

SOI: [1.1/TAS](#) DOI: [10.15863/TAS](#)
International Scientific Journal
Theoretical & Applied Science
p-ISSN: 2308-4944 (print) e-ISSN: 2409-0085 (online)
Year: 2024 Issue: 12 Volume: 140
Published: 16.12.2024 <http://T-Science.org>

Issue

Article



Konstantin Andreevich Bondarenko
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
Bachelor

Anatoliy Sergeev
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
Candidate of Engineering Sciences, Docent

COMPARISON OF MEMORY PERFORMANCE OF DOCKER CONTAINERS AND THE LINUX OPERATING SYSTEM

Abstract: This article presents a study of the performance of RAM operations and disk read/write speed in the Linux operating system. The testing was conducted in two environments: directly on the host system and within Docker containers. The study highlights the impact of containerization on performance. The results reveal the reasons for the performance differences, associated with virtualization overhead and limitations of the file system used. The findings can be useful for optimizing application performance in containerized environments.

Key words: Virtualization, Linux, Hypervisors, VMware Workstation, Oracle VirtualBox, RAM, Disk, Virtual Machines, Performance Testing.

Language: Russian

Citation: Bondarenko, K.A., & Sergeev, A. (2024). Comparison of memory performance of docker containers and the linux operating system. *ISJ Theoretical & Applied Science*, 12 (140), 121-132.

Soi: <http://s-o-i.org/1.1/TAS-12-140-22> **Doi:** <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2024.12.140.22>

Scopus ASCC: 1701.

СПРАВНЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С ПАМЯТЬЮ КОНТЕЙНЕРОВ DOCKER И ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ LINUX

Аннотация: В статье представлено исследование производительности операций с оперативной памятью, а также скорости чтения и записи данных на дисковую подсистему в операционной системе Linux. Тестирование проводилось в двух средах: непосредственно на хостовой системе и внутри контейнеров Docker. Показаны особенности влияния контейнеризации на производительность. В результате работы выявлены причины различий в скорости операций, связанные с накладными расходами виртуализации и ограничениями используемой файловой системы. Полученные данные могут быть полезны для оптимизации работы приложений в контейнерных средах.

Ключевые слова: docker, контейнеры, оперативная память, дисковая подсистема, Linux, производительность, виртуализация, файловая система.

Введение

Современные вычислительные системы требуют эффективного управления аппаратными ресурсами, включая процессоры, оперативную память и устройства хранения данных. Виртуализация и контейнеризация стали основными подходами для оптимального использования этих ресурсов, предоставляя гибкость, масштабируемость и изоляцию.

Однако эти технологии накладывают определённые накладные расходы, которые могут сказываться на производительности приложений.

Контейнеризация, представленная такими технологиями, как Docker [1], — это метод изоляции приложений, где каждая программа и её зависимости запускаются в лёгкой среде, называемой контейнером. В отличие от

Impact Factor:	ISRA (India)	= 6.317	SIS (USA)	= 0.912	ICV (Poland)	= 6.630
	ISI (Dubai, UAE)	= 1.582	ПИИЦ (Russia)	= 0.191	PIF (India)	= 1.940
	GIF (Australia)	= 0.564	ESJI (KZ)	= 8.100	IBI (India)	= 4.260
	JIF	= 1.500	SJIF (Morocco)	= 7.184	OAJI (USA)	= 0.350

виртуальных машин, контейнеры используют общий ресурс хостовой системы и могут запускаться быстрее за счет минимизации накладных расходов. Однако стоит учитывать, что на хосте с Windows контейнеры Docker обычно работают через подсистему для Linux (WSL) или с использованием виртуальной машины на базе Linux, что добавляет дополнительные уровни абстракции. Docker стал одним из самых популярных инструментов для работы с контейнерами благодаря своей удобной экосистеме и поддержке множества платформ.

Несмотря на широкое применение технологий виртуализации и контейнеризации, существует необходимость в детальном анализе их производительности. Исследования [2, 3] показывают, что производительность систем виртуализации и контейнеризации может варьироваться в зависимости от их конфигурации, операционной системы и типа нагрузки. Например, работа [4] сравнивает гипервизоры и лёгкую виртуализацию, подчёркивая их различные преимущества и недостатки в контексте производительности. В другой работе [5] анализируются возможности контейнеров в HPC-средах.

В исследовании [6] анализировалась производительность выполнения операций с целыми и действительными числами в операционной системе Windows, сравнивая работу в контейнерах Docker и непосредственно на хосте. Авторы пришли к выводу, что увеличение числа контейнеров приводит к снижению производительности. Кроме того, было установлено, что для однопоточных ресурсоёмких задач количество контейнеров не должно превышать количество ядер процессора, чтобы избежать дополнительных потерь эффективности.

Таким образом, исследование производительности Docker-контейнеров в средах Windows имеет важное значение как с теоретической, так и с практической точки зрения. Данная работа направлена на исследование производительности операций чтения и записи данных в системах хранения и оперативной памяти при выполнении задач на хостовой системе и в контейнерах Docker. Для тестирования использовался популярный инструмент Sysbench [7], позволяющий имитировать интенсивные нагрузки и измерять параметры производительности. Анализ подобных тестов позволяет понять, как контейнеризация влияет на управление ресурсами и какие настройки могут оптимизировать производительность приложений в виртуальных средах.

В рамках данной работы также изучалось влияние увеличения числа параллельных экземпляров процессов на производительность, а также влияние различных параметров

конфигурации, таких как размер блока данных и количество файлов.

Подход к тестированию

Характеристики хоста, на котором проводилось тестирование:

- OS: Ubuntu 22.04.5 LTS
- CPU: Intel(R) Core (TM) i5-8250U (4 ядра, 8 потоков, L1 64 Kб, L2 256 Kб, L3 6 Mб)
- Оперативная память: 8 GB DDR4-2400 МГц
- Диск: NVMe 3.0 PCIe 3.0 x4, M.2 2280, SSD KINGSTON SA2000M81000G (HFS256GD9TNG-62A0A) (1000 GB)
- Файловая система: Ext4
- Docker: версия 27.3.0

Каждый тест запускался 3 раза, после чего считалось среднее количественное значение характеристик из записывалось в итоговую таблицу.

В данной системе использовался NVMe SSD, что делает её подходящей для тестов, требующих высокой скорости операций с дисками. NVMe (Non-Volatile Memory Express) представляет собой современный протокол передачи данных для твердотельных накопителей, разработанный специально для интерфейса PCI Express (PCIe). Основные преимущества NVMe, которые обусловили его выбор:

- Высокая пропускная способность — до 3–7 Гб/с, что значительно превышает возможности интерфейса SATA (600 Мб/с).
- Минимальные задержки — благодаря прямой связи накопителя с процессором, без участия промежуточных контроллеров.
- Многопоточность — поддержка тысяч очередей команд, каждая из которых способна обрабатывать до 64 тысяч операций, что особенно важно для систем с высокой нагрузкой.

Для выполнения тестов была выбрана утилита sysbench — универсальный инструмент для анализа производительности. Эта утилита позволяет моделировать различные виды нагрузок, что делает её популярным выбором для оценки работы серверных систем.

