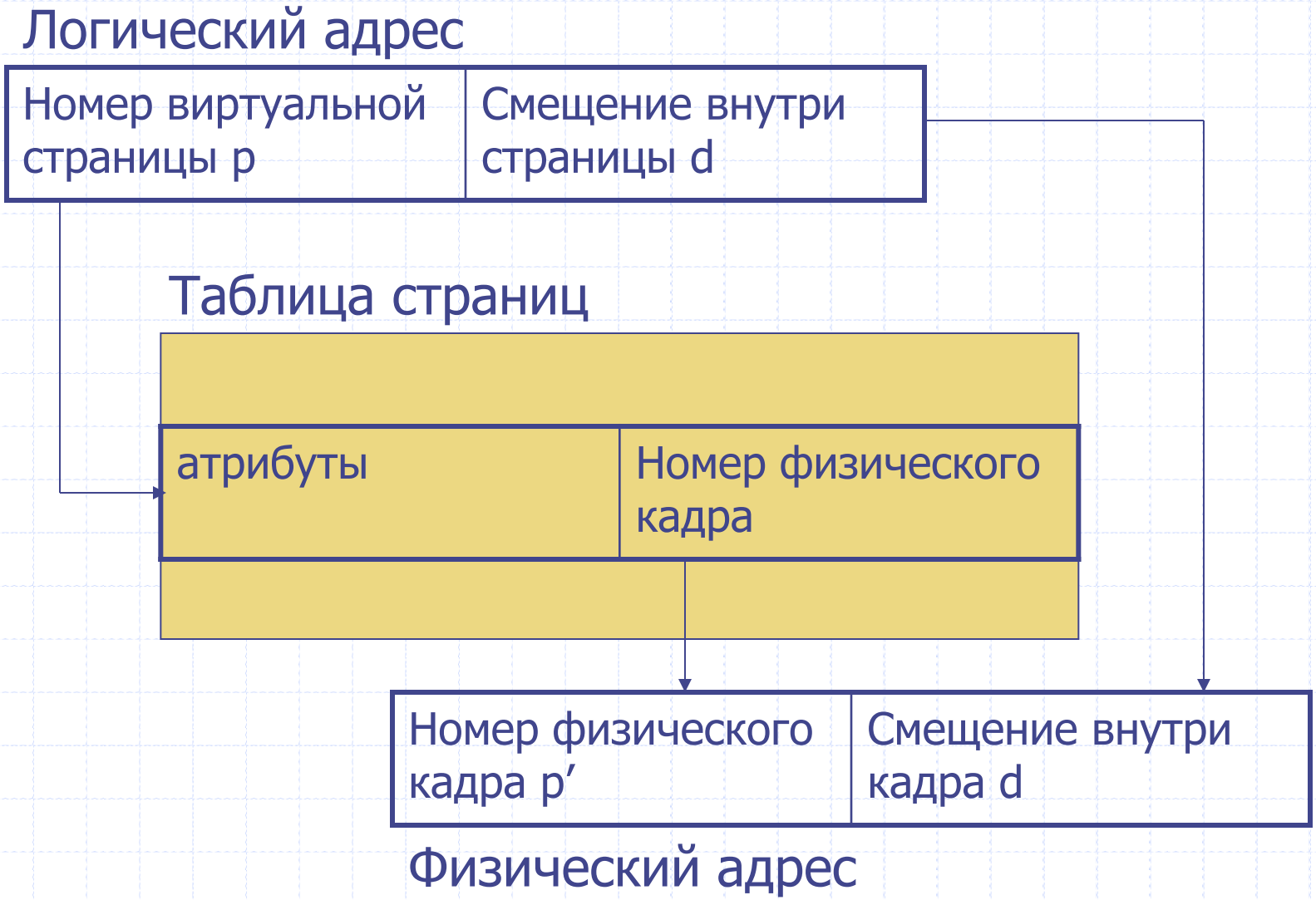
Аппаратная поддержка управлением памятью

Страничная память

Физическая и логическая память представляются состоящими из блоков одинакового размера, называемых страницы (page) для логической памяти, кадры (frame) для физической.

Размер страниц фиксирован и обычно кратен степени 2. Одна страница соответствует одному кадру.

