

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский университет
ИТМО»

Факультет программной инженерии и компьютерной техники

Дисциплина:

“Операционные системы”

Отчет по лабораторной работе № 2

Работу выполнил:

Лукьянчук Ярослав Евгеньевич

Группа:

P3323

Преподаватель:

Клименков С. В.

Санкт-Петербург

2025 г.



Отчет по лабораторной работе № 2

Репозиторий лабораторной.

```
{  
  "target_os": "Linux",  
  "cache_policy": "Random"  
}
```

Задание

Для оптимизации работы с блочными устройствами в ОС существует кэш страниц с данными, которыми мы производим операции чтения и записи на диск. Такой кэш позволяет избежать высоких задержек при повторном доступе к данным, так как операция будет выполнена с данными в RAM, а не на диске (вспомним пирамиду памяти).

В данной лабораторной работе необходимо реализовать блочный кэш в пространстве пользователя в виде динамической библиотеки (dll или so). Политику вытеснения страниц и другие элементы задания необходимо получить у преподавателя.

При выполнении работы необходимо реализовать простой API для работы с файлами, предоставляющий пользователю следующие возможности:

1. Открытие файла по заданному пути файла, доступного для чтения. Процедура возвращает некоторый хэндл на файл. Пример:

```
int lab2_open(const char *path).
```

2. Закрытие файла по хэндлу. Пример:

```
int lab2_close(int fd).
```

3. Чтение данных из файла. Пример:

```
ssize_t lab2_read(int fd, void buf[.count], size_t count).
```

4. Запись данных в файл. Пример:

```
ssize_t lab2_write(int fd, const void buf[.count], size_t count).
```

5. Перестановка позиции указателя на данные файла. Достаточно поддержать только абсолютные координаты. Пример:

```
off_t lab2_lseek(int fd, off_t offset, int whence).
```

6. Синхронизация данных из кэша с диском. Пример:

```
int lab2_fsync(int fd).
```

Операции с диском разработанного блочного кэша должны производиться в обход page cache используемой ОС.

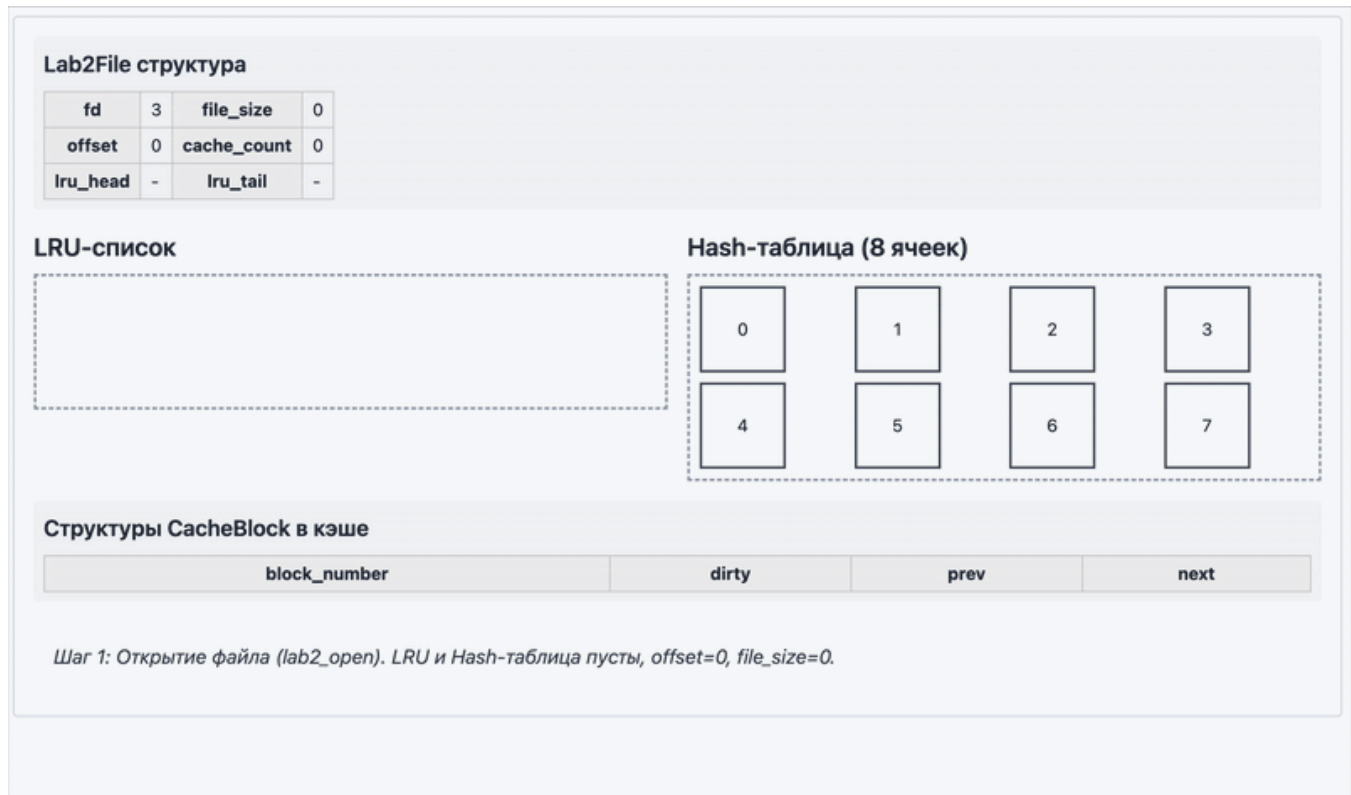
В рамках проверки работоспособности разработанного блочного кэша необходимо адаптировать указанную преподавателем программу-загрузчик из ЛР 1, добавив использование кэша. Запустите программу и убедитесь, что она корректно работает. Сравните производительность до и после.