Основные функции sysbench:

- Тестирование процессора (CPU)
- Тестирование памяти
- Тестирование ввода-вывода (I/O)
- Тестирование файловой системы
- Тестирование баз данных

Использование sysbench позволяет проводить комплексные исследования системы, сравнивая

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
 ISI (Dubai, UAE) = 1.582
 GIF (Australia) = 0.564
 JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
 ПИНЦ (Russia) = 0.191
 ESJI (KZ) = 8.100
 SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
 PIF (India) = 1.940
 IBI (India) = 4.260
 OAJI (USA) = 0.350

результаты тестов при различных конфигурациях и условиях. Интеграция тестов дисковой подсистемы, процессора и памяти в рамках одного инструмента упрощает анализ и интерпретацию результатов.

В работе были использованы два типа тестов: тест производительности оперативной памяти и тест ввода-вывода файловой системы. Оба теста обеспечивают комплексный подход к оценке производительности системы, позволяя детально анализировать как оперативную память, так и файловую подсистему. Такой подход даёт возможность выявить особенности работы оборудования и программного обеспечения в условиях интенсивной нагрузки.

Тестирование памяти (sysbench memory)

Данный тест предназначен для измерения пропускной способности оперативной памяти. Он позволяет оценить, насколько быстро система справляется с операциями чтения и записи в память. Основной метрикой теста является скорость выполнения операций, которая отображает эффективность работы подсистемы памяти.

Основные параметры настройки теста:

- --memory-block-size — размер блока данных для одной операции
- --memory-total-size — общий объём данных для операций чтения или записи.
- --memory-oper — тип выполняемых операций (чтение или запись).

Тестирование памяти особенно актуально для задач, связанных с вычислениями, интенсивно использующими оперативную память, и помогает выявить потенциальные узкие места в производительности системы.

Тестирование файловой системы (sysbench fileio)

Этот тест предназначен для анализа производительности ввода-вывода (I/O) файловой

системы, оценивая, насколько эффективно система справляется с операциями чтения и записи, включая случайный доступ к файлам. Полученные результаты дают представление о том, как файловая система ведёт себя под нагрузкой, а также выявляют зависимость производительности от используемой конфигурации оборудования.

Основные параметры настройки теста:

- --file-num — количество создаваемых файлов
- --file-total-size — общий размер создаваемых файлов
- --file-block-size — размер блока данных для одной операции
- --file-test-mode — режим работы теста
- --file-extra-flags — дополнительные флаги

Тестирование оперативной памяти

Тестирование оперативной памяти проводилось в среде Ubuntu 22.04 с использованием утилиты sysbench. Основная цель заключалась в оценке производительности чтения и записи данных при использовании различных размеров блока (1 КБ, 1 МБ, 1 ГБ) в трёх сценариях: выполнение операций на хосте с одним, двумя и тремя экземплярами sysbench, а также в контейнерах Docker с аналогичным числом экземпляров. Для каждого блока тестов выполнялись команды:

1. Чтение и запись блоками по 1 КБ
 sysbench memory --memory-block-size=1K --memory-oper=read/write run
2. Чтение и запись блоками по 1 МБ
 sysbench memory --memory-block-size=1M --memory-oper=read/write run
3. Чтение и запись блоками по 1 ГБ
 sysbench memory --memory-block-size=1G --memory-oper=read/write run

Результаты представлены в таблицах (табл. 1-3) и графиках (рис. 1-6).

Таблица 1. Результат тестирования памяти с размером блока 1 КБ

Операция		Размер блока – 1 КБ, общий размер данных – 50 ГБ					
		Host 1 экз.	Host 2 экз.	Host 3 экз.	Docker 1 конт.	Docker 2 конт.	Docker 3 конт.
Чтение	Операций/сек	6812375.43	6538956.21	6274510.56	5886625.72	5562319.89	5304233.83
	Мб/сек	6664.48	6387.88	6121.23	5748.66	5431.95	5179.92
Запись	Операций/сек	5982143.67	5761945.28	5524589.91	5110202.49	4823559.74	4497117.96
	Мб/сек	5856.02	5631.87	5400.97	4990.43	4710.51	4391.72

Impact Factor:

ISRA (India)	= 6.317	SIS (USA)	= 0.912	ICV (Poland)	= 6.630
ISI (Dubai, UAE)	= 1.582	ПИИЦ (Russia)	= 0.191	PIF (India)	= 1.940
GIF (Australia)	= 0.564	ESJI (KZ)	= 8.100	IBI (India)	= 4.260
JIF	= 1.500	SJIF (Morocco)	= 7.184	OAJI (USA)	= 0.350

