



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технический университет
имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н. Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ «Информатика и системы управления»

КАФЕДРА «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии»

РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

К КУРСОВОЙ РАБОТЕ

НА ТЕМУ:

«Разработка статического сервера»

Студент ИУ7-75Б
(Группа)

(Подпись, дата)

М. Е. Зевахин
(И. О. Фамилия)

Руководитель курсовой работы

(Подпись, дата)

М. Д. Мицевич
(И. О. Фамилия)

2025 г.

РЕФЕРАТ

Расчётно-пояснительная записка 30 с., 9 рис., 4 табл., 6 ист., 1 прил.

СОДЕРЖАНИЕ

РЕФЕРАТ	2
ВВЕДЕНИЕ	4
1 Аналитическая часть	5
1.1 Протокол HTTP	5
1.2 Мультиплексирование	6
1.3 Архитектура «пул потоков»	6
1.4 Механизмы межпоточного взаимодействия	6
1.5 Обеспечение безопасности	7
1.6 Логирование	7
2 Конструкторская часть	9
2.1 Общая архитектура сервера	9
2.2 Жизненный цикл клиентского соединения	9
2.3 Алгоритм главного потока	10
2.4 Алгоритм рабочего потока	11
2.5 Механизм передачи соединений через pipe	11
3 Технологическая часть	13
3.1 Выбор языка программирования	13
3.2 Поддерживаемые HTTP-методы и статусы	13
3.3 Поддерживаемые типы файлов	14
3.3.1 Обработка больших файлов	14
3.3.2 Безопасность	14
3.3.3 Мультиплексирование и пул потоков	15
4 Исследовательская часть	16
4.1 Характеристики оборудования	16
4.2 Результаты тестирования	16
4.2.1 Тестирование максимального количества обслуживаемых сетевых соединений	16
4.2.2 Тест 2: Отдача большого файла	21
4.3 Вывод	26

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	28
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	29

ВВЕДЕНИЕ

Целью курсовой работы является разработка HTTP-сервера для отдачи статического содержимого, построенного на архитектуре пула потоков с мультиплексированием сетевых соединений с использованием системного вызова `poll()`.

Задачи:

- Предусмотреть поддержку запросов GET и HEAD, поддержку статусов 200, 403, 404.
- Предусмотреть возможность ответа сервера на неподдерживаемые запросы статусом 405.
- Обеспечить корректную передачу файлов размером до 128 Мбайт.
- Реализовать мультиплексирование – каждый процесс или поток должен отдавать данные по нескольким сетевым соединениям.
- Сервер по умолчанию должен возвращать HTML-страницу на выбранную тему с CSS-стилем.
- Реализовать запись информации о событиях в журнал (лог).
- Учесть минимальные требования к безопасности серверов статического содержимого.

1 Аналитическая часть

В данном разделе рассматриваются ключевые понятия, протоколы и механизмы операционной системы, лежащие в основе разработанного HTTP-сервера.

1.1 Протокол HTTP

HyperText Transfer Protocol (HTTP) – это прикладной протокол передачи данных, лежащий в основе обмена информацией в сети. Он использует модель «клиент-сервер», где клиент отправляет запрос, а сервер возвращает ответ [1].

HTTP версий 1.0 и 1.1, поддерживаемые в данной работе, работают поверх транспортного протокола TCP. Каждое соединение устанавливается отдельно (в HTTP/1.0) или может переиспользоваться (в HTTP/1.1). Запрос состоит из:

- 1) Стартовой строки (например, `GET /index.html HTTP/1.1`);
- 2) Заголовков (headers) в формате «ключ: значение»;
- 3) Пустой строки `\r\n\r\n`;
- 4) Необязательного тела (body).

Методы `GET` и `HEAD` используются для получения ресурса. Отличие заключается в том, что при `HEAD` сервер возвращает только заголовки ответа без тела. Это позволяет клиенту проверить метаданные, например, размер или дату изменения без передачи всего содержимого.

Сервер должен формировать HTTP-ответы с кодами состояния:

- 200 (*OK*) – успешная обработка запроса;
- 403 (*Forbidden*) – доступ к ресурсу запрещён;
- 404 (*Not Found*) – запрашиваемый ресурс не найден;
- 405 (*Method Not Allowed*) – использован неподдерживаемый HTTP-метод.

1.2 Мультиплексирование

Мультиплексирование – это способность одного потока или процесса одновременно управлять множеством сетевых соединений. Для реализации мультиплексирования в Unix-подобных системах используются системные вызовы:

- *select()*, *poll()* – классические механизмы опроса множества файловых дескрипторов;
- *epoll()* (Linux) или *kqueue()* (BSD, macOS) – масштабируемые альтернативы.

В данной работе выбран вызов *poll()*. Он позволяет потоку ожидать готовности любого из набора сокетов к чтению или записи, не блокируя выполнение программы и не требуя отдельного потока на каждое соединение [2].

1.3 Архитектура «пул потоков»

Пул потоков (thread pool) – это шаблон проектирования, при котором создаётся фиксированное количество рабочих потоков при старте программы. Входящие задачи (сетевые соединения) помещаются в очередь и распределяются между свободными потоками.

Преимущества:

- Снижение накладных расходов на создание/уничтожение потоков;
- Контролируемое потребление памяти и CPU;
- Возможность балансировки нагрузки.

В разработанном сервере пул потоков комбинируется с мультиплексированием: каждый рабочий поток сам управляет множеством сокетов через *poll()*.

1.4 Механизмы межпоточного взаимодействия

Для передачи новых соединений от главного потока (слушающего *accept()*) к рабочим потокам используется механизм *анонимных каналов* (anonymous pipes).

Pipe – это односторонний канал связи между процессами или потоками, реализованный через два файловых дескриптора [3]:

- *fd[1]* – дескриптор для записи;
- *fd[0]* – дескриптор для чтения.

В данной реализации каждый рабочий поток имеет свой pipe. Главный поток записывает в него структуру с новым сокетом, IP и портом клиента. Рабочий поток добавляет этот сокет в свой набор для *poll()*, тем самым принимая соединение на обслуживание. Каналы также используются для сигнализации о завершении работы.