Ограничения

- Программа (комплекс программ) должна быть реализован на языке C или C++.
- Запрещено использовать высокоуровневые абстракции над системными вызовами. Необходимо использовать, в случае Unix, процедуры libc.

Краткий обзор кода

1. Общая идея



- **Lab2File** – структура, хранящая основную информацию:
 - `fd` – реальный файловый дескриптор.
 - `file_size` – текущий размер реального файла.
 - `offset` – «курсор» (смещение для чтения/записи).
 - `cache_count` – число блоков, сейчас находящихся в кэше.
 - `hash_table` – массив «корзин» для хеширования блоков (размер `CACHE_CAPACITY`).
- **CacheBlock** – структура, описывающая один блок кэша. Содержит:
 - `block_number` – номер блока в файле (каждый блок по умолчанию `BLOCK_SIZE` байт).
 - `data` – указатель на выделенную память под данные блока.
 - `dirty` – флаг «грязности» (true, если данные в блоке ещё не записаны на диск).

- `next_hash` — указатель на следующий блок в цепочке хеш-таблицы.
- При **чтении** или **записи** данных:
 - i. Вычисляется номер блока `block_num = offset / BLOCK_SIZE`.
 - ii. В хеш-таблице ищется блок (функция `find_block`).
 - Если блока нет, он подгружается (`load_block`), при необходимости вытесняя «случайный» блок (функция `evict_block`).
 - iii. Производится копирование данных (чтение или запись) в/из `CacheBlock->data`.
 - iv. Если данные были записаны, блок помечается «грязным» (`dirty = true`).
- При **закрытии** (`lab2_close`) или при явном вызове `lab2_fsync` все «грязные» блоки (из хеш-цепочек, хотя в текущем упрощённом коде обрабатывается лишь первая «корзина») дозаписываются на диск.

2. Обзор кода

Вспомогательные функции

`static unsigned hash_off(off_t block_number)`

```
static unsigned hash_off(off_t block_number) {
    return (unsigned)(block_number % CACHE_CAPACITY);
}
```

- **Зачем:** вычисляет индекс корзины в хеш-таблице, используя операцию `block_number % CACHE_CAPACITY`.

static void remove_from_hash(Lab2File *f, CacheBlock *b)

```
static void remove_from_hash(Lab2File *f, CacheBlock *b) {
    unsigned i = hash_off(b->block_number);
    CacheBlock *p = f->hash_table[i], *prevp = NULL;
    while (p) {
        if (p == b) {
            if (!prevp) f->hash_table[i] = p->next_hash;
            else prevp->next_hash = p->next_hash;
            return;
        }
        prevp = p;
        p = p->next_hash;
    }
}
```

- **Зачем:** удаляет блок `b` из соответствующей цепочки хеш-таблицы.
- **Как:** находит блок в списке `hash_table[i]` и убирает из связанного списка `next_hash`.

