения в трубе;
- `x_cen`: real — координата X центра сечения;
- `y_cen`: real — координата Y центра сечения;
- `z_cen`: real — координата Z центра сечения;
- `future_section_id`: bigint — ссылка на следующую версию сечения, внешний ключ на таблицу `section`, допускает NULL;
- `past_section_id`: bigint — ссылка на предыдущую версию сечения, внешний ключ на таблицу `section`, допускает NULL.

3 Таблица `edge` содержит информацию о ребрах, соединяющих точки соседних сечений, и включает следующие поля:

- `id`: bigserial — первичный ключ;

- `segment_id`: bigint — ссылка на сегмент, внешний ключ на таблицу `segment` с каскадным удалением;
- `ver_id`: integer — номер версии ребра;
- `index`: integer — порядковый номер ребра в сегменте;
- `start_point_id`: bigint — ссылка на начальную точку ребра, внешний ключ на таблицу `point` с каскадным удалением;
- `end_point_id`: bigint — ссылка на конечную точку ребра, внешний ключ на таблицу `point` с каскадным удалением;
- `beg_sz`: real — длина ребра;
- `future_edge_id`: bigint — ссылка на следующую версию ребра, внешний ключ на таблицу `edge`, допускает NULL;
- `past_edge_id`: bigint — ссылка на предыдущую версию ребра, внешний ключ на таблицу `edge`, допускает NULL.

4 Таблица `segment` содержит информацию о сегментах, соединяющих соседние сечения, и включает следующие поля:

- `id`: bigserial — первичный ключ;
- `tube_id`: bigint — ссылка на трубку, внешний ключ на таблицу `tube` с каскадным удалением;
- `ver_id`: integer — номер версии сегмента;
- `index`: integer — порядковый номер сегмента в трубке;
- `future_segment_id`: bigint — ссылка на следующую версию сегмента, внешний ключ на таблицу `segment`, допускает NULL;
- `past_segment_id`: bigint — ссылка на предыдущую версию сегмента, внешний ключ на таблицу `segment`, допускает NULL.

5 Таблица `tube` содержит информацию о трубчатых поверхностях и включает следующие поля:

- `id`: bigserial — первичный ключ;
- `ver_id`: integer — номер версии трубы;
- `len`: real — общая длина трубы;

- `future_tube_id`: bigint — ссылка на следующую версию трубы, внешний ключ на таблицу `tube`, допускает NULL;
- `past_tube_id`: bigint — ссылка на предыдущую версию трубы, внешний ключ на таблицу `tube`, допускает NULL.

2.1.2 Хранимые процедуры и функции

Функция `calculate_tube_length_on_segment()` вычисляет длину трубы на основе максимальных значений `beg_sz` ребер в каждом сегменте (рисунок 3).



Рисунок 3 – Алгоритм функции `calculate_tube_length_on_segment`

Функция `calculate_tube_length_on_edge()` выполняет аналогичные вычисления при изменении ребер (рисунок 4).