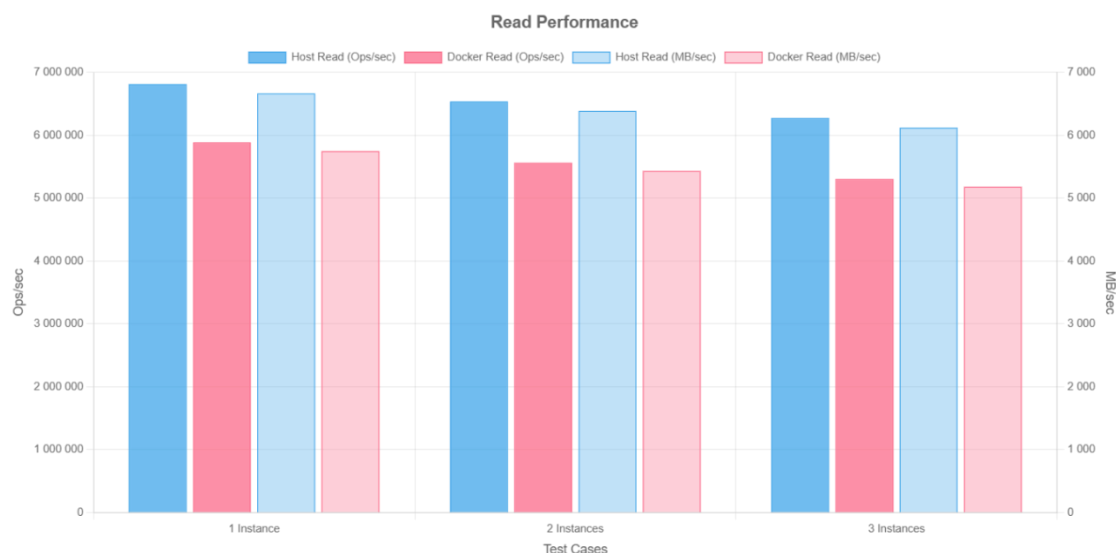


Рисунок 1. Результат тестирования памяти с размером блока 1 КБ для чтения

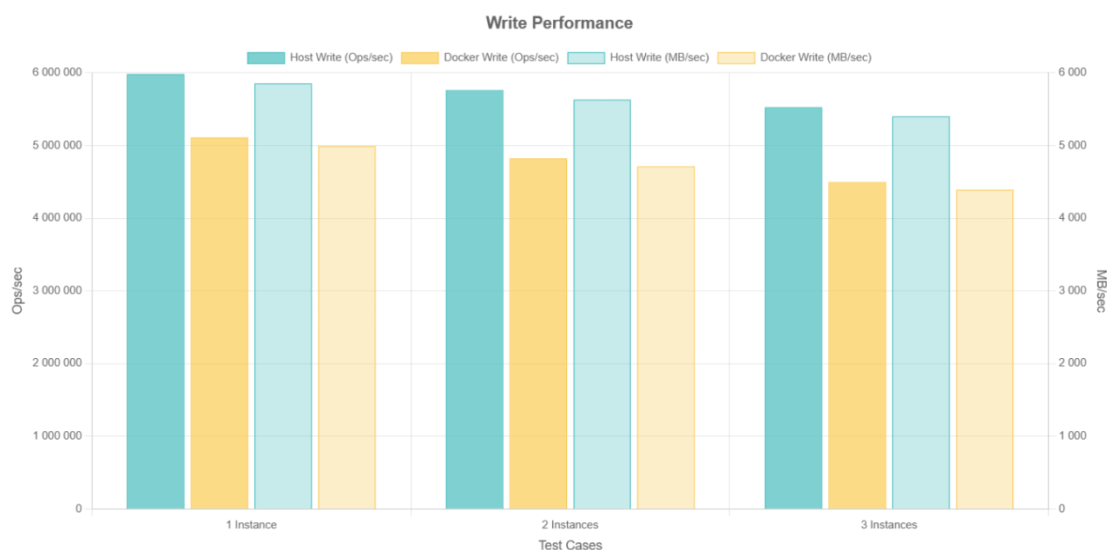


Рисунок 2. Результат тестирования памяти с размером блока 1 КБ для записи

Таблица 2. Результат тестирования памяти с размером блока 1 МБ

Операция		Размер блока – 1 МБ, общий размер данных – 50 ГБ					
		Host 1 экз.	Host 2 экз.	Host 3 экз.	Docker 1 конт.	Docker 2 конт.	Docker 3 конт.
Чтение	Операций/сек	24983.92	23456.11	22123.73	22063.19	21456.77	20076.45
	Мб/сек	24983.92	23456.11	22123.73	22063.19	21456.77	20076.45
Запись	Операций/сек	22347.56	21209.24	19865.89	19079.31	16959.41	15572.64
	Мб/сек	22347.56	21209.24	19865.89	19079.31	16959.41	15572.64

Impact Factor:

ISRA (India)	= 6.317	SIS (USA)	= 0.912	ICV (Poland)	= 6.630
ISI (Dubai, UAE)	= 1.582	ПИИЦ (Russia)	= 0.191	PIF (India)	= 1.940
GIF (Australia)	= 0.564	ESJI (KZ)	= 8.100	IBI (India)	= 4.260
JIF	= 1.500	SJIF (Morocco)	= 7.184	OAJI (USA)	= 0.350

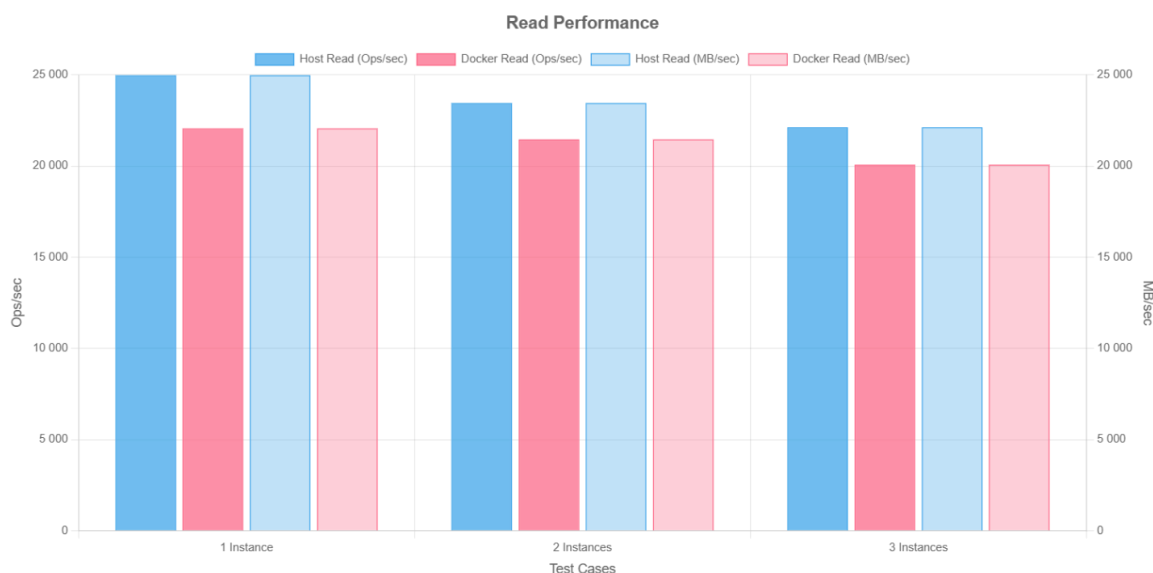


Рисунок 3. Результат тестирования памяти с размером блока 1 МБ для чтения

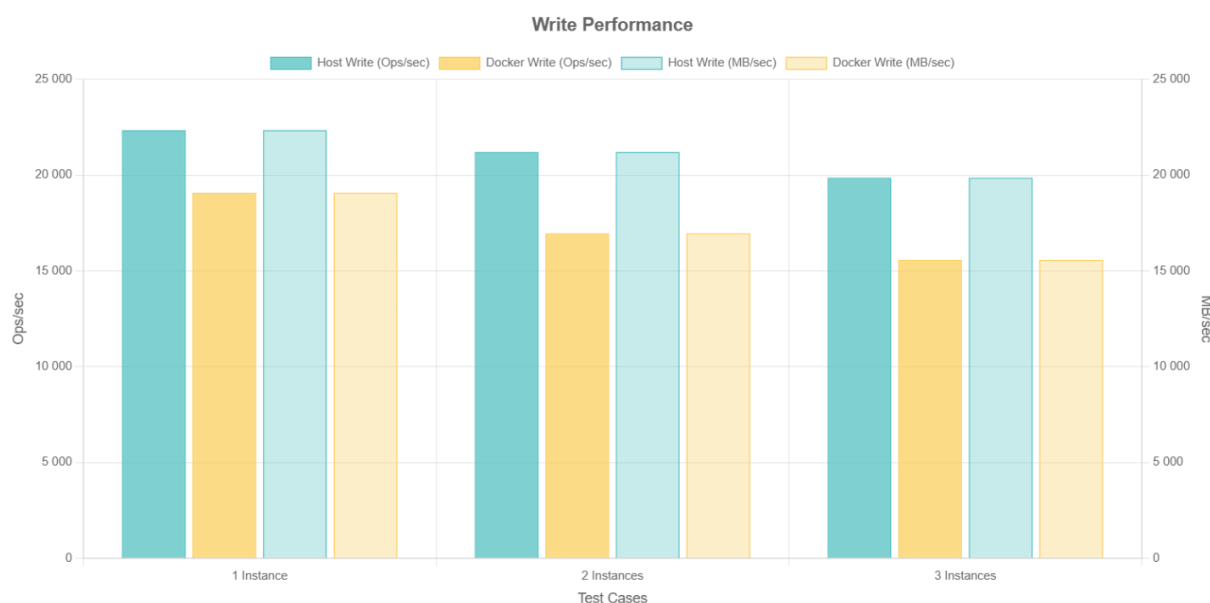


Рисунок 4. Результат тестирования памяти с размером блока 1 МБ для записи

Таблица 3. Результат тестирования памяти с размером блока 1 ГБ

Операция		Размер блока – 1 ГБ, общий размер данных – 50 ГБ					
		Host 1 экз.	Host 2 экз.	Host 3 экз.	Docker 1 конт.	Docker 2 конт.	Docker 3 конт.
Чтение	Операций/сек	13.02	9.98	8.27	11.25	7.25	6.84
	Мб/сек	13312.48	10120.00	8448.00	11516.84	7421.64	6999.28
Запись	Операций/сек	11.45	8.31	7.13	10.95	5.42	4.09
	Мб/сек	11642.57	8529.62	7320.53	11212.10	5548.00	4186.10