static CacheBlock* evict_block(Lab2File *f)

```
static CacheBlock* evict_block(Lab2File *f) {
    if (f->cache_count == 0) return NULL;

    unsigned bucket = rand() % CACHE_CAPACITY;
    unsigned original_bucket = bucket;
    CacheBlock *b = NULL;
    CacheBlock *prev = NULL;

    while (!f->hash_table[bucket] && bucket < CACHE_CAPACITY) bucket++;
    if (bucket == CACHE_CAPACITY) {
        bucket = 0;
        while (!f->hash_table[bucket] && bucket < original_bucket) bucket++;
    }

    if (!f->hash_table[bucket]) return NULL;

    b = f->hash_table[bucket];
    if (b->dirty) {
        off_t off = b->block_number * BLOCK_SIZE;
        pwrite(f->fd, b->data, BLOCK_SIZE, off);
    }

    f->hash_table[bucket] = b->next_hash;
    f->cache_count--;
    return b;
}
```

- **Зачем:** при переполнении кэша освобождает место, выбрав **случайную «корзину»** (и затем конкретный блок) для вытеснения.
- **Как:**
 - i. Генерирует случайное число `rand() % CACHE_CAPACITY`.
 - ii. В выбранной (или последующих) корзинах хеш-таблицы ищет первый доступный (непустой) блок.
 - iii. Если блок «грязный», записывает его на диск.
 - iv. Удаляет найденный блок из хеш-цепочки (и уменьшает `cache_count`).

static CacheBlock* find_block(Lab2File *f, off_t block_num)

```
static CacheBlock* find_block(Lab2File *f, off_t block_num) {
    unsigned i = hash_off(block_num);
    CacheBlock *b = f->hash_table[i];
    while (b) {
        if (b->block_number == block_num) return b;
        b = b->next_hash;
    }
    return NULL;
}
```

- **Зачем:** ищет нужный блок в кэше (хеш-таблице).
- **Как:** берёт индекс корзины через `hash_off(block_num)` и идёт по списку `next_hash`, пока не найдёт блок с номером `block_num`.

static CacheBlock* load_block(Lab2File *f, off_t block_num)

```
static CacheBlock* load_block(Lab2File *f, off_t block_num) {
    if (f->cache_count >= CACHE_CAPACITY) {
        CacheBlock *victim = evict_block(f);
        if (victim) {
            free(victim->data);
            free(victim);
        }
    }
    CacheBlock *b = malloc(sizeof(CacheBlock));
    posix_memalign((void**)&b->data, BLOCK_SIZE, BLOCK_SIZE);
    b->block_number = block_num;
    b->dirty = false;
    b->next_hash = NULL;
    {
        off_t off = block_num * BLOCK_SIZE;
        ssize_t r = pread(f->fd, b->data, BLOCK_SIZE, off);
        if (r < 0) memset(b->data, 0, BLOCK_SIZE);
        else if (r < BLOCK_SIZE) memset(b->data + r, 0, BLOCK_SIZE - r);
    }
    {
        unsigned i = hash_off(block_num);
        b->next_hash = f->hash_table[i];
        f->hash_table[i] = b;
    }
    f->cache_count++;
    return b;
}
```

- **Зачем:** загружает блок из файла в кэш, если блок ещё не в хеш-таблице.
- **Как:**
 - i. Если кэш переполнен (`cache_count == CACHE_CAPACITY`), вызывает `evict_block` , затем освобождает память вытеснённого блока.
 - ii. Выделяет `CacheBlock` и память под `data` .
 - iii. Считывает с диска нужные данные (через `pread`).
 - iv. Добавляет блок в начало цепочки соответствующей корзины `hash_table[i]` .

v. Увеличивает счётчик `cache_count` .