1.5 Обеспечение безопасности

При разработке сервера статического содержимого критически важна защита от атак типа *Path Traversal* (обход каталогов), при которых злоумышленник пытается получить доступ к файлам вне корневой директории (например, *GET ../../../../etc/passwd*).

Для предотвращения таких атак реализована функция *is_path_safe()*, которая:

- Нормализует путь с помощью *realpath()*, разрешая символические ссылки и удаляя .. и .;
- Сравнивает полученный абсолютный путь с каноническим путём корневой директории;
- Разрешает доступ только если результирующий путь находится внутри корневой директории.

Также сервер ограничивает максимальный размер отдаваемого файла (128 МБ) и не позволяет отдавать содержимое каталогов (возвращается 403).

1.6 Логирование

Ведение журнала событий (логирование) необходимо для мониторинга, отладки и аудита. Сервер реализует запись в лог-файл в формате, близком к Common Log Format (CLF):

[время_в_UTC] [IP:порт] "МЕТОД ПУТЬ" КОД_СТАТУСА ОБЪЁМ.

Для обеспечения потокобезопасности при записи из нескольких рабочих потоков используется мьютекс (*pthread_mutex_t*), защищающий критическую секцию *fprintf()*.

2 Конструкторская часть

В данном разделе представлена архитектура HTTP-сервера, описаны ключевые компоненты и алгоритмы их взаимодействия.

2.1 Общая архитектура сервера

Сервер состоит из следующих модулей:

- 1) **Главный поток** – создаёт слушающий сокет, запускает пул рабочих потоков и принимает новые соединения через `accept()`.
- 2) **Пул рабочих потоков** – фиксированное количество потоков, каждый из которых управляет множеством клиентских соединений.
- 3) **Каналы (pipes)** – используются для передачи новых сокетов от главного потока к рабочим.
- 4) **Модуль HTTP** – парсинг запросов, формирование ответов.
- 5) **Модуль безопасности** – проверка пути через `is_path_safe`.
- 6) **Логгер** – потокобезопасная запись событий.

2.2 Жизненный цикл клиентского соединения

Каждое соединение проходит через конечный автомат с четырьмя состояниями (рис. 2.1):

1. *CONN_READING* – ожидание и чтение HTTP-запроса;
2. *CONN_SENDING_HEADER* – отправка заголовков ответа;
3. *CONN_SENDING_BODY* – пошаговая отправка тела файла через `sendfile()`;
4. *CONN_DONE* – завершение, закрытие сокета и файла.

Переходы между состояниями управляются событиями *POLLIN* и *POLLOUT*, возвращаемыми вызовом `poll()`.

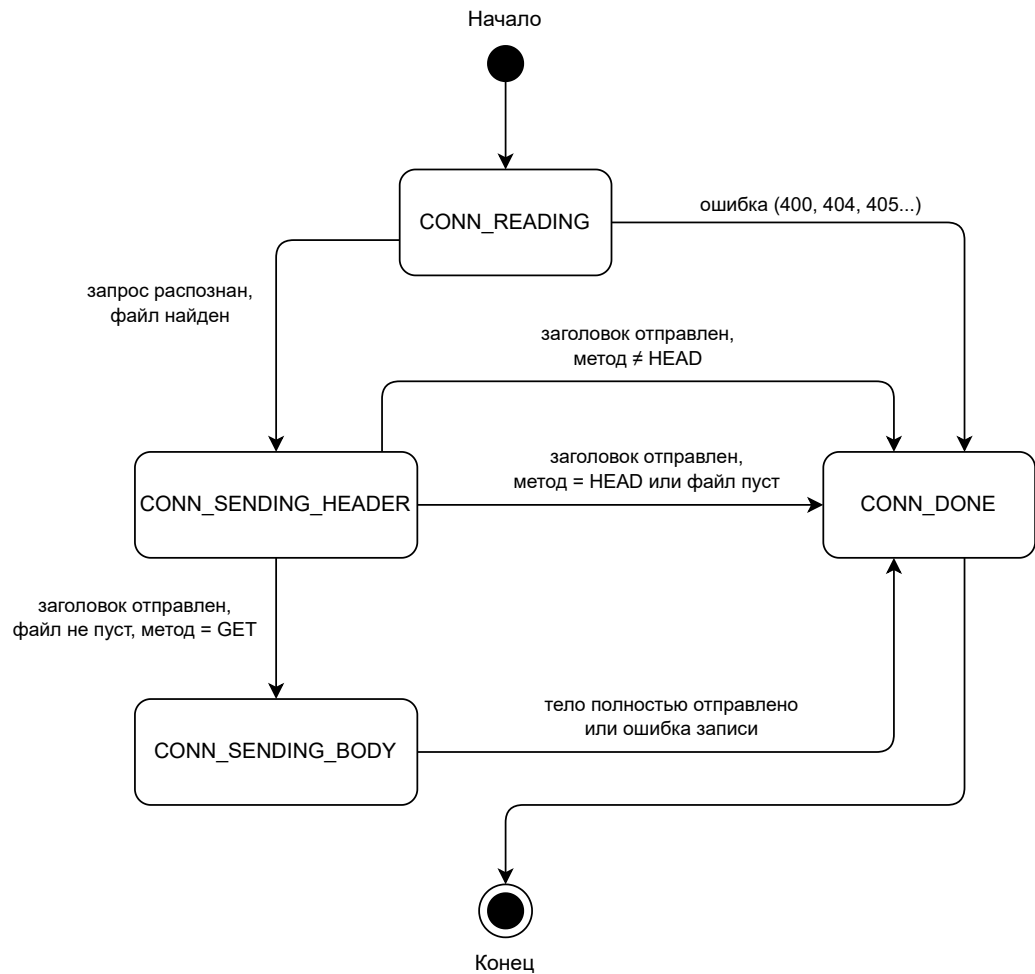


Рисунок 2.1 – Диаграмма состояний жизненного цикла клиентского соединения

2.3 Алгоритм главного потока

Главный поток выполняет следующие шаги:

- 1) Создать слушающий сокет.
- 2) Запустить пул рабочих потоков.
- 3) Запустить цикл, пока работа сервера не завершена:
 - 3.1) Если новое соединение установлено:
 - Получить IP и порт клиента;
 - Назначить соединение рабочему потоку.
 - 3.2) Конец цикла.
- 4) Остановить пул рабочих потоков.