Impact Factor:

ISRA (India)	= 6.317	SIS (USA)	= 0.912	ICV (Poland)	= 6.630
ISI (Dubai, UAE)	= 1.582	ПИИЦ (Russia)	= 0.191	PIF (India)	= 1.940
GIF (Australia)	= 0.564	ESJI (KZ)	= 8.100	IBI (India)	= 4.260
JIF	= 1.500	SJIF (Morocco)	= 7.184	OAJI (USA)	= 0.350

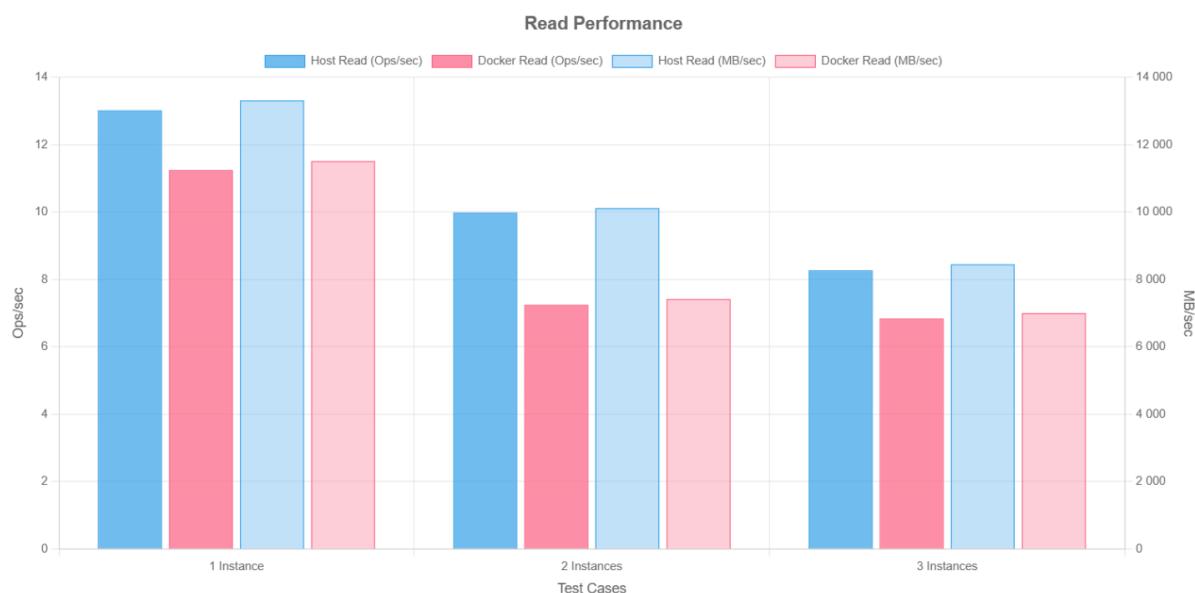


Рисунок 5. Результат тестирования памяти с размером блока 1 ГБ для чтения

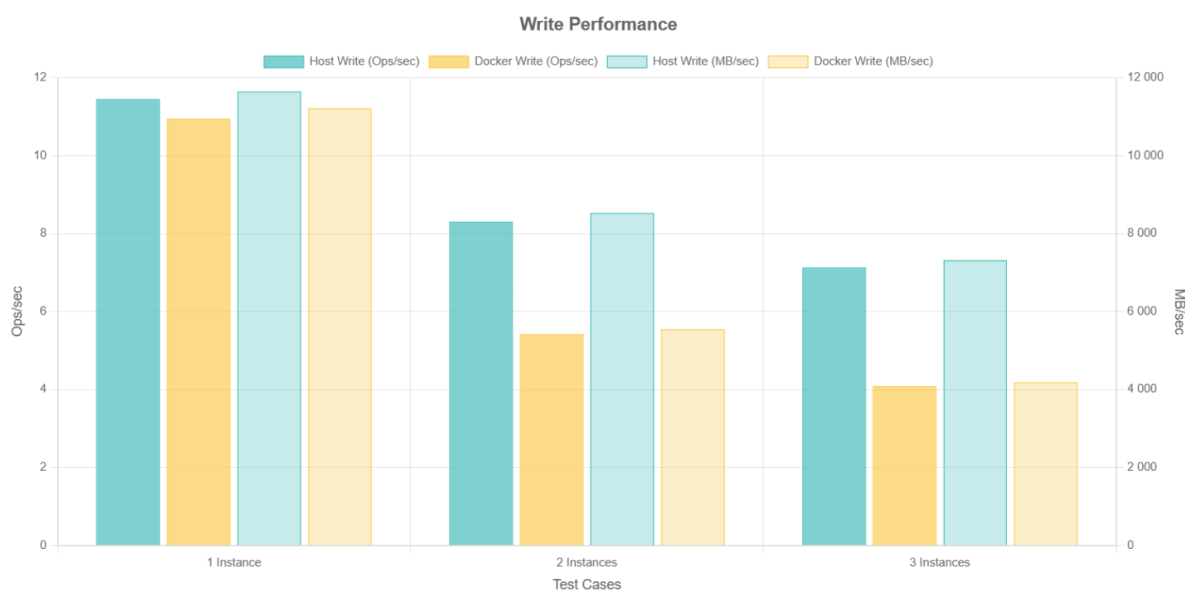


Рисунок 6. Результат тестирования памяти с размером блока 1 ГБ для записи

Выводы по результатам тестирования оперативной памяти

На хосте показатели чтения и записи выше, чем в Docker-контейнерах, что подтверждается данными исследования [8]. Это связано с накладными расходами контейнеризации. Docker использует слой абстракции, который усложняет доступ к аппаратным ресурсам, что замедляет операции. При увеличении числа экземпляров производительность падает, так как ресурсы системы распределяются между процессами, увеличивается конкуренция за доступ к памяти и шине данных, а также возрастает нагрузка на операционную систему и Docker для управления потоками.

С увеличением размера блока от 1 КБ до 1 МБ производительность по количеству операций снижается, но общая скорость передачи данных растет. Это связано с уменьшением количества операций, необходимых для передачи больших объемов данных. При переходе к размеру блока 1 ГБ наблюдается спад как числа операций, так и скорости передачи данных. Это объясняется увеличением нагрузки на оперативную память, снижением эффективности кэширования и ростом времени обработки больших блоков данных [2, 9].

Чтение быстрее записи, так как запись требует дополнительных действий, таких как модификация данных в памяти и их синхронизация.

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
ISI (Dubai, UAE) = 1.582
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
РИИЦ (Russia) = 0.191
ESJI (KZ) = 8.100
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

Спад производительности при размере блока 1 ГБ наиболее значителен, так как система испытывает высокую нагрузку из-за больших объемов данных, требующих обработки и передачи. Это также связано с ограничениями процессорного кэша, который неэффективно работает с большими блоками.

Динамика изменения производительности с изменением размера блока

1 КБ — низкая производительность.

Маленькие блоки данных требуют выполнения большего количества операций чтения или записи для обработки того же объема информации. Это увеличивает накладные расходы на выполнение системных вызовов, переключение контекста, управление памятью и кэшем процессора. Результат — перегрузка системы, сниженная пропускная способность и более низкая производительность.

1 МБ — оптимальная производительность.

Размер блока 1 МБ обеспечивает хороший баланс между числом операций и объемом данных, обрабатываемых за раз. Это позволяет эффективно использовать кэш процессора и минимизировать накладные расходы на управление. Такой размер блока позволяет системе работать максимально продуктивно при минимальных затратах на каждую операцию.