Основные интерфейсные функции

`int lab2_open(const char *path)`

```
int lab2_open(const char *path) {
    static bool seed_initialized = false;
    if (!seed_initialized) {
        srand(time(NULL));
        seed_initialized = true;
    }

    int real_fd = open(path, O_CREAT | O_RDWR | O_DIRECT, 0666);
    if (real_fd < 0) return -1;
    Lab2File *lf = malloc(sizeof(Lab2File));
    memset(lf, 0, sizeof(Lab2File));
    lf->fd = real_fd;
    lf->offset = 0;
    lf->cache_count = 0;
    memset(lf->hash_table, 0, sizeof(lf->hash_table));
    lf->file_size = lseek(real_fd, 0, SEEK_END);
    files[file_index] = lf;
    file_index++;
    return file_index - 1;
}
```

- **Зачем:** открывает (или создаёт) реальный файл и инициализирует структуру `Lab2File` .
- **Как:**
 - i. Инициализирует `rand(...)` при первом вызове, чтобы стратегия вытеснения была действительно «случайной».
 - ii. Вызывает `open` с флагами `O_CREAT | O_RDWR | O_DIRECT` .
 - iii. Выделяет `Lab2File` и обнуляет все поля.
 - iv. Запоминает реальный `fd` , через `lseek` определяет размер файла, кладёт

структуру в глобальный массив `files[]` .

`int lab2_close(int fd)`

```
int lab2_close(int fd) {
    Lab2File *f = get_file(fd);
    if (!f) return -1;
    for (;;) {
        CacheBlock *b = f->hash_table[0];
        if (!b) break;
        if (b->dirty) {
            off_t off = b->block_number * BLOCK_SIZE;
            pwrite(f->fd, b->data, BLOCK_SIZE, off);
        }
        remove_from_hash(f, b);
        free(b->data);
        free(b);
    }
    close(f->fd);
    free(f);
    files[fd] = NULL;
    return 0;
}
```

- **Зачем:** закрывает файл, а также сбрасывает «грязные» блоки на диск и освобождает память.
- **Как:**
 - i. Получает `Lab2File` через `get_file` .
 - ii. В упрощённом варианте — обрабатывает блоки, хранящиеся (по коду) лишь в `hash_table[0]` .
 - iii. Если блок «грязный», выполняет `pwrite` на диск.
 - iv. Удаляет блок из хеш-таблицы, освобождает память.
 - v. Закрывает реальный дескриптор `close(f->fd)` .
 - vi. Удаляет запись из `files[]` .

ssize_t lab2_read(int fd, void *buf, size_t count)

```
ssize_t lab2_read(int fd, void *buf, size_t count) {
    Lab2File *f = get_file(fd);
    if (!f) return -1;

    if (f->offset >= f->file_size) {
        return 0;
    }

    if (f->offset + count > f->file_size) {
        count = f->file_size - f->offset;
    }

    size_t total = 0;
    char *p = buf;
    while (count > 0) {
        off_t bn = f->offset / BLOCK_SIZE;
        size_t off = f->offset % BLOCK_SIZE;
        size_t can_read = BLOCK_SIZE - off;
        if (can_read > count) {
            can_read = count;
        }
        CacheBlock *b = find_block(f, bn);
        if (!b) {
            b = load_block(f, bn);
        }
        memcpy(p, b->data + off, can_read);
        total += can_read;
        p += can_read;
        f->offset += can_read;
        count -= can_read;
    }
    return total;
}
```

- **Зачем:** читать данные из кэша, подгружая нужные блоки, если их нет в хеш-таблице.
- **Как:**

- i. Проверяет, не вышли ли за конец файла.
- ii. При необходимости уменьшает `count`, чтобы не читать «за файл».
- iii. В цикле разбивает чтение на куски размером `BLOCK_SIZE - off` (учитывая смещение внутри блока).
- iv. Если нужного блока нет в кэше, вызывает `load_block`.
- v. Копирует данные из `b->data` в пользовательский буфер.
- vi. Обновляет `offset` и уменьшает `count` до полного чтения.

```
ssize_t lab2_write(int fd, const void *buf, size_t count)
```

```

ssize_t lab2_write(int fd, const void *buf, size_t count) {
    Lab2File *f = get_file(fd);
    if (!f) return -1;
    size_t total = 0;
    const char *p = buf;
    while (count > 0) {
        off_t bn = f->offset / BLOCK_SIZE;
        size_t off = f->offset % BLOCK_SIZE;
        size_t can_write = BLOCK_SIZE - off;
        if (can_write > count) can_write = count;
        CacheBlock *b = find_block(f, bn);
        if (!b) {
            if (off != 0 || can_write < BLOCK_SIZE) b = load_block(f, bn);
            else {
                if (f->cache_count >= CACHE_CAPACITY) {
                    CacheBlock *victim = evict_block(f);
                    if (victim) {
                        free(victim->data);
                        free(victim);
                    }
                }
                b = malloc(sizeof(CacheBlock));
                posix_memalign((void**)&b->data, BLOCK_SIZE, BLOCK_SIZE);
                memset(b->data, 0, BLOCK_SIZE);
                b->block_number = bn;
                b->dirty = false;
                b->next_hash = NULL;
                {
                    unsigned i = hash_off(bn);
                    b->next_hash = f->hash_table[i];
                    f->hash_table[i] = b;
                }
                f->cache_count++;
            }
        }
        memcpy(b->data + off, p, can_write);
        b->dirty = true;
        total += can_write;
        p += can_write;
    }
}