- 5) Заккрыть слушающий сокет.

2.4 Алгоритм рабочего потока

Рабочий поток реализует цикл обработки событий:

- 1) Создать массив соединений и *pipe* для приема новых сокетов.
- 2) Цикл до завершения работы потока:
 - 2.1) Сформировать набор дескрипторов для *poll()*.
 - 2.2) Вызвать *poll()*.
 - 2.3) Если пришли новые соединения (события на *pipe*) – добавить их в массив в состоянии *CONN_READING*.
 - 2.4) Для каждого активного сокета:
 - При *POLLIN* и состоянии *READING* – прочитать и проанализировать запрос, при успехе перейти к подготовке ответа.
 - При *POLLOUT* и состоянии *SENDING_HEADER* – отправить заголовок, при завершении перейти к отправке тела.
 - При *POLLOUT* и состоянии *SENDING_BODY* – отправить фрагмент файла.
 - При ошибках или завершении – перевести соединение состояние в *CONN_DONE*.
 - 2.5) Удалить все соединения в состоянии *CONN_DONE*.
- 3) При завершении – освободить все ресурсы.

2.5 Механизм передачи соединений через *pipe*

Для назначения нового соединения рабочему потоку используется *round-robin* распределение:

1. Главный поток формирует структуру *conn_msg = {fd, ip, port}*.
2. Выбирается следующий рабочий поток по индексу.
3. Структура записывается в *pipe* этого потока.

4. Рабочий поток получает событие *POLLIN* на своем *pipe* и добавляет сокет в свой набор.

Этот механизм обеспечивает потокобезопасную и неблокирующую передачу дескрипторов без использования мьютексов в основном пути.

3 Технологическая часть

В данном разделе описывается техническая реализация HTTP-сервера: выбор языка программирования, поддерживаемые типы запросов, а также ключевые особенности реализации, обеспечивающие безопасность, производительность и корректность работы.

3.1 Выбор языка программирования

Для реализации сервера был выбран язык **C** по следующим причинам:

- Прямой доступ к системным вызовам POSIX (*socket*, *poll*, *sendfile*, *open* и др.), что необходимо для точного контроля над сетевым и файловым вводом-выводом.
- Минимальные накладные расходы: отсутствие автоматической сборки мусора и runtime-библиотек позволяет достичь высокой производительности и предсказуемого поведения.
- Портативность: код компилируется на любой POSIX-совместимой системе (Linux, BSD, macOS) с помощью стандартного компилятора *gcc*.

Для сборки используется система *make*, что обеспечивает кроссплатформенность и воспроизводимость сборки.

3.2 Поддерживаемые HTTP-методы и статусы

Сервер поддерживает два метода протокола HTTP/1.1:

- *GET* – запрашивает полное содержимое ресурса (заголовки с телом).
- *HEAD* – запрашивает только метаданные (заголовки без тела).

При получении любого другого метода, сервер возвращает код состояния: 405 (*Method Not Allowed*).

Поддерживаемые коды ответа:

- 200 (*OK*) – успешная обработка запроса;
- 400 (*Bad Request*) – ошибка формата запроса (слишком длинный путь и т.п.);

- 403 (*Forbidden*) – доступ запрещён;
- 404 (*Not Found*) – файл не найден;
- 413 (*Payload Too Large*) – запрошенный файл превышает лимит в 128 МБ;
- 500 (*Internal Server Error*) – ошибка формирования заголовка.

3.3 Поддерживаемые типы файлов

Сервер автоматически определяет MIME-тип отдаваемого файла по расширению и указывает его в заголовке *Content-Type*. Поддерживаются следующие типы:

- **Веб-контент:** *.html*, *.htm*, *.css*, *.js*, *.json*;
- **Изображения:** *.png*, *.jpg*, *.jpeg*, *.gif*, *.ico*, *.webp*;
- **Видео:** *.mp4*, *.webm*, *.ogg*, *.ogv*, *.avi*, *.mov*, *.mkv*;
- **Документы:** *.txt*, *.pdf*;
- **Прочее:** все остальные файлы отдаются с типом *application/octet-stream*.

Это позволяет корректно отображать веб-страницы с изображениями, стилями, скриптами и мультимедиа.

3.3.1 Обработка больших файлов

Файлы размером до 128 МБ передаются по частям с использованием системного вызова *sendfile()*, который выполняет копирование данных напрямую из ядра (без копирования в пользовательское пространство – zero-copy). Отправка производится асинхронно: после каждой попытки вызывается *poll()*, что предотвращает блокировку потока.

3.3.2 Безопасность

Реализована защита от атак типа *Path Traversal*:

- Все входящие пути нормализуются через *realpath()*, что устраняет последовательности *../* и символические ссылки.

- Проверяется, что результирующий путь находится строго внутри корневой директории.
- Запросы к директориям (без *index.html*) возвращают 403 (*Forbidden*).

3.3.3 Мультиплексирование и пул потоков

Архитектура основана на комбинации:

- **Пула потоков** – фиксированное число рабочих потоков (настраивается при запуске).
- **Мультиплексирования через *poll()*** – каждый поток одновременно обслуживает до 1024 соединений.

Новые соединения распределяются между потоками по алгоритму *round-robin* через анонимные каналы (pipes), что исключает конкуренцию за мьютексы в основном пути данных.

4 Исследовательская часть

В данном разделе представлены результаты нагрузочного тестирования разработанного HTTP-сервера. Целью исследования является оценка:

- максимального количества одновременно обслуживаемых соединений;
- скорости отдачи данных по одному и множеству соединений;
- общей пропускной способности сервера.