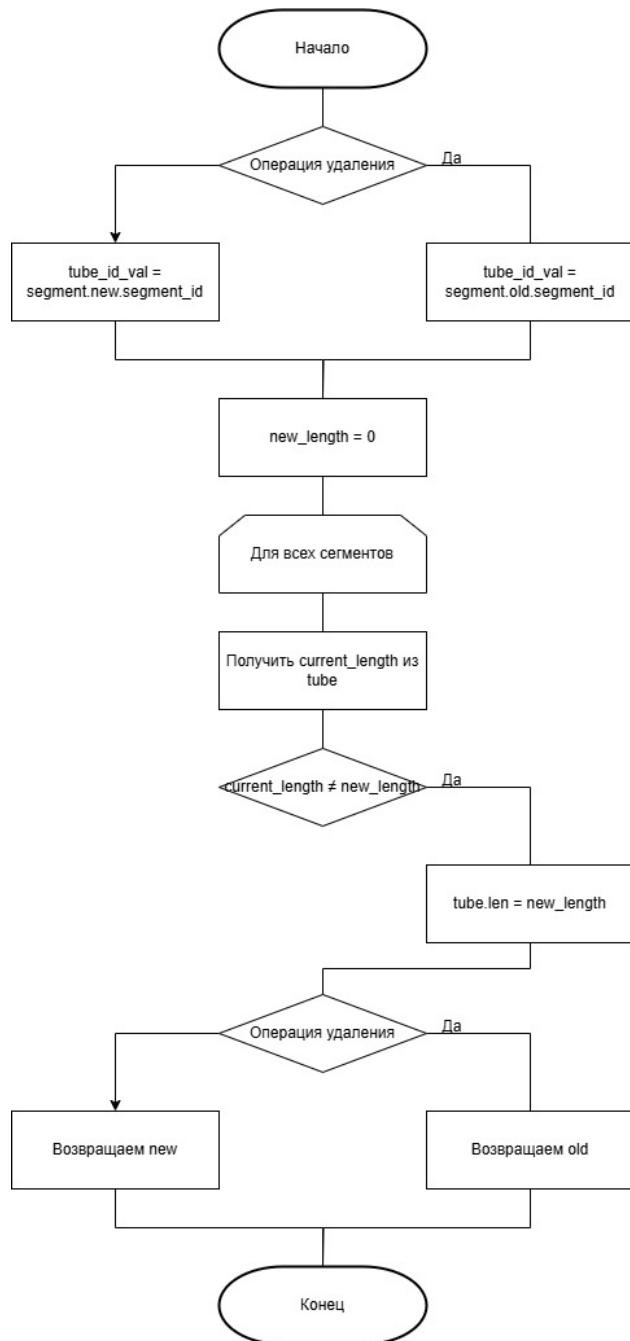


Рисунок 4 – Алгоритм функции calculate_tube_length_on_edge

2.1.3 Триггеры базы данных

Триггер update_tube_length_on_segment срабатывает после операций INSERT, UPDATE или DELETE на таблице `segment` и вызывает функцию `calculate_tube_length_on_segment()` для автоматического пересчёта длины трубы при изменении состава сегментов (рисунок 5).

Триггер update_tube_length_on_edge активируется после операций INSERT, UPDATE поля `beg_sz` или DELETE на таблице `edge`, вызывая функцию `calculate_tube_length_on_edge()` для поддержания актуаль-

ности длины трубы при модификации ребер (рисунок 5).

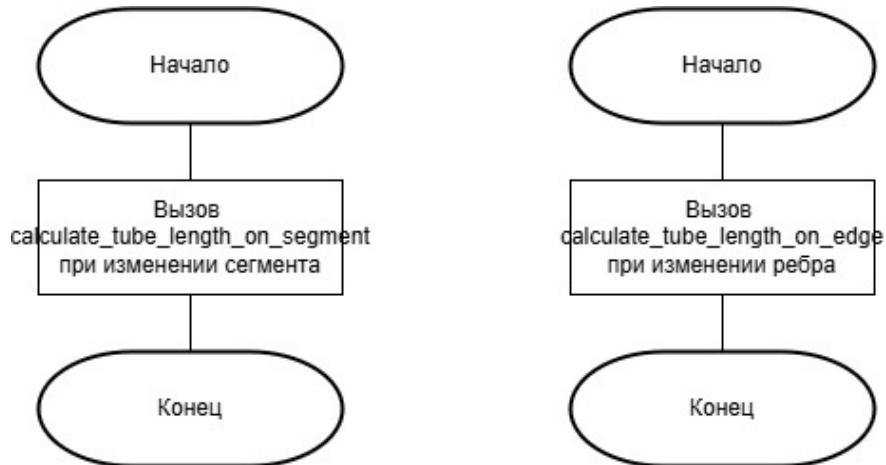


Рисунок 5 – Алгоритм триггера update_tube_length_on_segment (слева)
и триггера update_tube_length_on_edge (справа)

2.2 Вывод

В данном разделе была спроектирована база данных для хранения истории деформаций трубчатых поверхностей: описаны пять таблиц со спецификацией типов данных и ограничений целостности, рассмотрены основные хранимые процедуры, функции и триггеры.

3 Технологическая часть

В данном разделе проводится анализ систем управления базами данных и выбирается СУБД для решения поставленной задачи, обосновываются средства реализации приложения, приводятся детали реализации базы данных и представляется пример работы программы.

3.1 Анализ систем управления базами данных

Для хранения истории деформаций трубчатых поверхностей была выбрана реляционная база данных. Были рассмотрены СУБД для работы с ними [1]:

- PostgreSQL — объектно-реляционная СУБД с открытым исходным кодом, соответствующая стандартам SQL [1]. Обеспечивает строгую типизацию данных, поддержку внешних ключей с каскадными операциями, сложных ограничений целостности (CHECK, UNIQUE), триггеров и хранимых процедур. Поддерживает механизм MVCC (многоверсионное управление конкурентным доступом).
- MySQL — реляционная СУБД, разрабатываемая корпорацией Oracle [8]. Имеет ограниченную поддержку механизмов ограничения целостности. Не поддерживает внешние ключи и транзакции. Не соответствует стандартам SQL [8].
- Oracle Database — коммерческая объектно-реляционная СУБД, обеспечивающая безопасность и масштабируемость [7]. Полная функциональность доступна только в платных версиях.