1 ГБ — снижение производительности.

Очень большие блоки требуют значительных затрат ресурсов для обработки. Например, при чтении или записи таких объемов система может столкнуться с задержками в оперативной памяти, увеличением времени доступа к данным или сложностями с их временной буферизацией. Это связано с тем, что размер блока в 1 ГБ значительно превышает объем кэша процессора (L1, L2, L3), который используется для ускорения доступа к данным.

В работах [10, 11] подчеркивается, что размер блока, превышающий объем кэша процессора (L3), приводит к большому числу промахов кэша (это ситуация, когда процессор запрашивает данные, которых нет в кэше), что вынуждает процессор обращаться к оперативной памяти, доступ к которой значительно медленнее. Кроме того, управление таким объемом данных требует значительных накладных расходов со стороны операционной системы, включая выделение памяти, переключение контекста. Эти факторы в совокупности приводят к увеличению времени обработки и снижению общей производительности.

Для наглядной демонстрации изменения производительности в зависимости от размера блока данные представлены на графиках (рис. 7-8).

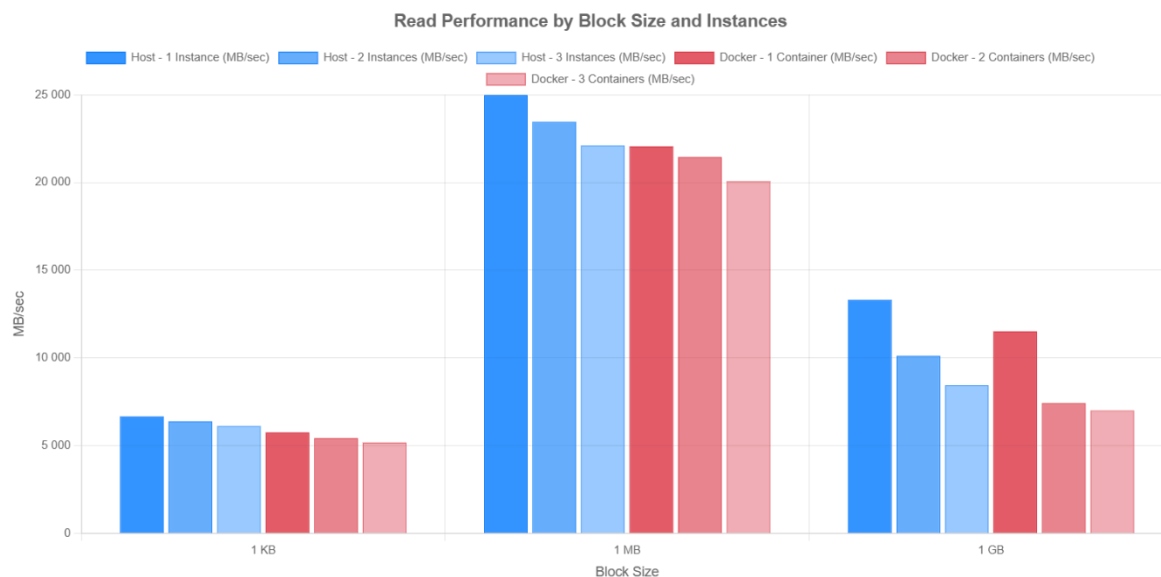


Рисунок 7. Динамика производительности операций чтения в зависимости от размера блока

Impact Factor:

ISRA (India)	= 6.317	SIS (USA)	= 0.912	ICV (Poland)	= 6.630
ISI (Dubai, UAE)	= 1.582	ПИИЦ (Russia)	= 0.191	PIF (India)	= 1.940
GIF (Australia)	= 0.564	ESJI (KZ)	= 8.100	IBI (India)	= 4.260
JIF	= 1.500	SJIF (Morocco)	= 7.184	OAJI (USA)	= 0.350

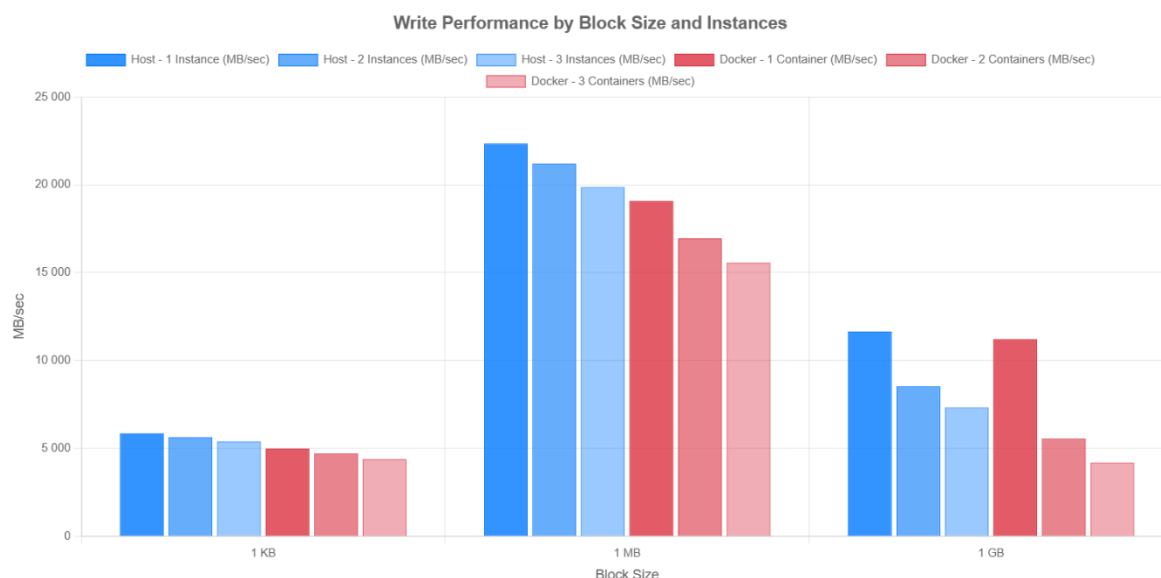


Рисунок 8. Динамика производительности операций записи в зависимости от размера блока

Тестирование скорости записи и чтения данных на жёсткий диск

Тестирования диска проводилось с файлами малого и большого размера. Для начала их нужно было подготовить с помощью следующих команды:

- создание 128 файлов общим размером 5 ГБ: `sysbench fileio --file-total-size=5G prepare`
- создание 1 файла размером 5 ГБ: `sysbench fileio --file-num=1 --file-total-size=5G prepare`

Режим тестирования - случайное чтение (rndrd) и случайная запись (rndwr). Для каждого блока тестов выполнялись команды:

- для чтения и записи 128 файлов общим размером 5 ГБ
`sysbench fileio --file-total-size=5G --file-extra-flags=direct --file-test-mode=rndrd/rndwr run`
- для чтения и записи 1 файла размером 5 ГБ
`sysbench fileio --file-num=1 --file-total-size=5G --file-extra-flags=direct --file-test-mode=rndrd/rndwr run`

Результаты тестирования продемонстрированы в таблицах (табл. 4-5) и графиках (рис. 9-12).