4.1 Характеристики оборудования

Характеристики оборудования, на котором проводилось исследование приведены ниже:

- **ОС:** Ubuntu 22.04.1 LTS Release: 22.04,
- **ЦП:** AMD Ryzen 7 4800H with Radeon Graphics, 2900 МГц, ядер: 8,
- **ОЗУ:** 16 Гб, 3200 МГц,
- **ПЗУ:** INTEL SSDPEKNW512G8H 476,9G.

4.2 Результаты тестирования

Для генерации нагрузки использовался инструмент `wrk` версии 4.2.0, а также `curl` версии 8.5.0. Тестовые файлы:

- *index.html* – HTML-файл (5.3 КБ) для тестирования максимального количества сетевых соединений;
- *dataset.bin* – бинарный файл размером 100 МБ для тестирования отдачи данных по каждому сетевому соединению и совокупному.

4.2.1 Тестирование максимального количества обслуживаемых сетевых соединений

Для тестирования максимального количества обслуживаемых сетевых соединений использовалась утилита `wrk`. Сервер был запущен с помощью команды:

`./app ./htdocs 8080 threads`, где *threads* = 1, 2, 4, 8, 16.

Для каждого запуска с разным количеством рабочих потоков в пуле, выполнялся запуск утилиты **wrk** следующим образом:

```
wrk -tthreads -cconnections -d30s http://localhost:8080/index.html,
```

где **threads** соответствует количеству рабочих потоков в текущем запуске сервера, а **connections** = 10, 50, 100, 200, 500, 1000 для каждого количества рабочих потоков в пуле, кроме случая, когда **threads** = 16, в этом случае **connections** перебираются так: 16, 50, 100, 200, 500, 1000.

Однако, в процессе тестирования возникла ошибка сервера: *Too many open files* – которая обозначает, что процесс превысил лимит на количество открытых файловых дескрипторов. Для решения этой проблемы, временно был вручную увеличен лимит с помощью [4]:

```
ulimit -n 4096.
```

Полученные результаты записаны в таблицах 4.1 – 4.2. На графиках 4.1 - 4.3 представлены зависимости количества обрабатываемых запросов в секунду, совокупного объема переданных данных, средней задержки сервера от числа одновременных соединений при тестовом сценарии с легковесным файлом (*index.html*) соответственно.

Таблица 4.1 – Результаты тестирования максимального количества сетевых соединений (часть 1)

Количество потоков	Количество соединений	Средняя задержка, (мкс)	Количество запросов, ($\frac{10^3}{с}$)	Объем данных, (Мб)
1	10	290.28	20.51	104.47
1	50	1 450	21.09	107.41
1	100	2 820	20.72	105.52
1	200	5 320	20.17	102.66
1	500	1 364	19.43	98.80
1	1000	2 585	19.78	100.65
2	10	165.39	16.87	171.84
2	50	686.94	19.24	195.92
2	100	1 390	19.04	193.85
2	200	2 450	19.56	199.09
2	500	6 090	18.97	192.84
2	1000	1 243	18.50	187.94
4	10	123.79	8.41	171.35
4	50	461.92	14.63	297.63
4	100	743.84	16.91	344.49
4	200	1 330	17.26	351.47
4	500	3 170	17.03	346.44
4	1000	6 550	16.35	332.04
8	10	123.79	8.41	171.35
8	50	461.92	14.63	297.63
8	100	743.84	16.91	344.49
8	200	1 330	17.26	351.47
8	500	3 170	17.03	346.44
8	1000	6 550	16.35	332.04

Таблица 4.2 – Результаты тестирования максимального количества сетевых соединений (часть 2)

Количество потоков	Количество соединений	Средняя за-держка, (мкс)	Количество запросов, ($\frac{10^3}{с}$)	Объем данных, (Мб)	отправленных
8	10	72.94	4.17	169.68	
8	50	457.15	8.69	353.95	
8	100	663.39	10.56	430.19	
8	200	1 080	12.64	514.78	
8	500	2 410	12.65	514.75	
8	1000	4 730	12.30	499.79	
16	16	160.92	3.98	323.19	
16	50	408.43	5.33	433.69	
16	100	761.43	5.95	484.56	
16	200	1 510	6.07	494.44	
16	500	3 790	5.92	481.95	
16	1000	7 370	5.65	459.24	

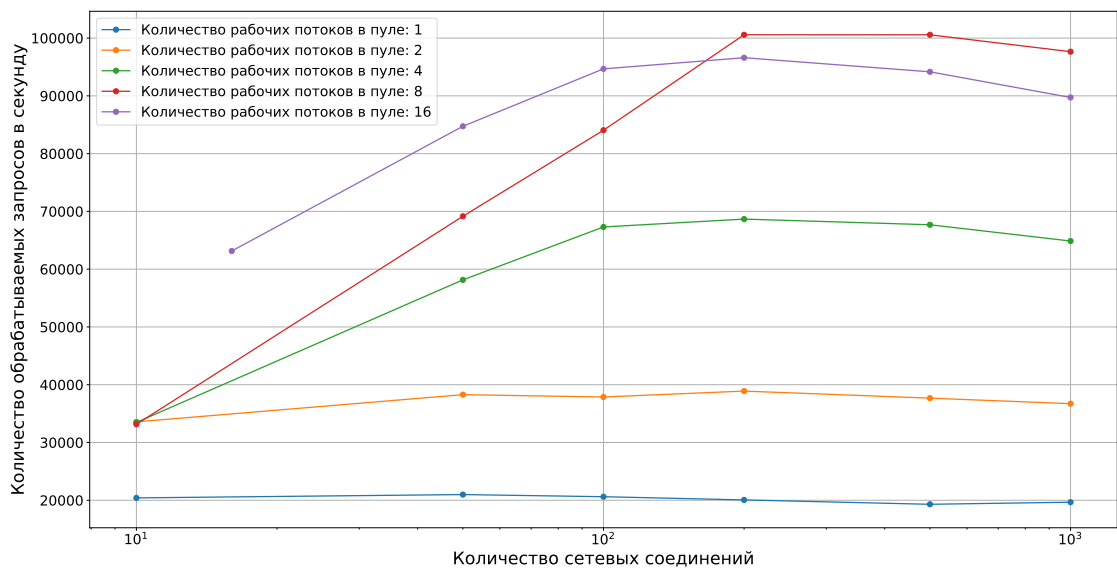


Рисунок 4.1 – Зависимость количества обрабатываемых запросов в секунду от числа одновременных соединений при отдаче index.html