3.1.1 Выбор СУБД для решения задачи

Для выбора оптимальной СУБД были определены критерии сравнения, основанные на требованиях поставленной задачи:

- К1 — полная поддержка ACID-транзакций для обеспечения согласованности данных при сохранении версий;
- К2 — поддержка внешних ключей с каскадными операциями для автоматического поддержания связей между таблицами;

- К3 — поддержка ограничений целостности (CHECK, UNIQUE) для валидации геометрических данных;
- К4 — бесплатное использование для академических и коммерческих целей.

Результаты сравнения СУБД по выбранным критериям приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение СУБД по выбранным критериям

СУБД	K1	K2	K3	K4
PostgreSQL	+	+	+	+
MySQL	—	—	—	+
Oracle Database	+	+	+	—

По результатам сравнения для решения поставленной задачи выбрана СУБД PostgreSQL.

3.2 Выбор средств реализации

Для разработки программного обеспечения взаимодействия с базой данных в качестве основного языка программирования был выбран C++ [2]. Обоснование выбора:

- объектно-ориентированный подход позволяет моделировать иерархию объектов (трубка, сечение, точка);
- наличие библиотек для работы с PostgreSQL;
- поддержка библиотеки шаблонов для работы с коллекциями данных;
- возможность низкоуровневой оптимизации памяти и вычислений.

Для графического интерфейса используется фреймворк Qt [5], обеспечивающий:

- кроссплатформенность разработки;
- интеграцию с OpenGL [9] для визуализации трехмерных объектов;
- набор виджетов для создания пользовательского интерфейса.

Для замеров времени использовался класс `QElapsedTimer` из библиотеки QT [5]. Для визуализации трехмерных графиков был использован Python [3], а именно библиотека `matplotlib` [4].

Для взаимодействия с базой данных PostgreSQL выбрана библиотека Qt SQL [6] — библиотека, предоставляющая:

- интерфейс для работы с соединениями и транзакциями;
- параметризованные запросы для защиты от SQL-инъекций;
- интеграцию с фреймворком Qt;
- поддержку подготовленных выражений для повышения производительности.

3.3 Детали реализации

3.3.1 Создание таблиц

Создание таблицы `point` для хранения точек сечений представлено на листинге 1.

```
1 create table point (
2     id bigserial primary key,
3     section_id bigint references section(id) on delete cascade,
4     ver_id integer not null,
5     index_in_section integer,
6     x real not null,
7     y real not null,
8     z real not null,
9     future_point_id bigint references point(id) on delete set
10    null,
11    past_point_id bigint references point(id) on delete set
12    null,
13    constraint unique_point_in_section
14        unique (section_id, index_in_section)
15 );
```

Листинг 1 – Создание таблицы `point`

Создание таблицы `section` для хранения сечений трубки представлено на листинге 2.

```

1 create table section (
2     id bigserial primary key,
3     tube_id bigint not null references tube(id) on delete
4         cascade,
5     ver_id integer not null,
6     index integer not null,
7     x_cen real not null,
8     y_cen real not null,
9     z_cen real not null,
10    future_section_id bigint references section(id) on delete
11        set null,
12    past_section_id bigint references section(id) on delete set
13        null,
14    constraint unique_section_in_tube unique (tube_id, index)
15 );

```

Листинг 2 – Создание таблицы section

Создание таблицы edge для хранения ребер между точками представлено на листинге 3.

```

1 create table edge (
2     id bigserial primary key,
3     segment_id bigint not null references segment(id)
4         on delete cascade,
5     ver_id integer not null,
6     index integer not null,
7     start_point_id bigint not null references point(id)
8         on delete cascade,
9     end_point_id bigint not null references point(id)
10        on delete cascade,
11     beg_sz real not null,
12     future_edge_id bigint references edge(id) on delete set
13         null,
14     past_edge_id bigint references edge(id) on delete set null,
15     constraint unique_edge_in_segment unique (segment_id, index
16         ),
17     constraint different_points
18         check (start_point_id != end_point_id)
19 );

```

Листинг 3 – Создание таблицы edge

Создание таблицы `segment` для хранения сегментов между сечениями представлено на листинге 4.

```
1 create table segment (
2     id bigserial primary key,
3     tube_id bigint not null references tube(id) on delete
4         cascade,
5     ver_id integer not null,
6     index integer not null,
7     future_segment_id bigint references segment(id) on delete
8         set null,
9     past_segment_id bigint references segment(id) on delete set
10        null,
11     constraint unique_segment_in_tube unique (tube_id, index)
12 );
```