Таблица 4. Результат тестирования операций чтения записи для 128 файлов общим размером 5 ГБ

Операция		Всего файлов - 128, общий размер файлов – 5 ГБ					
		Host 1 экз.	Host 2 экз.	Host 3 экз.	Docker 1 конт.	Docker 2 конт.	Docker 3 конт.
Чтение	Операций/сек	15230.56	14624.34	13891.48	11816.64	11612.58	11022.45
	Мб/сек	237.97	228.50	217.05	184.64	181.45	172.23
Запись	Операций/сек	4820.34	4302.15	3786.45	2884.76	2392.70	2125.25
	Мб/сек	75.31	67.21	59.16	45.07	37.39	33.21

Impact Factor:

ISRA (India)	= 6.317	SIS (USA)	= 0.912	ICV (Poland)	= 6.630
ISI (Dubai, UAE)	= 1.582	ПИИЦ (Russia)	= 0.191	PIF (India)	= 1.940
GIF (Australia)	= 0.564	ESJI (KZ)	= 8.100	IBI (India)	= 4.260
JIF	= 1.500	SJIF (Morocco)	= 7.184	OAJI (USA)	= 0.350

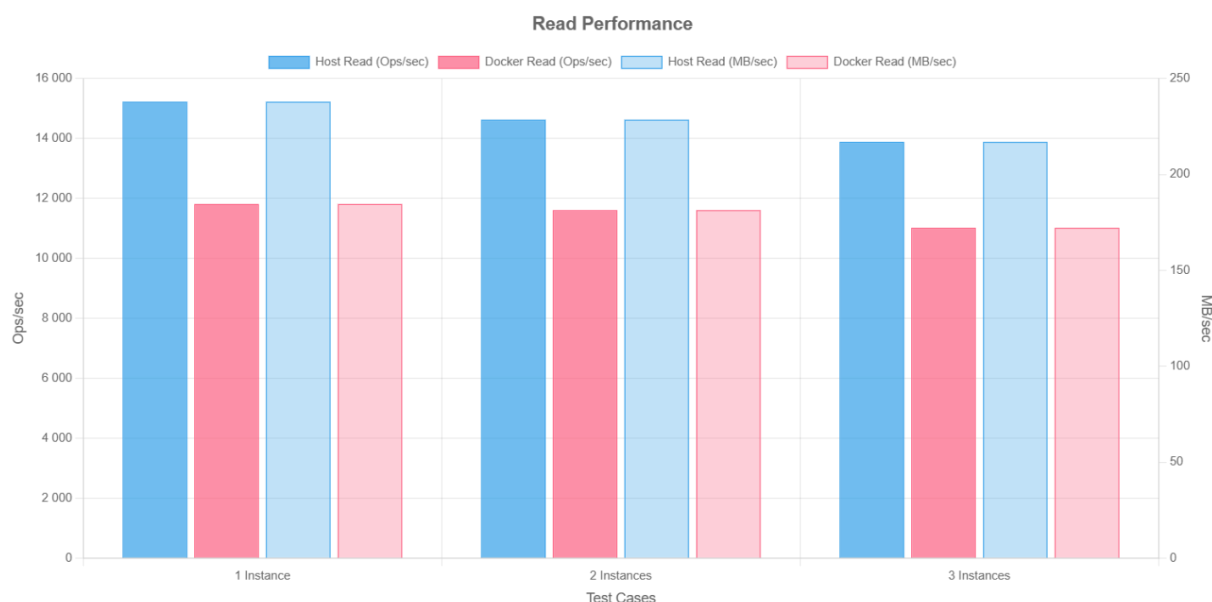


Рисунок 9. Результат тестирования операции случайной записи 128 файлов общим размером 5 Гб

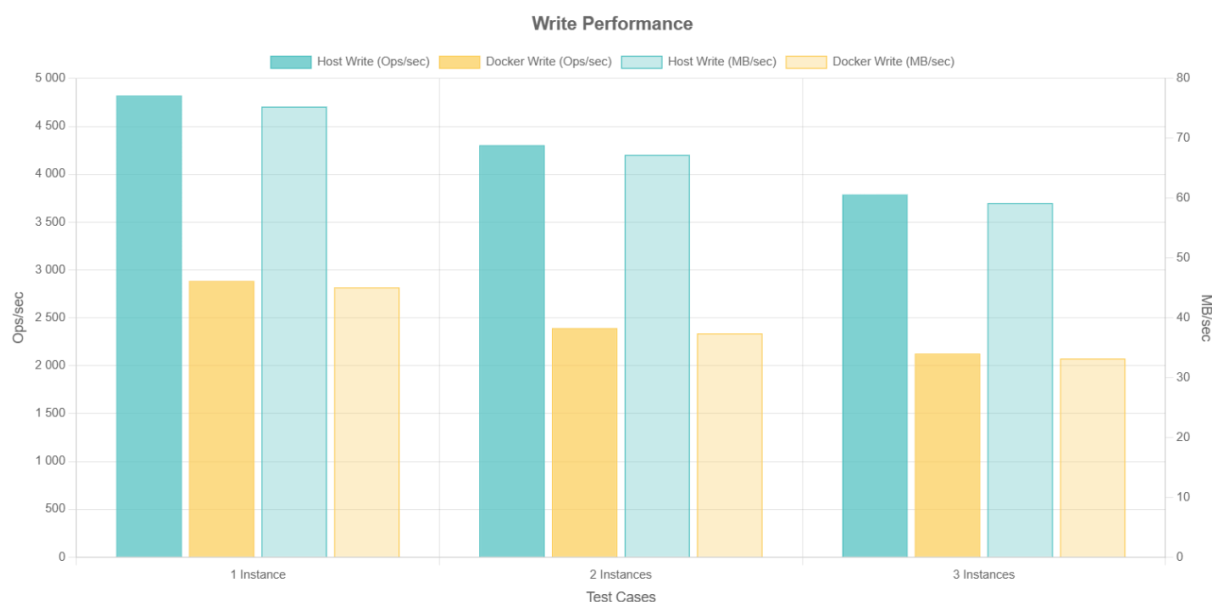


Рисунок 10. Результат тестирования операции случайного чтения 128 файлов общим размером 5 Гб

Таблица 4. Результат тестирования операций чтения записи для 1 файла размером 5 Гб

Операция		Всего файлов - 1, общий размер файлов – 5 Гб					
		Host 1 экз.	Host 2 экз.	Host 3 экз.	Docker 1 конт.	Docker 2 конт.	Docker 3 конт.
Чтение	Операций/сек	16789.34	15354.21	14022.87	11819.44	10211.13	8622.87
	Мб/сек	262.33	239.91	219.10	184.68	167.75	136.92
Запись	Операций/сек	7124.50	6098.45	5126.78	5234.04	4128.03	3408.08
	Мб/сек	111.38	95.28	80.11	81.78	64.50	53.25

Impact Factor:

ISRA (India)	= 6.317	SIS (USA)	= 0.912	ICV (Poland)	= 6.630
ISI (Dubai, UAE)	= 1.582	ПИИЦ (Russia)	= 0.191	PIF (India)	= 1.940
GIF (Australia)	= 0.564	ESJI (KZ)	= 8.100	IBI (India)	= 4.260
JIF	= 1.500	SJIF (Morocco)	= 7.184	OAJI (USA)	= 0.350