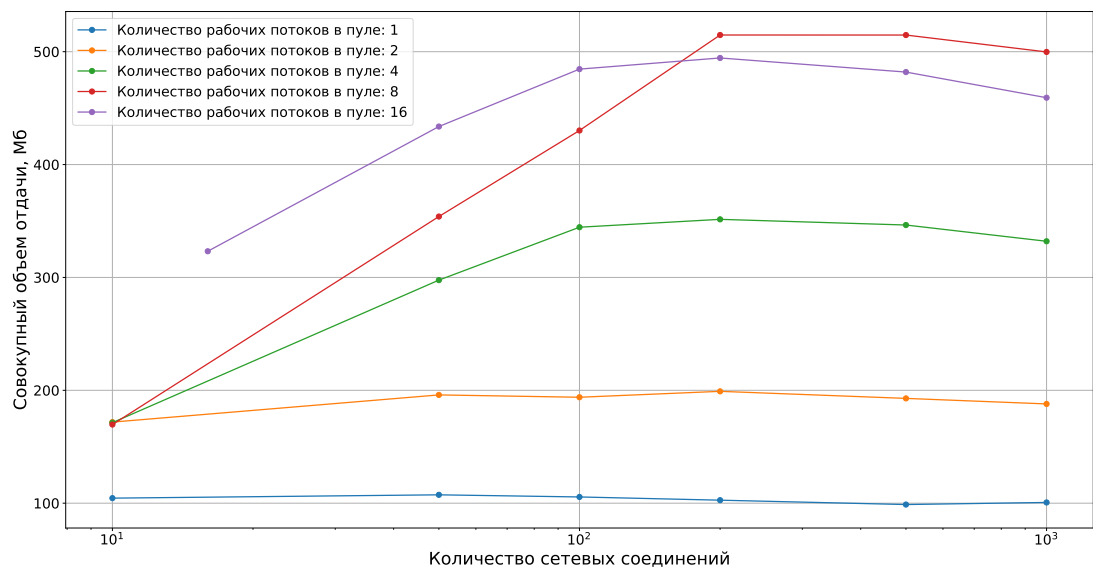


Рисунок 4.2 – Зависимость совокупного объема переданных данных от числа одновременных соединений при отдаче index.html

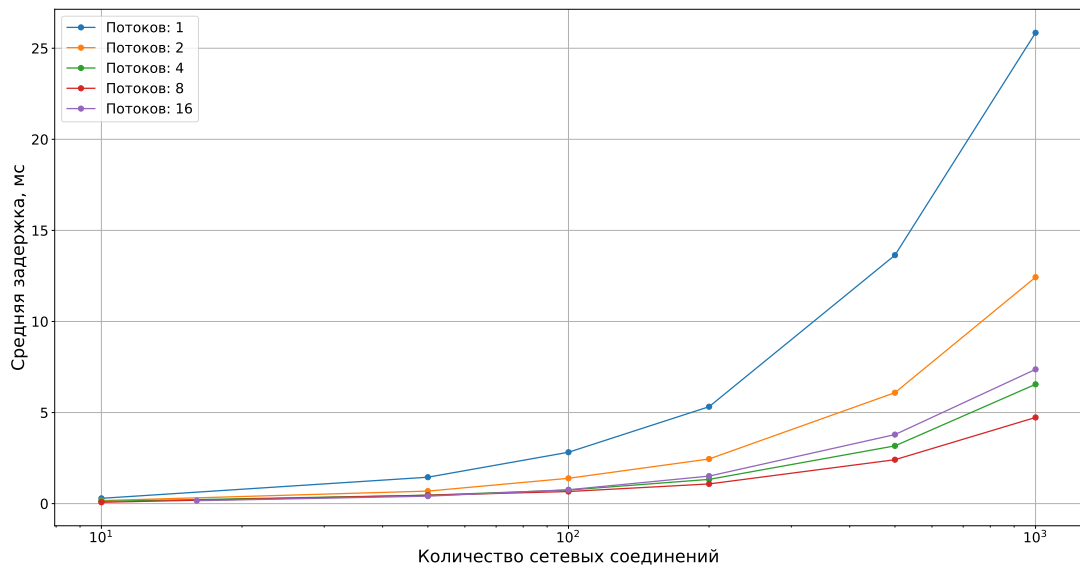


Рисунок 4.3 – Зависимость средней задержки сервера от числа одновременных соединений при отдаче index.html

4.2.2 Тест 2: Отдача большого файла

Для оценки передачи объемных данных сервер был запущен с оптимальным количеством потоков – 8:

```
./app ./htdocs 8080 8.
```

Для тестирования отдачи данных по одному сетевому соединению использовался файл *dataset.bin* размером 100 Мб с помощью команды:

```
time (curl -o /dev/null http://localhost:8080/resources/test/dataset.bin & wait),
```

которая была последовательно выполнена 7 раз (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Тестирование отдачи данных по одному сетевому соединению

№ запуска	Время, (мс)	Пропускная способность, (Мб/с)
1	56	2 444
2	52	2 676
3	46	3 236
4	54	2 547
5	46	3 221
6	46	3 237
7	46	3 227
Среднее	49.42	2 941.14

На рисунке 4.4 представлен график зависимости пропускной способности (Мб/с) сервера от номера запуска команды *curl*, а также изображена средняя пропускная способность сервера при отдаче файла объемом 100 Мб по одному сетевому соединению.