```

```

f->offset += can_write;
if (f->offset > f->file_size) f->file_size = f->offset;
count -= can_write;
if (f->cache_count > CACHE_CAPACITY) {
    CacheBlock *victim = evict_block(f);
    if (victim) {
        free(victim->data);
        free(victim);
    }
}
return total;
}

```

- **Зачем:** записывает данные через кэш, создавая/загружая блоки при необходимости.
- **Как:**
 - i. Разбивает `count` на части, чтобы корректно заполнить блоки (с учётом смещения `off`).
 - ii. Ищет блок в кэше (через `find_block`). Если нет:
 - Если нужно частично изменить блок (не переписывая весь 512/2048/4096 байт), то его подгружают (`load_block`).
 - Если переписывается весь блок, создают новый (при необходимости предварительно вытесняют по `evict_block`).
 - iii. Записывает данные в `b->data`, ставит флаг `dirty = true`.
 - iv. Обновляет `offset` и при необходимости `file_size`.
 - v. Если кэш переполнен, снова вызывает `evict_block`.

off_t lab2_lseek(int fd, off_t offset, int whence)

```
off_t lab2_lseek(int fd, off_t offset, int whence) {
    Lab2File *f = get_file(fd);
    if (!f) return -1;
    off_t new_off;
    if (whence == SEEK_SET) new_off = offset;
    else if (whence == SEEK_CUR) new_off = f->offset + offset;
    else if (whence == SEEK_END) new_off = f->file_size + offset;
    else return -1;
    if (new_off < 0) return -1;
    f->offset = new_off;
    return f->offset;
}
```

- **Зачем:** изменяет «курсор» (смещение) в файле.
- **Как:**
 - i. Вычисляет новое смещение `new_off` в зависимости от `whence`.
 - ii. Проверяет, не ушло ли в «отрицательную» зону.
 - iii. Сохраняет новое смещение в `f->offset`.

int lab2_fsync(int fd)

```
int lab2_fsync(int fd) {
    Lab2File *f = get_file(fd);
    if (!f) return -1;
    CacheBlock *b = f->hash_table[0];
    while (b) {
        if (b->dirty) {
            off_t off = b->block_number * BLOCK_SIZE;
            pwrite(f->fd, b->data, BLOCK_SIZE, off);
            b->dirty = false;
        }
        b = b->next_hash;
    }
    fsync(f->fd);
    return 0;
}
```

- **Зачем:** гарантирует, что «грязные» блоки будут сброшены на диск.
 - **Как:**
 - i. Проходит по цепочке блоков в корзине `hash_table[0]` (в упрощённом примере).
 - ii. Если блок помечен как `dirty`, записывает его (`pwrite`).
 - iii. Сбрасывает системные буферы диска командой `fsync`.
 - iv. Возвращает 0 при успехе или -1 при ошибке.
-

Результаты тестов

```
_,met$$$$$gg.
,g$$$$$$$$$$$$$P.
,g$P"      ""Y$$.
,$$P'      `$$$
',$$P      ,ggs.    `$$b:
`d$$'      ,P"'      .    $$$
$$P        d$'      ,    $$P
$$:        $$      -    ,d$$'
$$;        Y$b._    _ ,d$P'
Y$$        `."Y$$$$P"'
`$$b      "-.____
`Y$$
`Y$$
`$$b.
`Y$$b.
`"Y$b._
`""
```

debian@debian

OS: Debian GNU/Linux 12 (bookworm) aarch64

Host: QEMU Virtual Machine virt-7.2

Kernel: 6.1.0-28-arm64

Uptime: 1 hour, 49 mins

Packages: 1670 (dpkg)

Shell: bash 5.2.15

Resolution: 1800x1126

DE: GNOME 43.9

WM: Mutter

WM Theme: Adwaita

Theme: Adwaita [GTK2/3]