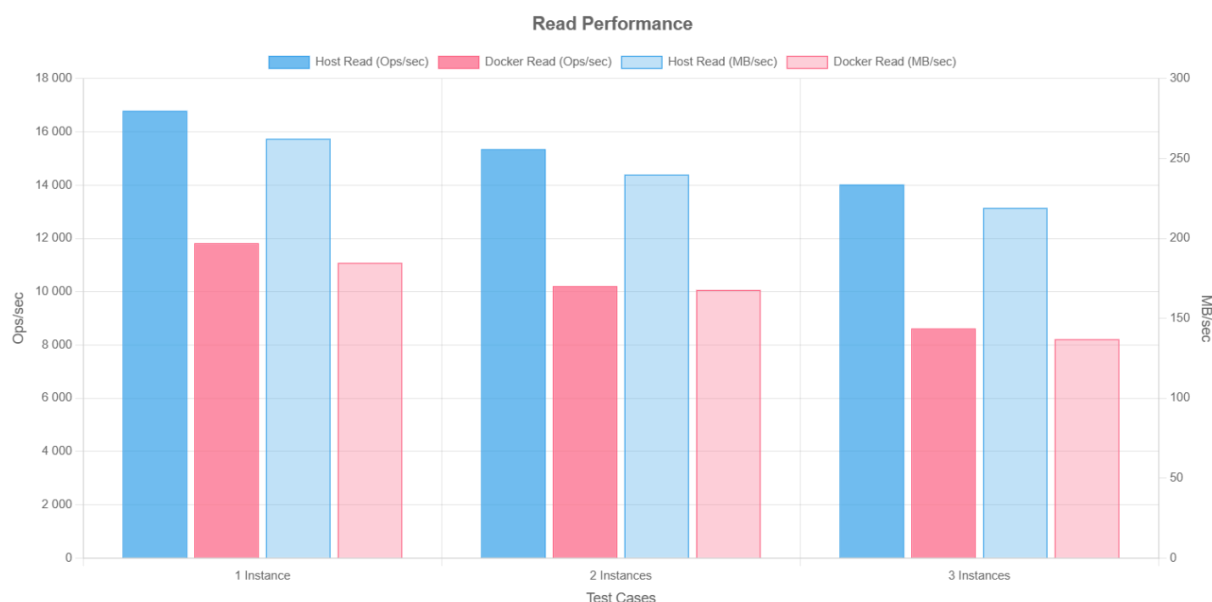


Рисунок 11. Результат тестирования операции случайного чтения 1 файла размером 5 ГБ

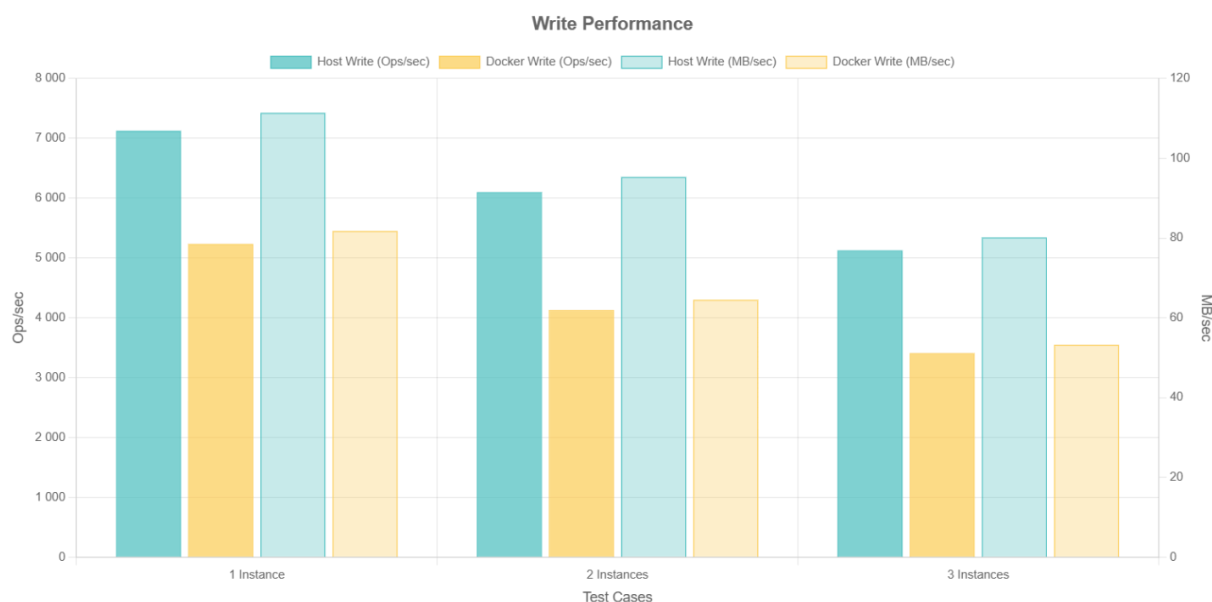


Рисунок 12. Результат тестирования операции случайной записи 1 файла размером 5 ГБ

Выводы по результатам тестирования оперативной памяти

На хосте результаты оказались лучше, чем в контейнерах Docker. Это объясняется дополнительными накладными расходами виртуализации и особенностями работы файловой системы overlay2, которая использует механизм Copy-on-Write. Этот механизм подразумевает, что изменения данных не записываются напрямую, а создаются новые слои, что увеличивает нагрузку на систему ввода-вывода. Различие в производительности также связано с тем, что операции ввода-вывода в контейнерах проходят через слои абстракции, усложняя доступ к аппаратным ресурсам. Подобное влияние

виртуализации на производительность подробно рассмотрено в исследованиях, посвященных сравнению Docker и традиционных гипервизоров. Эти работы отмечают увеличение накладных расходов при высокой нагрузке на дисковую подсистему, что особенно заметно в контейнерах Docker [4], что согласуется с характерной спецификой файловых систем. Операции записи требуют выполнения дополнительных действий, таких как управление журналом изменений и синхронизация данных.

В процессе тестирования выявлено, что производительность при работе с одним большим файлом выше, чем при использовании множества

Impact Factor:	ISRA (India)	= 6.317	SIS (USA)	= 0.912	ICV (Poland)	= 6.630
	ISI (Dubai, UAE)	= 1.582	РИИЦ (Russia)	= 0.191	PIF (India)	= 1.940
	GIF (Australia)	= 0.564	ESJI (KZ)	= 8.100	IBI (India)	= 4.260
	JIF	= 1.500	SJIF (Morocco)	= 7.184	OAJI (USA)	= 0.350

небольших файлов. Это объясняется снижением количества операций по управлению файлами.

Разница между хостом и контейнерами более заметна при большем количестве экземпляров, так как накладные расходы контейнеризации усиливают падение производительности. Кроме того, интерфейс NVMe, используемый для связи с SSD-диском, предоставляет высокую пропускную способность и низкие задержки за счет оптимизации обработки запросов на уровне драйверов и архитектуры операционной системы. Однако в контейнерах Docker на базе Linux эти возможности могут использоваться не полностью из-за особенностей виртуализации и абстракции ввода-вывода. Например, драйверы и файловая система контейнеров не всегда напрямую взаимодействуют с аппаратным обеспечением, что увеличивает накладные расходы и снижает производительность при высокой нагрузке. Подобное ограничение подтверждено в работе [9], где также отмечено, что производительность дисковой подсистемы контейнеров при высоких нагрузках заметно уступает нативным средам.

При попытке создать 128 файлов общим объемом 50 ГБ в контейнере Docker процесс неожиданно столкнулся с проблемами: создание файлов замедлялось, а на этапе 60–70 файла система зависла. Вероятной причиной этого стало сочетание ограничений файловой системы overlay2 [12] и механизма Copy-on-Write [13]. Этот механизм позволяет создавать копии данных только при их изменении, что экономит ресурсы и ускоряет операции в случае неизменяемых данных. Однако, при частых модификациях или записи большого объема данных, Copy-on-Write может приводить к дополнительным затратам на копирование и снижению производительности. При создании большого числа больших файлов обновление метаданных и слоев вызывает дополнительные операции записи, что увеличивает нагрузку на дисковую систему.