Листинг 4 – Создание таблицы `segment`

Создание таблицы `tube` для хранения информации о трубах представлено на листинге 5.

```
1 create table tube (
2     id bigserial primary key,
3     ver_id integer not null,
4     len real not null,
5     future_tube_id bigint references tube(id) on delete set
6         null,
7     past_tube_id bigint references tube(id) on delete set null
8 );
```

Листинг 5 – Создание таблицы `tube`

3.3.2 Хранимые процедуры и функции

Создание функции для пересчета длины трубы при изменениях в `segment` 6.

```
1 create or replace function calculate_tube_length_on_segment()
2 returns trigger as $$
3 declare
4     tube_id_val bigint;
5     new_length real;
```

```

6    current_length real;
7 begin
8     if tg_op = 'DELETE' then
9         tube_id_val := old.tube_id;
10    else
11        tube_id_val := new.tube_id;
12    end if;
13
14    select coalesce(sum(max_edge_length), 0) into new_length
15    from (
16        select s.id, max(e.beg_sz) as max_edge_length
17        from segment s
18        left join edge e on e.segment_id = s.id
19        where s.tube_id = tube_id_val
20        group by s.id
21    ) as segment_lengths;
22
23    select len into current_length
24    from tube
25    where id = tube_id_val;
26
27    if current_length is distinct from new_length then
28        update tube
29        set len = new_length
30        where id = tube_id_val;
31    end if;
32
33    if tg_op = 'DELETE' then
34        return old;
35    else
36        return new;
37    end if;
38 end;
39 $$ language plpgsql;

```

Листинг 6 – Функция для пересчета длины трубы при изменениях в segment

Создание функции для пересчета длины трубы при изменениях в edge [7]

```
1 create or replace function calculate_tube_length_on_edge()
```

```

2 returns trigger as $$ 
3 declare
4     tube_id_val bigint;
5     new_length real;
6     current_length real;
7 begin
8     if tg_op = 'DELETE' then
9         select tube_id into tube_id_val
10        from segment
11       where id = old.segment_id;
12    else
13        select tube_id into tube_id_val
14        from segment
15       where id = new.segment_id;
16    end if;
17
18    select coalesce(sum(max_edge_length), 0) into new_length
19    from (
20        select s.id, max(e.beg_sz) as max_edge_length
21        from segment s
22       left join edge e on e.segment_id = s.id
23      where s.tube_id = tube_id_val
24      group by s.id
25    ) as segment_lengths;
26
27    select len into current_length
28    from tube
29   where id = tube_id_val;
30
31    if current_length is distinct from new_length then
32        update tube
33        set len = new_length
34       where id = tube_id_val;
35    end if;
36
37    if tg_op = 'DELETE' then
38        return old;
39    else
40        return new;
41    end if;
42 end;
43 $$ language plpgsql;

```

Листинг 7 – Функция для пересчета длины трубы при изменениях в edge

3.3.3 Триггеры базы данных

Создание триггера для пересчета длины трубы при изменениях в segment [8].

```
1 create trigger update_tube_length_on_segment
2 after insert or update or delete on segment
3 for each row
4 execute function calculate_tube_length_on_segment();
```

Листинг 8 – Триггер для пересчета длины трубы при изменениях в segment

Создание триггера для пересчета длины трубы при изменениях в edge [9].

```
1 create trigger update_tube_length_on_edge
2 after insert or update of beg_sz or delete on edge
3 for each row
4 execute function calculate_tube_length_on_edge();
```

Листинг 9 – Триггер для пересчета длины трубы при изменениях в edge

3.4 Пример работы программы

Интерфейс программы включает следующие основные элементы:

- главное окно с трехмерным просмотром трубы;
- панель управления сечениями;
- панель настройки параметров деформации;
- панель истории версий с навигацией;
- диалоговые окна для сохранения и загрузки данных.

Разработанное программное обеспечение предоставляет следующий функционал:

1 Создание и сохранение трубы:

- построение трубчатой поверхности на основе заданных сечений;
- сохранение геометрии трубы в базу данных с присвоением версии;
- автоматическое сохранение всех сечений, точек, сегментов и ребер.