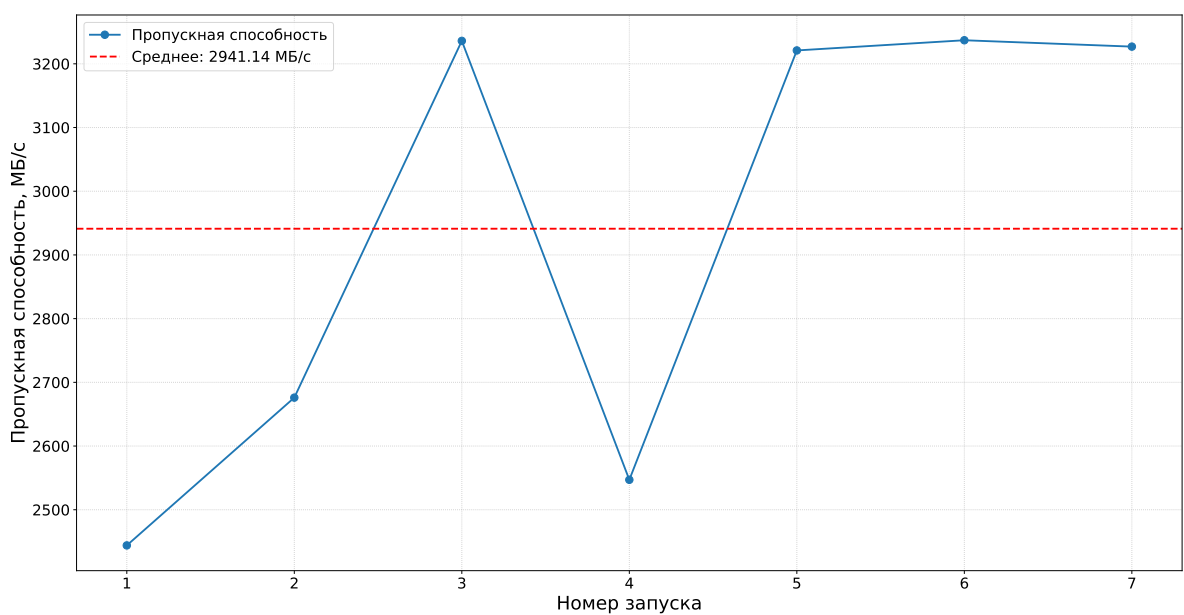


Рисунок 4.4 – Зависимость пропускной способности сервера от номера запуска команды *curl* при передаче 100 МБ по одному сетевому соединению

На рисунке 4.5 представлен график зависимости времени выполнения команды *curl* (мс) от номера ее запуска, а также изображено среднее время выполнения этой команды при отдаче файла объемом 100 Мб по одному сетевому соединению.

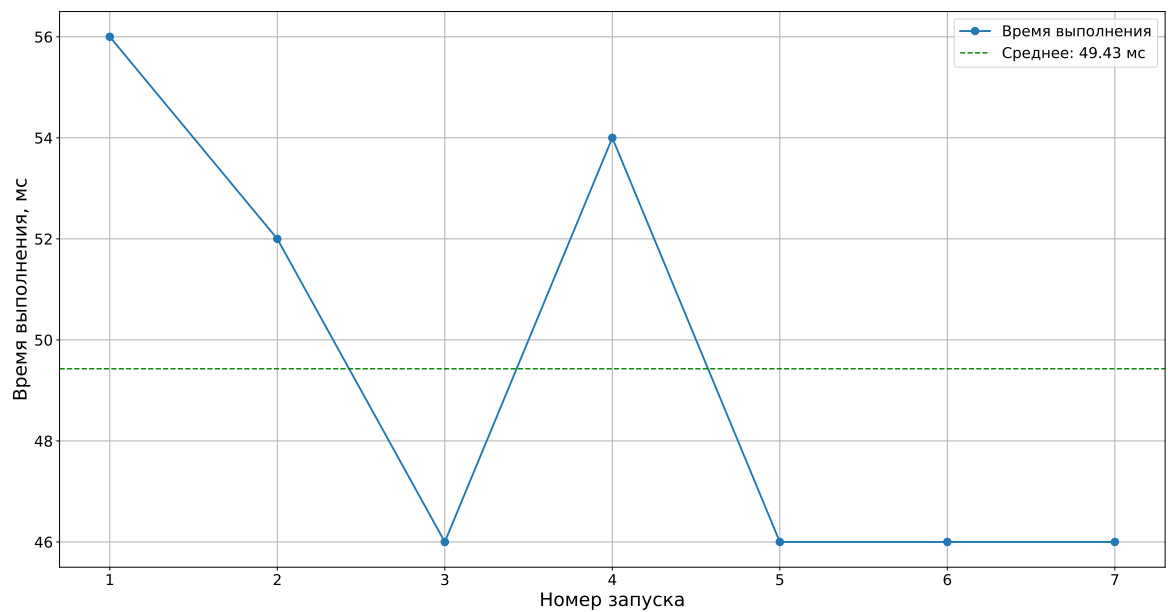


Рисунок 4.5 – Зависимость времени выполнения команды *curl* от номера ее запуска при передаче 100 МБ по одному сетевому соединению

Для тестирования отдачи данных по нескольким параллельным сетевым соединениям сервер также был запущен с оптимальным количеством рабочих потоков в пуле (8), а для создания параллельных соединений использовался *bash*-скрипт 4.1 [5].

Таблица 4.4 – Тестирование отдачи данных по нескольким параллельным сетевым соединениям

Количество сетевых соединений	Пропускная способность на соединение, (Мб/с)	Совокупная пропускная способность, (Мб/с)	Время, (мс)
1	5 108.11	5 108.11	20
2	6 358.69	12 717.38	16
4	6 201.96	24 807.85	16
8	7 260.14	58 081.14	14
16	5 947.57	95 161.15	17
32	3 842.48	122 959.52	26
64	2 252.20	144 141.37	44
128	1 198.97	153 468.88	83
256	575.49	147 327.97	174
512	260.38	133 316.38	384
1 024	145.50	148 992.23	687
Среднее	3559.22	95 098.36	134.63

По полученным данным были построены графики зависимости средней скорости отдачи данных на соединение, совокупной пропускной способности сервера и времени передачи от количества сетевых соединений при отдаче файла объемом 100 Мб по нескольким параллельным сетевым соединениям соответственно (рисунки 4.6 – 4.8).