Таким образом, различия между хостом и контейнерами обусловлены совокупностью факторов: особенностями работы файловой системы overlay2, механизмом Copy-on-Write, накладными расходами виртуализации и характером операций ввода-вывода. Эти результаты подчеркивают необходимость оптимизации файловых систем и механизмов ввода-вывода для эффективной работы в контейнеризованных средах.

Общие выводы

Результаты эксперимента демонстрируют небольшое снижение производительности при запуске операций в контейнерах Docker по сравнению с хостовой средой. Однако разница в производительности практически не превышает 10-15%, что указывает на неплохую

эффективность контейнеризации для задач, связанных с чтением и записью данных. В работах [8, 9] можно также отметить падение производительности, пусть и немного меньшее, чем в данной работе. Основные причины такого поведения можно объяснить следующими факторами:

1. Накладные расходы Docker.

Контейнеризация сопровождается дополнительными накладными расходами, связанными с виртуализацией, изоляцией ресурсов и использованием файловой системы с механизмом Copy-on-Write. Этот механизм позволяет создавать копии данных только при их изменении, что экономит ресурсы и ускоряет операции в случае неизменяемых данных. Однако при частых модификациях или записи большого объема данных на SSD-накопитель Copy-on-Write может приводить к дополнительным затратам на копирование и снижению производительности. Эти факторы особенно проявляются при увеличении числа контейнеров, когда нагрузка на файловую систему и управление изоляцией ресурсов возрастает. Следует отметить, что указанные накладные расходы связаны именно с операциями чтения и записи данных на дисковую подсистему, а не с работой с оперативной памятью.

2. Влияние размера блока данных.

При тестировании с большими блоками данных (1 МБ и 1 ГБ) производительность в контейнерах сохраняется на относительно высоком уровне. Увеличение размера блока уменьшает общее количество операций ввода-вывода, что снижает накладные расходы Docker и делает разницу в производительности менее заметной.

3. Увеличение числа экземпляров.

При увеличении количества контейнеров или экземпляров на хосте наблюдается падение производительности. Это связано с увеличением конкуренции за ресурсы (CPU, память, диск), что в случае контейнеров, где ресурсы жестко изолированы, приводит к дополнительным затратам.

Производительность при увеличении числа экземпляров падает не линейно, а лишь постепенно из-за эффективного использования современных аппаратных и программных технологий. Например, процессор Intel Core i5-8250U, как и многие, поддерживает многопоточность, где каждое физическое ядро может обрабатывать два потока одновременно. Это позволяет каждому новому экземпляру выполнять задачи, используя незадействованные ресурсы. Кроме того, уровни кэша процессора, совместно используемые всеми потоками,

Impact Factor:	ISRA (India)	= 6.317	SIS (USA)	= 0.912	ICV (Poland)	= 6.630
	ISI (Dubai, UAE)	= 1.582	РИИЦ (Russia)	= 0.191	PIF (India)	= 1.940
	GIF (Australia)	= 0.564	ESJI (KZ)	= 8.100	IBI (India)	= 4.260
	JIF	= 1.500	SJIF (Morocco)	= 7.184	OAJI (USA)	= 0.350

помогают минимизировать задержки доступа к данным.

Дисковая подсистема на базе NVMe и PCIe тоже играет важную роль. NVMe использует многопоточность и параллельные очереди для работы с запросами ввода-вывода, что позволяет одновременно обслуживать несколько экземпляров без значительных задержек. Однако с ростом нагрузки достигается предел пропускной способности, что проявляется в падении

производительности. Несмотря на это, технологии оптимизации работы ресурсов, такие как кэширование и планирование задач, позволяют сохранить приемлемую производительность даже при увеличении нагрузки.

Таким образом, снижение производительности с ростом числа экземпляров объясняется постепенным исчерпанием ресурсов и увеличением накладных расходов, а не их абсолютным дефицитом.

References:

- (2024). *Docker*. Retrieved 10.12.2024 from <https://www.docker.com/>
- Sergeev, A., Rezedinova, E., & Khakhina, A. (2024). *Performance Testing of Virtualization Systems on the Assembly of Different Guest Prefabricated Systems*. AIP Conf. Proc. 3063, 030004 (2024). Retrieved from <https://doi.org/10.1063/5.0196904>
- Polenov, M., Guzik, V., & Lukyanov, V. (2019). "Hypervisors comparison and their performance testing". *Adv Intell Syst Comput*. 2019;763:148-57.
- Morabito, R., Kjällman, J., & Komu, M. (2015). "Hypervisors vs. lightweight virtualization: A performance comparison," in *Proc - 2015 IEEE Int Conf Cloud Eng IC2E 2015*. 2015;386-93.
- Abraham, S., Paul, A.K., Khan, R.I.S., & Butt, A.R. (2020). "On the use of containers in high performance computing environments," in: *IEEE International Conference on Cloud Computing, CLOUD*. 2020. pp. 284-93.
- Borganova, L., & Sergeev, A. (2023). Testing the speed of integer and floating-point arithmetic operations in the Windows operating system when performing calculations in a Docker container and directly on the host. *Theoretical & Applied Science*, № 01 (129), 2024.
- (2024). *Installation of Sysbench on Linux*. Retrieved 10.12.2024 from <https://linuxtechlab.com/benchmark-linux-systems-install-sysbench-tool/>
- Danilova, A., & Sergeev, A. (2024). Metodika testirovanija i analiz proizvoditel'nosti operativnoj pamjati i zhjostkogo diska v docker i na hoste. (Testing methodology and analysis of ram and hard disk performance in docker and on the host). *Theoretical & Applied Science*, № 01 (129), 2024. DOI: <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2024.11.139.14>
- Chae, M.S., Lee, H.M., & Lee, K. (2019). "A performance comparison of linux containers and virtual machines using Docker and KVM". *Cluster Comput*. 2019; 22:1765-75.
- Sergeev, A., Rezedinova, E., & Khakhina, A. (2022). "Docker Container Performance Comparison on Windows and Linux Operating Systems". in *IEEE Conference on Communication Information, Electronics and Energy System CIEES 2022 - Proc*. 2022.
- Reddy, N., Nadesh, R.K., Srinivasa Perumal, R., Mallela, N.C., & Arivuselvan, K. (2022). "Performance Evaluation and Comparison of Hypervisors in a Multi-Cloud Environment". *EAI/Springer Innov Commun Comput*. (2022);217-36.
- (2024). *OverlayFS storage driver overview*. Retrieved 14.12.2024 from <https://docs.docker.com/engine/storage/drivers/overlayfs-driver/>
- (2024). *Docker Inc. The Copy-on-Write (CoW) Strategy*. Retrieved 10.12.2024 from <https://docs.docker.com/engine/storage/drivers/#the-copy-on-write-cow-strategy>
- (2024). *Docker storage types*. Retrieved 04.11.2024 from <https://docs.docker.com/engine/storage/drivers/>
- Veselyj, D., & Sergeev, A. (2024). Testing the speed of working with RAM and HDD in the Linux operating system when performing operations in a docker container and directly on the host. *ISJ Theoretical & Applied Science*, 11 (139), 64-74. Doi: <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2024.11.139.14>