2 Применение деформации:

- выбор точки деформации на кривой центров трубы (рисунок 6);

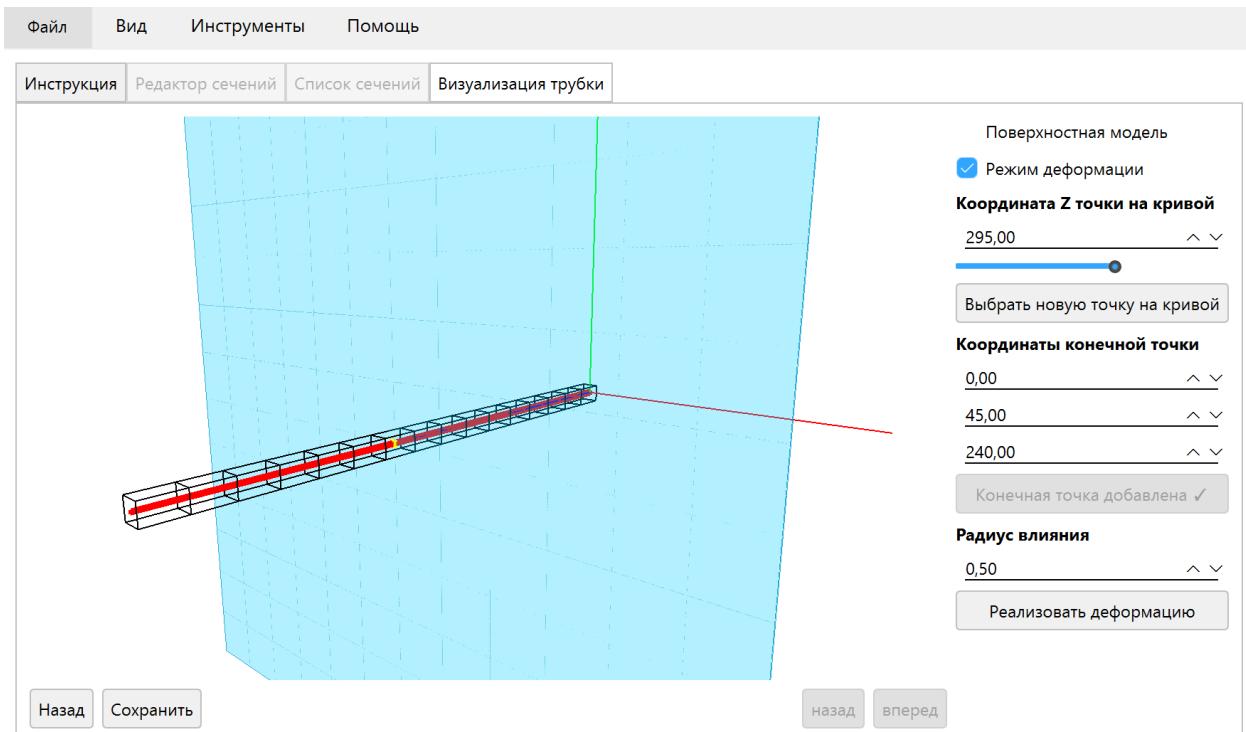


Рисунок 6 – Выбор точки деформации

- указание целевой позиции для перемещения выбранной точки;
- настройка радиуса влияния и функции затухания деформации;
- визуализация деформированной кривой центров в режиме предварительного просмотра (рисунок 7);