Icons: Adwaita [GTK2/3]

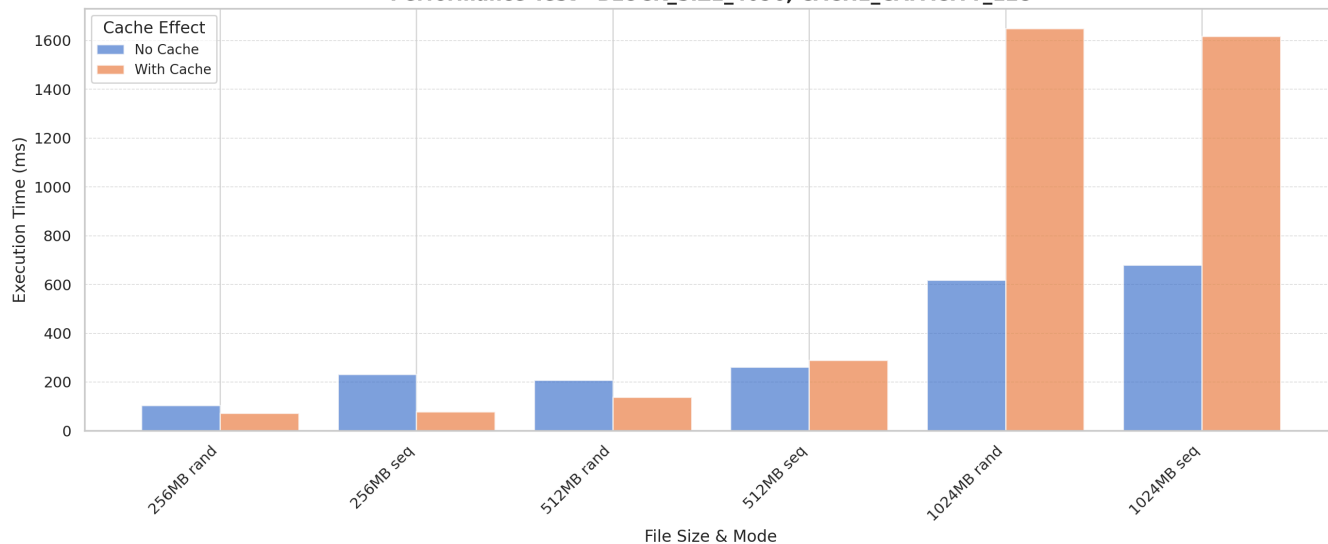
Terminal: vscode

CPU: (6)

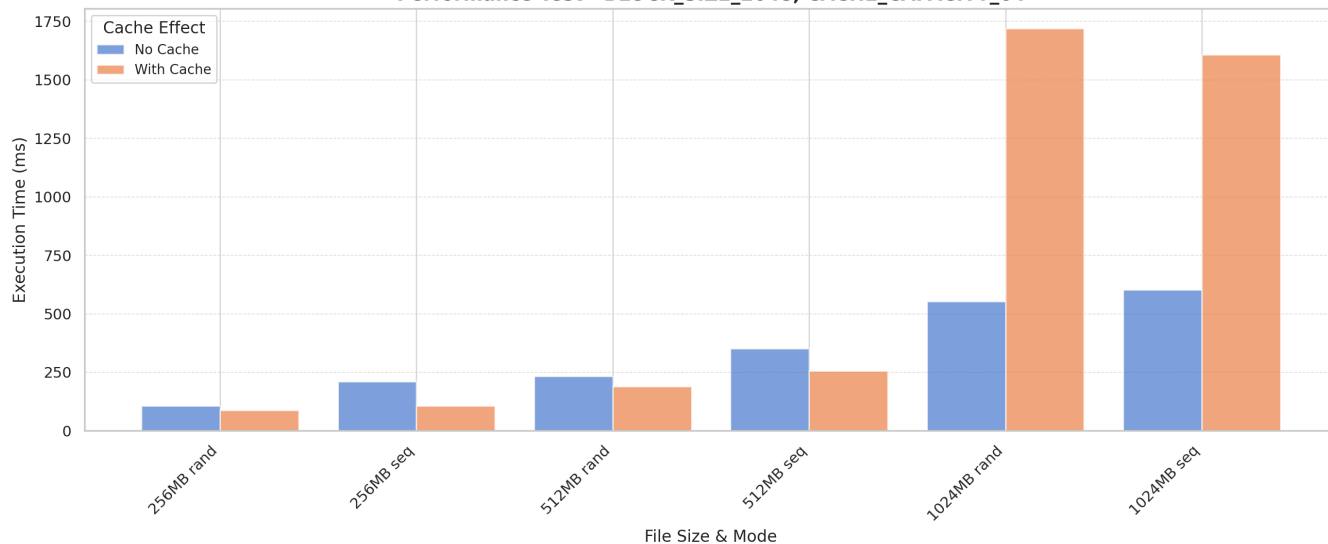
GPU: 00:02.0 Red Hat, Inc. Virtio 1.0 GPU