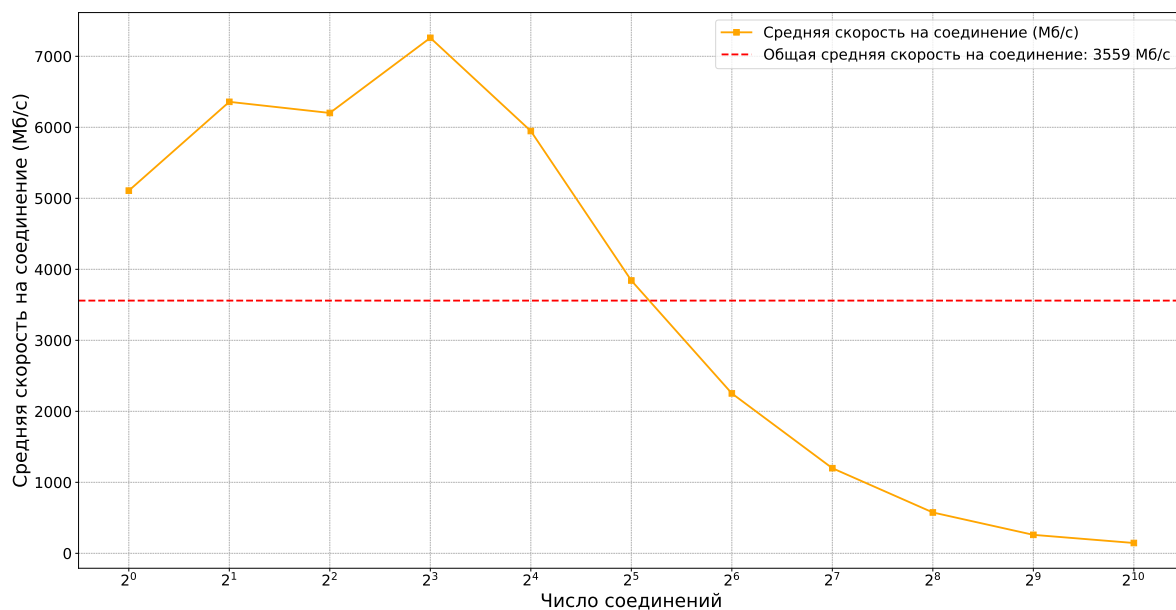


Рисунок 4.6 – Зависимость средней скорости отдачи данных на соединение от количества сетевых соединений

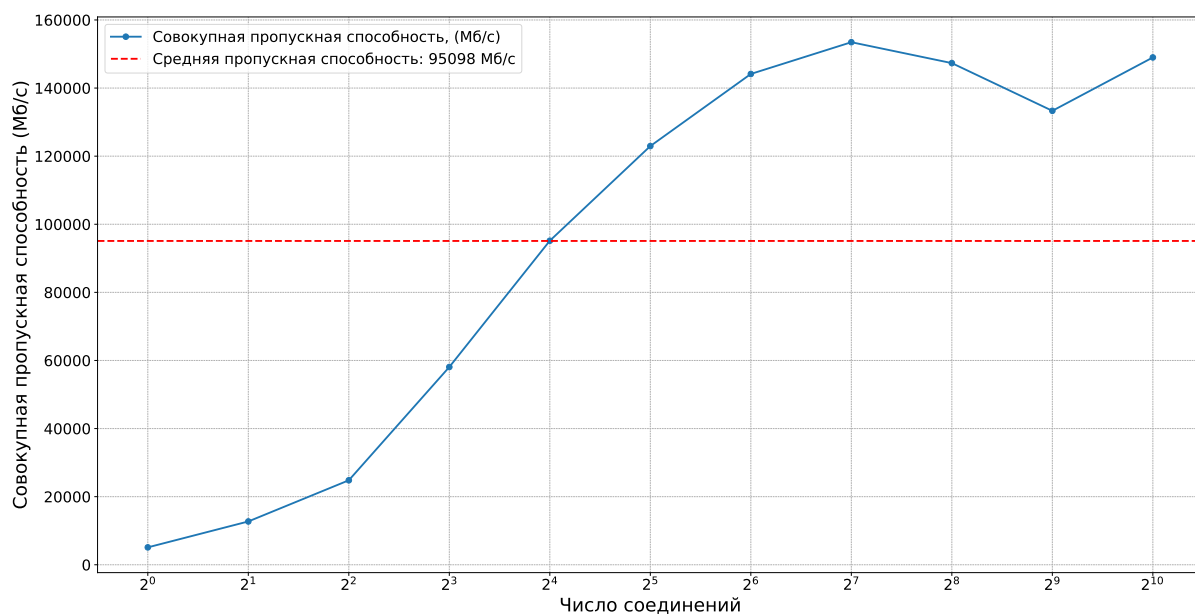


Рисунок 4.7 – Зависимость совокупной пропускной способности сервера от количества сетевых соединений