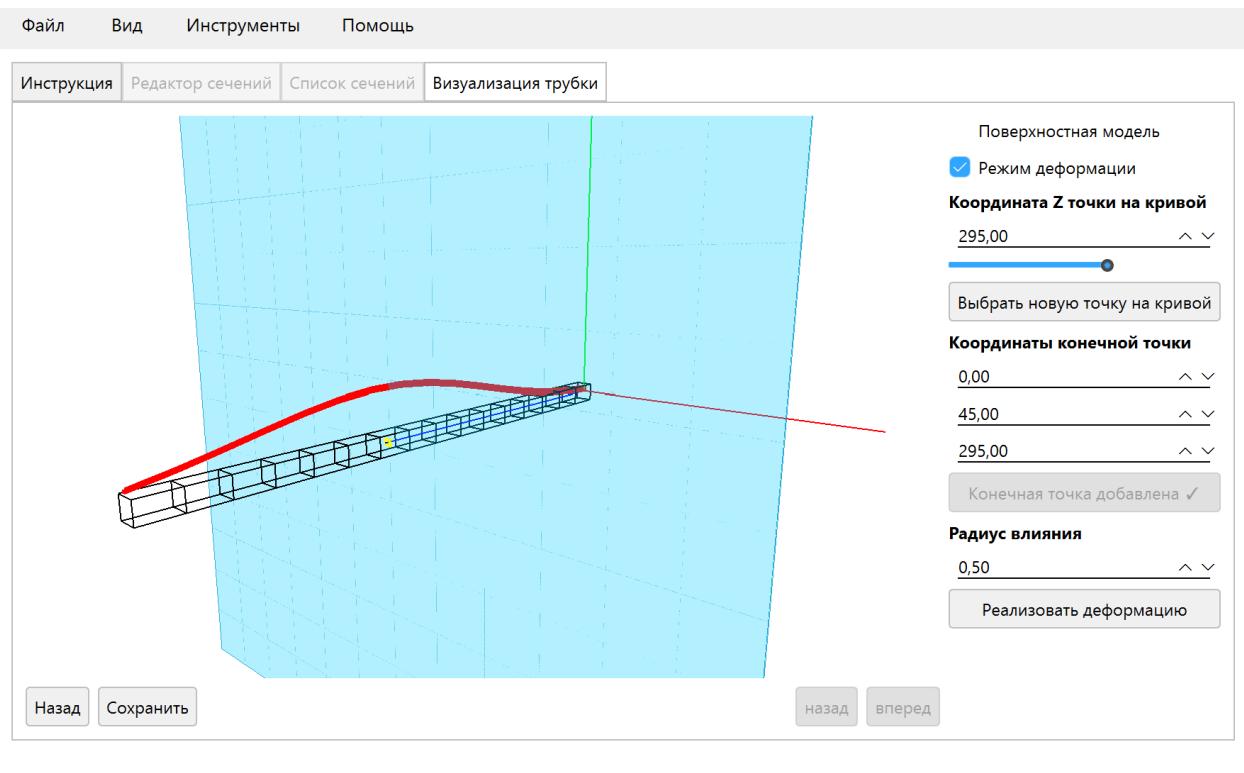


Рисунок 7 – Визуализация деформированной кривой центров

- применение деформации с автоматическим пересчетом геометрии (рисунок 8).

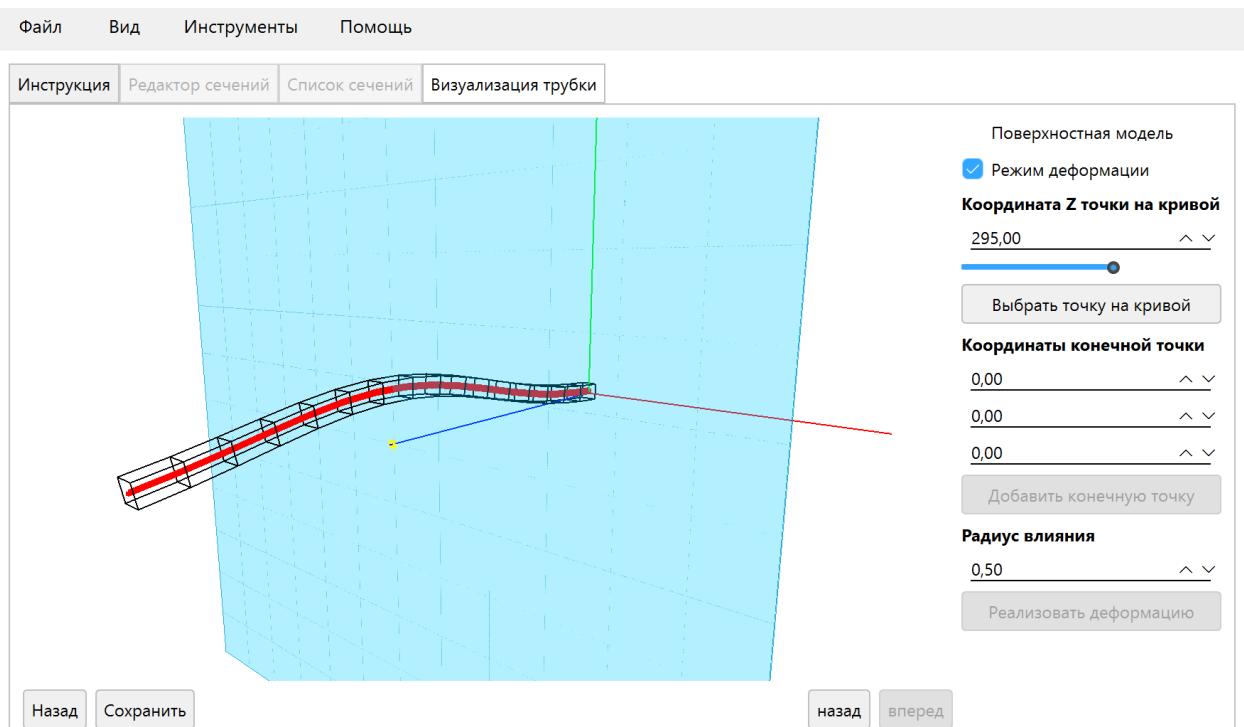


Рисунок 8 – Применение деформации

3 Просмотр истории изменений.