Memory: 1750MiB / 3921MiB

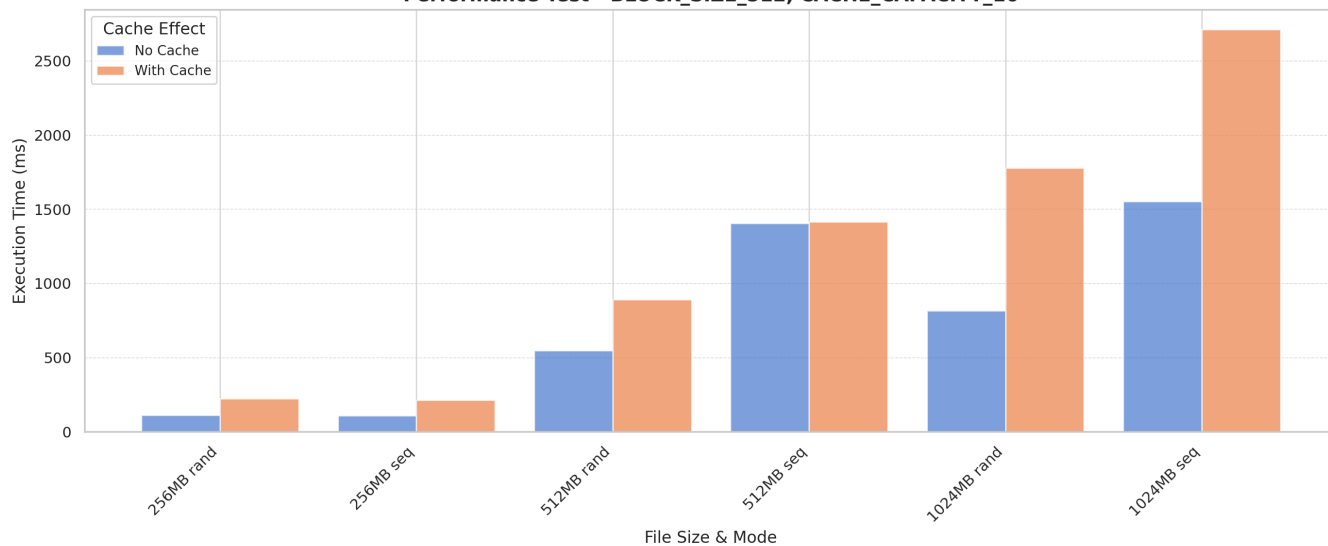
Performance Test - BLOCK_SIZE_4096, CACHE_CAPACITY_128



Performance Test - BLOCK_SIZE_2048, CACHE_CAPACITY_64



Performance Test - BLOCK_SIZE_512, CACHE_CAPACITY_16



```
#define BLOCK_SIZE 4096  
#define CACHE_CAPACITY 128
```

Performance Test Suite

Test 1: Random Cache Performance Test

Description: Evaluating cache performance with different file sizes and access patterns (sequential and random)

Size(MB)	Mode	Run	no_cache(ms)	with_cache(ms)
256	seq	1	491.45	92.18
256	seq	2	101.58	70.16
256	seq	3	102.97	75.17
256	rand	1	121.36	73.42
256	rand	2	100.69	71.99
256	rand	3	93.68	70.88
512	seq	1	292.29	549.92
512	seq	2	238.48	183.01
512	seq	3	256.95	137.56
512	rand	1	211.64	132.88
512	rand	2	208.63	148.89
512	rand	3	202.37	135.70
1024	seq	1	718.32	2042.54
1024	seq	2	787.87	1615.19
1024	seq	3	531.55	1196.86
1024	rand	1	712.03	1654.34
1024	rand	2	504.44	1777.25
1024	rand	3	635.20	1516.78