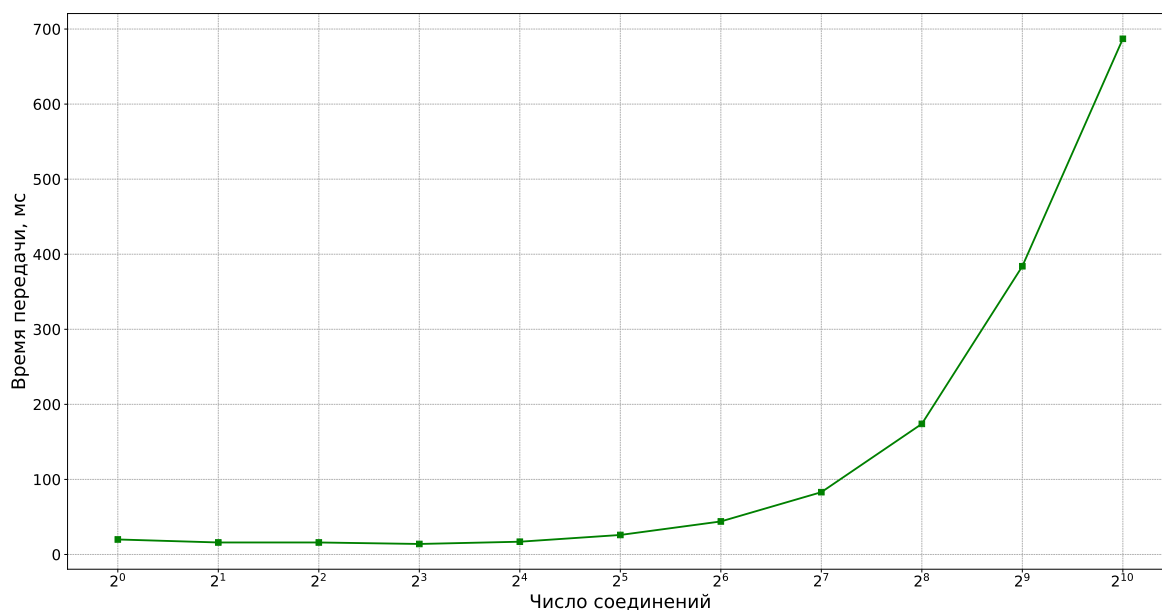


Рисунок 4.8 – Зависимость времени передачи от количества сетевых соединений

4.3 Вывод

На основе проведенного нагрузочного тестирования сервера сделаны следующие выводы:

- При увеличении количества рабочих потоков с 1 до 8 наблюдается рост совокупной пропускной способности (в Мб/с) и числа обработанных запросов в секунду.
- Однако дальнейшее увеличение числа потоков до 16 приводит к снижению производительности.
- Сервер демонстрирует максимальную эффективность при 8 потоках, что соответствует числу физических ядер ЦП.
- При передаче 100 МБ по одному соединению средняя скорость – 2941 Мб/с, а в пике – до 3237 Мб/с. Такие значения близки к пропускной способности ПЗУ (INTEL SSDPEKNW512G8: до 2000-3500 МБ/с при последовательном чтении).
- При параллельной передаче 100-МБ файла по множеству соединений, совокупная пропускная способность растет до 153 Гб/с при 128 соедине-

ниях, но при начиная с 256 соединениях начинает снижаться (147 Гб/с при 256, 133 Гб/с при 512).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель, которая была поставлена в начале работы, была достигнута: разработан HTTP-сервер для отдачи статического содержимого, построенного на архитектуре пула потоков с мультиплексированием сетевых соединений с использованием системного вызова `poll()`.

Решены все поставленные задачи:

- Предусмотрена поддержка запросов GET и HEAD, поддержка статусов 200, 403, 404.
- Предусмотрена возможность ответа сервера на неподдерживаемые запросы статусом 405.
- Обеспечена корректная передача файлов размером до 128 Мбайт.
- Реализовано мультиплексирование – каждый процесс или поток должен отдавать данные по нескольким сетевым соединениям.
- Сервер по умолчанию возвращает HTML-страницу на выбранную тему с CSS-стилем.
- Реализована запись информации о событиях в журнал (лог).
- Учтены минимальные требования к безопасности серверов статического содержимого.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Компьютерные сети : учебное пособие / А. Н. Алексахин, С. А. Алексахина, А. В. Батищев [и др.] ; под редакцией А. М. Нечаева. — Москва : Университет «Синергия», 2023. — 312 с. — ISBN 978-5-4257-0558-7. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/156712.html> (дата обращения: 18.12.2025). — Режим доступа: для авторизир. пользователей
2. Кобылянский, В. Г. Локальные компьютерные сети. Базовый курс : учебное пособие / В. Г. Кобылянский. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2023. — 127 с. — ISBN 978-5-7782-4894-6. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/155418.html> (дата обращения: 18.12.2025). — Режим доступа: для авторизир. пользователей
3. pipe(2) – Linux manual page [Электронный ресурс]. — URL: <https://man7.org/linux/man-pages/man2/pipe.2.html> (дата обращения: 18.12.2025)
4. ulimit(3) – Linux manual page [Электронный ресурс]. — URL: <https://man7.org/linux/man-pages/man3/ulimit.3.html> (дата обращения: 18.12.2025)
5. Bash Features [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.gnu.org/savannah-checkouts/gnu/bash/manual/bash.html> (дата обращения: 18.12.2025)
6. Matplotlib documentation [Электронный ресурс]. — URL: <https://matplotlib.org/stable/index.html> (дата обращения: 18.12.2025)

Приложение А

Листинг 4.1 – Скрипт для измерения совокупной пропускной способности

```
1 #!/bin/bash
2 export LC_NUMERIC=C
3
4 URL="http://localhost:8080/resources/test/dataset.bin"
5 SIZES=(1 2 4 8 16 32 64 128 256 512 1024)
6 OUTPUT_FILE="throughput_results.csv"
7
8 if [[ ! -f "$OUTPUT_FILE" ]]; then
9     echo 'connections,"aver transfer","transfer",time' >
10         "$OUTPUT_FILE"
11 fi
12 echo "Тестирование совокупной пропускной способности"
13 echo "Файл: 100 МБ, Сервер: 8 потоков"
14 echo
15
16 for n in "${SIZES[@]}"; do
17     echo ">>> Запуск с $n соединениями..."
18
19     start_time=$(date +%s.%N)
20     for ((i=0; i<n; i++)); do
21         curl -o /dev/null -s "$URL" &
22     done
23     wait
24     end_time=$(date +%s.%N)
25
26     total_time=$(echo "$end_time - $start_time" | bc -l)
27     time_rounded=$(printf "%.0f" "$total_time")
28     total_mb=$((n * 100))
29     throughput=$(echo "scale=2; $total_mb / $total_time" | bc)
30     avg_per_conn=$(echo "scale=2; $throughput / $n" | bc)
31
32     echo "    Время: $(printf "%.3f" $total_time) с"
33     echo "    Совокупная пропускная способность: $throughput МБ/с"
34     echo "    На соединение (среднее): $avg_per_conn МБ/с"
35 done
```