3.5 Вывод

В данном разделе проведен анализ систем управления базами данных, в результате которого для решения поставленной задачи выбрана СУБД PostgreSQL, обоснован выбор языка программирования C++ и библиотеки Qt SQL для взаимодействия с базой данных, приведены детали реализации и представлен пример работы программы.

4 Исследовательская часть

В данном разделе сравниваются временные характеристики построения деформированной трубы в зависимости от количества сечений и количества точек в каждом сечении.

Замеры для нахождения зависимости времени от количества сечений проводились для трубок с количеством сечений от 10 до 50. В каждом сечении было от 25 точек. Замеры для нахождения зависимости времени от количества точек проводились для трубок с количеством точек от 10 до 100. В трубке было 20 сечений. Деформация происходила по центру трубы с одинаковым радиусом влияния. Все замеры проводились 100 раз и в таблицу заносилось среднее арифметическое значение времени.

4.1 Технические характеристики

Тестирование программы проводилось на устройстве с операционной системой Windows 11, оснащенном процессором Intel Core i7-1260p, оперативной памятью объемом 16 Гб и видеокартой Intel Iris Xe Graphics. Во время тестирования, компьютер был подключен к сети питания и не использовался для других задач.

4.2 Замеры времени выполнения деформации в зависимости от количества сечений

Таблица 3 – Зависимость времени построения деформированной трубы от количества сечений (в миллисекундах)

Количество сечений	Время построения (мс)
10	981.263
20	1196.770
30	1342.660
40	1587.540
50	1845.920

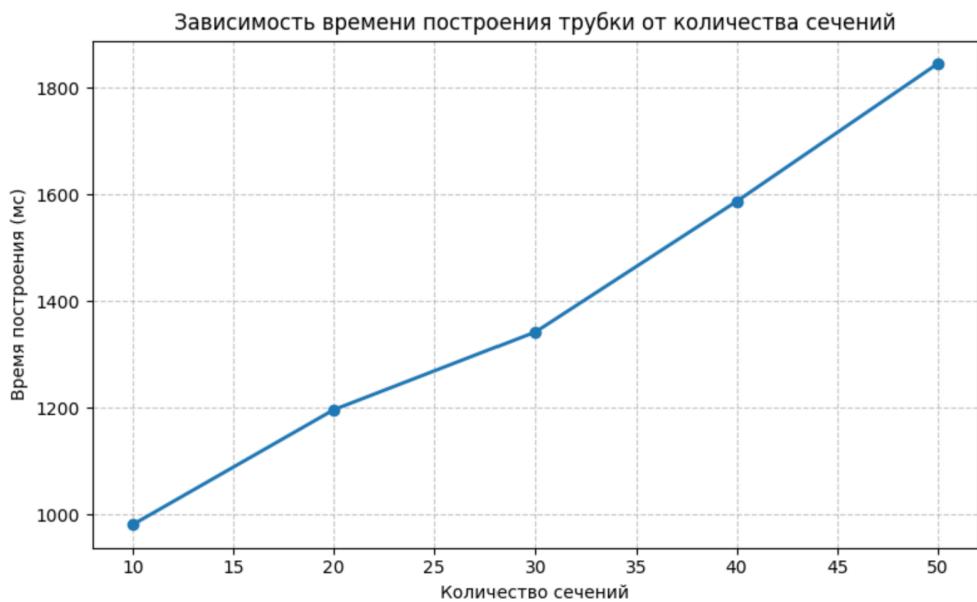


Рисунок 9 – График зависимости времени построения деформированной трубы от количества сечений

4.3 Замеры времени выполнения деформации в зависимости от количества точек

Таблица 4 – Зависимость времени построения деформированной трубы от количества точек в сечении (в миллисекундах)

Количество точек	Время построения (мс)
10	992.191
25	1196.770
50	1345.230
75	1462.880
100	1578.440