Test 2: External Integer Sorting Test

Description: Testing the performance of external merge sort implementation for integer arrays

total_ints	chunk_size	sys_time(ms)	lab2_time(ms)
20000	2000	71.76	4.97
50000	5000	133.32	5.73

100000 |

10000 |

301.88 |

17.58

```
#define BLOCK_SIZE 2048
```

```
#define CACHE_CAPACITY 64
```

Performance Test Suite

Test 1: Random Cache Performance Test

Description: Evaluating cache performance with different file sizes and access patterns (sequential and random)

Size(MB)	Mode	Run	no_cache(ms)	with_cache(ms)
256	seq	1	362.07	125.31
256	seq	2	142.81	96.68
256	seq	3	127.58	96.85
256	rand	1	137.56	94.92
256	rand	2	106.46	83.68
256	rand	3	78.35	82.59
512	seq	1	390.22	328.24
512	seq	2	350.88	222.69
512	seq	3	311.98	217.34
512	rand	1	286.27	202.36
512	rand	2	200.31	175.66
512	rand	3	213.97	193.87
1024	seq	1	570.93	1873.10
1024	seq	2	475.44	1664.30
1024	seq	3	765.09	1283.63
1024	rand	1	664.53	1694.84
1024	rand	2	467.26	1592.68
1024	rand	3	524.75	1871.62

Test 2: External Integer Sorting Test

Description: Testing the performance of external merge sort implementation for integer arrays

total_ints	chunk_size	sys_time(ms)	lab2_time(ms)
20000	2000	105.52	7.70
50000	5000	140.38	7.14

100000 |

10000 |

279.05 |

10.49

```
#define BLOCK_SIZE 512
```

```
#define CACHE_CAPACITY 16
```

Performance Test Suite

Test 1: Random Cache Performance Test

Description: Evaluating cache performance with different file sizes and access patterns (sequential and random)

Size(MB)	Mode	Run	no_cache(ms)	with_cache(ms)
256	seq	1	149.61	222.79
256	seq	2	89.89	206.74
256	seq	3	83.98	213.78
256	rand	1	88.78	211.10
256	rand	2	91.68	204.89
256	rand	3	162.25	251.19
512	seq	1	1337.95	2230.27
512	seq	2	2471.07	1319.68
512	seq	3	405.25	692.60
512	rand	1	748.80	927.81
512	rand	2	222.59	969.03
512	rand	3	673.48	774.97
1024	seq	1	2632.20	4022.87
1024	seq	2	1296.18	1643.81
1024	seq	3	727.21	2469.39
1024	rand	1	1621.01	1955.51
1024	rand	2	424.81	1889.53
1024	rand	3	406.25	1496.95

Test 2: External Integer Sorting Test

Description: Testing the performance of external merge sort implementation for integer arrays

total_ints	chunk_size	sys_time(ms)	lab2_time(ms)
20000	2000	66.83	4.16
50000	5000	168.98	15.27

Анализ результатов

1. Test 1 (Random Cache Performance Test)

- При **маленьких файлах** (256 MB, иногда 512 MB) кэш даёт прирост скорости, особенно при BLOCK_SIZE=4096 и CACHE_CAPACITY=128.
- При **больших файлах** (1024 MB) «with_cache» работает **медленнее** «no_cache» из-за частых промахов и копирования блоков.
- С уменьшением **BLOCK_SIZE** и **CACHE_CAPACITY** (512 байт и 16 блоков) кэш может замедлять работу, так как блоки часто вытесняются.

2. Test 2 (External Integer Sorting Test)

- Везде «lab2_time» **быстрее** «sys_time», значит, пользовательский кэш эффективнее системного.
- С ростом количества данных общее время увеличивается, но **разница между методами сохраняется**.

Выводы

- **Кэш с стратегией Random полезен** для средних размеров файлов, но теряет эффективность при больших объёмах и случайном вытеснении.
- **Выбор BLOCK_SIZE и CACHE_CAPACITY критичен** – слишком маленькие или большие значения могут ухудшить результат.
- **Внешняя сортировка выигрывает** от пользовательского кэша, так как доступ к данным предсказуем.
- **Random вытеснение не всегда удачно** – может убирать нужные блоки, снижая производительность.

В целом, кэш с стратегией Random ускоряет работу при повторных обращениях, но его настройки должны соответствовать размеру данных.