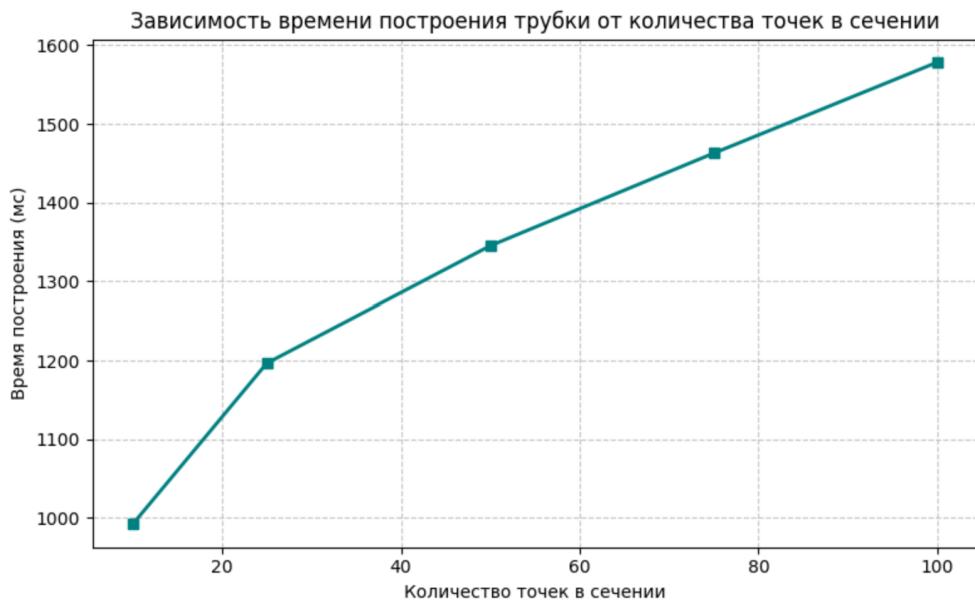


Рисунок 10 – График зависимости времени построения деформированной трубы от количества точек

4.4 Вывод

В данном разделе были сравнены временные характеристики построения деформированной трубы в зависимости от количества сечений и количества точек в каждом сечении.

Полученные результаты показывают, что время построения деформированной трубы линейно возрастает как с увеличением количества сечений, так и с ростом числа точек в каждом сечении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы была:

- 1 определена информационная модель предметной области;
- 2 спроектирована структура базы данных и установлены ограничения целостности данных, обеспечивающие корректность хранения геометрической информации;
- 3 выбрана система управления базами данных;
- 4 разработан интерфейс доступа к базе данных, позволяющий выполнять основные операции с геометрическими объектами;
- 5 исследована зависимость времени выполнения операции деформации от количества сечений;
- 6 исследована зависимость времени выполнения операции деформации от количества точек в сечении.

Проведенные исследования показали, что время построения деформированной трубы возрастает линейно как с увеличением количества сечений, так и с ростом числа точек в каждом сечении. Это свидетельствует о линейной зависимости вычислительной сложности от объема входных данных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Иванов В.Н. Геометрия и конструирование трубчатых оболочек — Вестник Российского университета дружбы народов, 2005. — С.109-114.
- [2] Standart C++ — Электронный ресурс. — Режим доступа:<https://isocpp.org> (дата обращения: 14.06.2025)
- [3] Python — Электронный ресурс. — Режим доступа:<https://www.python.org> (дата обращения: 14.06.2025)
- [4] Matplotlib: Visualization with Python — Электронный ресурс. — Режим доступа:<https://matplotlib.org> (дата обращения: 14.06.2025)
- [5] QT|Cross-platform software development for embedded&desktop — Электронный ресурс. — Режим доступа:<https://www.qt.io> (дата обращения: 14.06.2025)
- [6] QT SQL documentation&desktop — Электронный ресурс. — Режим доступа:<https://doc.qt.io/qt-6/sql-programming.html> (дата обращения: 14.06.2025)
- [7] Oracle help center&desktop — Электронный ресурс. — Режим доступа:<https://docs.oracle.com/en> (дата обращения: 14.06.2025)
- [8] MySQL help center&desktop — Электронный ресурс. — Режим доступа:<https://dev.mysql.com/doc> (дата обращения: 14.06.2025)
- [9] OpenGL — Электронный ресурс. — Режим доступа:<https://www.opengl.org> (дата обращения: 14.06.2025)
- [10] Комаров В. И. Путеводитель по базам данных — ДМК-Пресс, 2024, с. 21-58.
- [11] Васильева К. Н., Хусаинова Г. Я. Реляционные базы данных — СФ БашГУ, 2019, с. 22-23.
- [12] Лучинина З. С., Сидоркина И. Г. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДОКУМЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ БАЗЫ ДАННЫХ — Вестник Чувашского университета, 2015, с. 174-179.

- [13] Эльдарханов А. М. Обзор моделей данных объектно-ориентированных СУБД – Труды Института системного программирования РАН, 2011, с. 205-224.
- [14] Отраднов К. К., Алёшкин А. С., Калинин В. Н. ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГРАФОВЫХ БАЗ ДАННЫХ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРИКЛАДНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ – Вестник РГРТУ, 2023, с. 73-83.