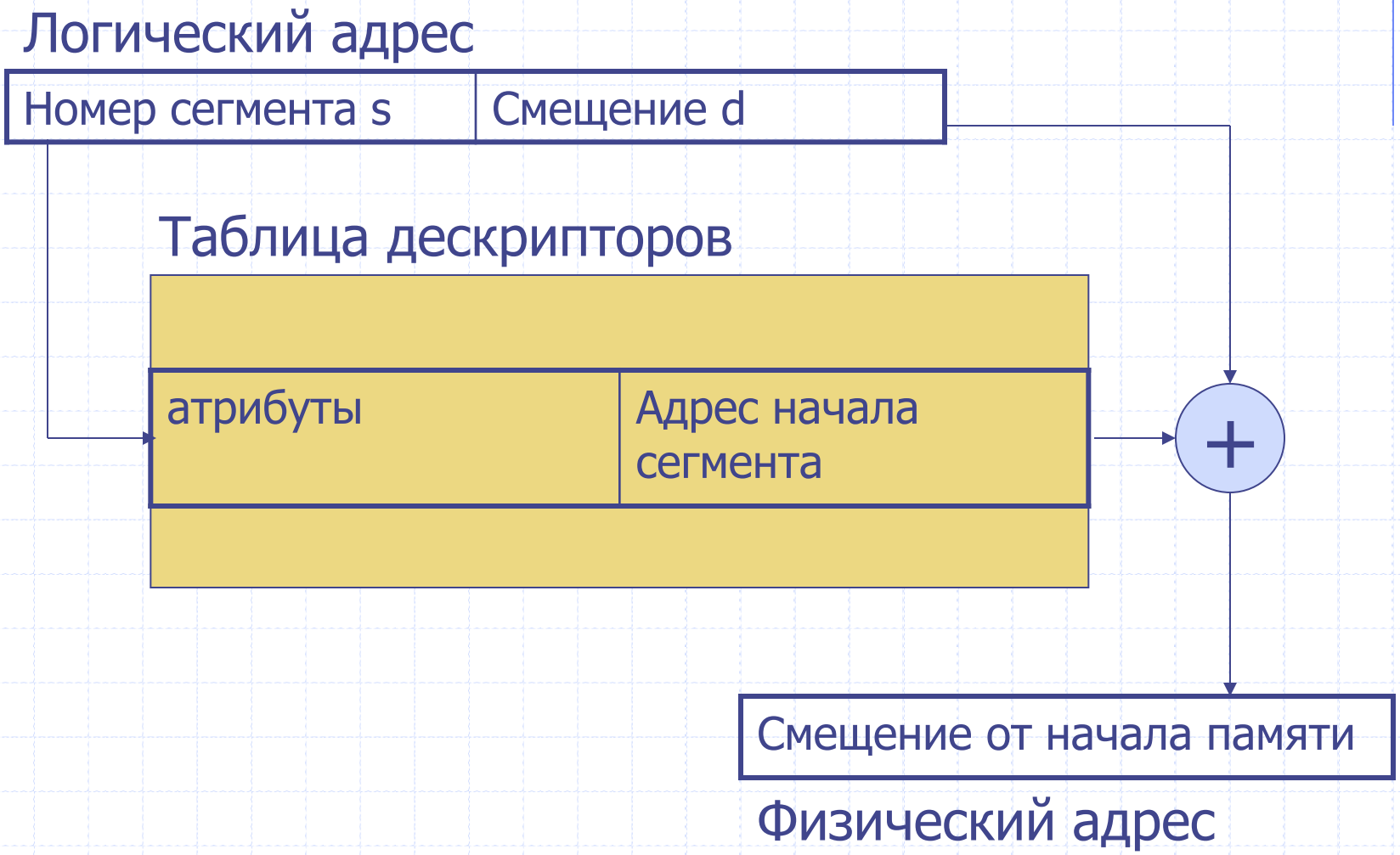
Связь логического и физического адресов



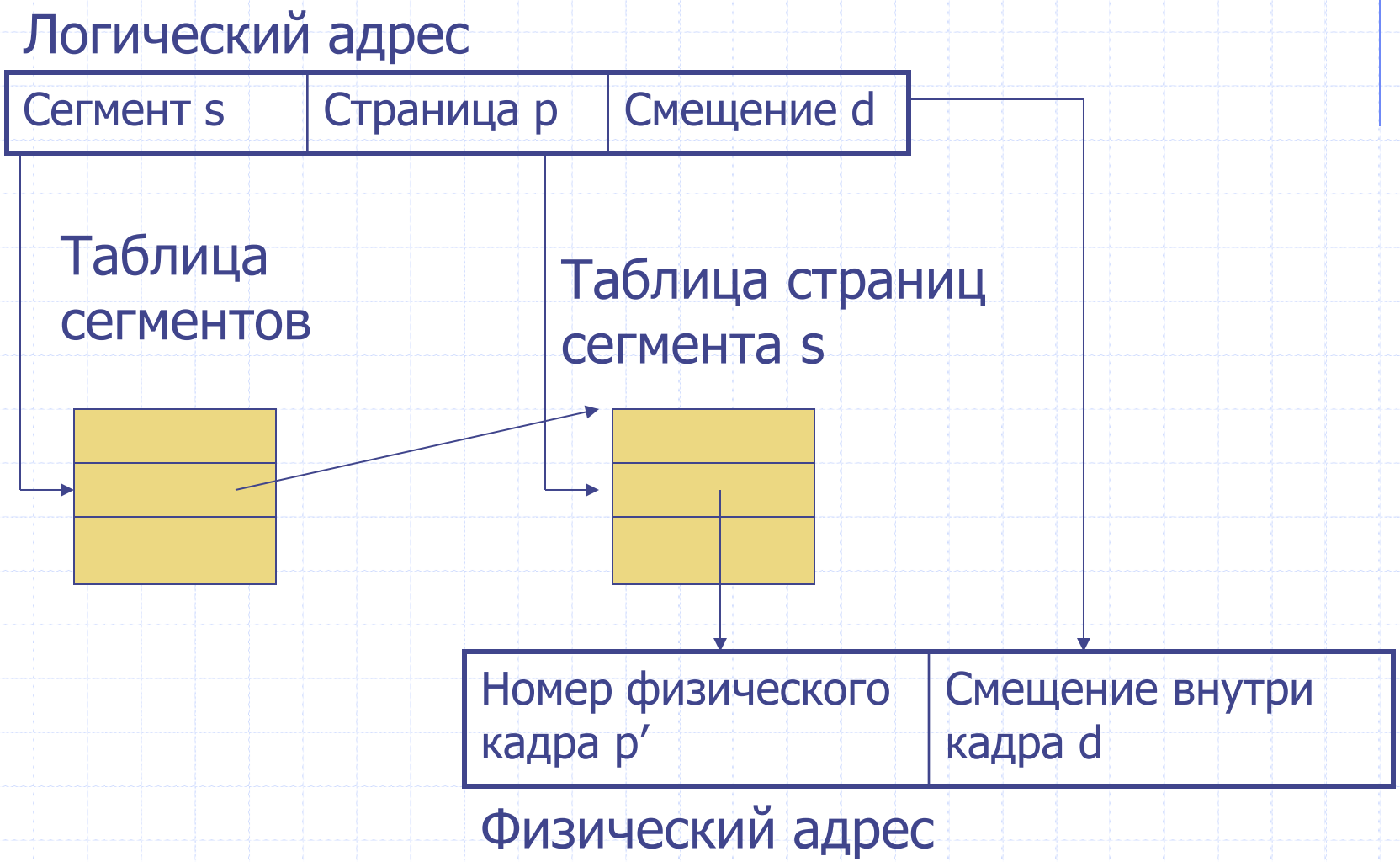
Сегментная организация памяти

- Является следствием логического разделения памяти
- Размер сегмента ограничен адресным пространством CPU, может меняться динамически

Связь логического и физического адресов



Странично-сегментная организация памяти



Виртуальная память

- Память процесса разбивается на части (например страницы)
- Выполняется динамическая трансляция логического адреса в физический
- При отсутствии страницы в ОЗУ она догружается (подкачивается) с жесткого диска.

Виртуальная память

- Программа не ограничена объемом ОЗУ и имеет доступ к всему адресному пространству CPU
- Возможно частое и гибкое перемещение процессов в памяти, что позволяет разместить больше процессов
- Объем ввода-вывода меньше, чем в свопинге
- Обеспечивается контроль доступа к памяти и защита адресных пространств процессов

Структура таблицы страниц

Структура адреса:

(p,d)

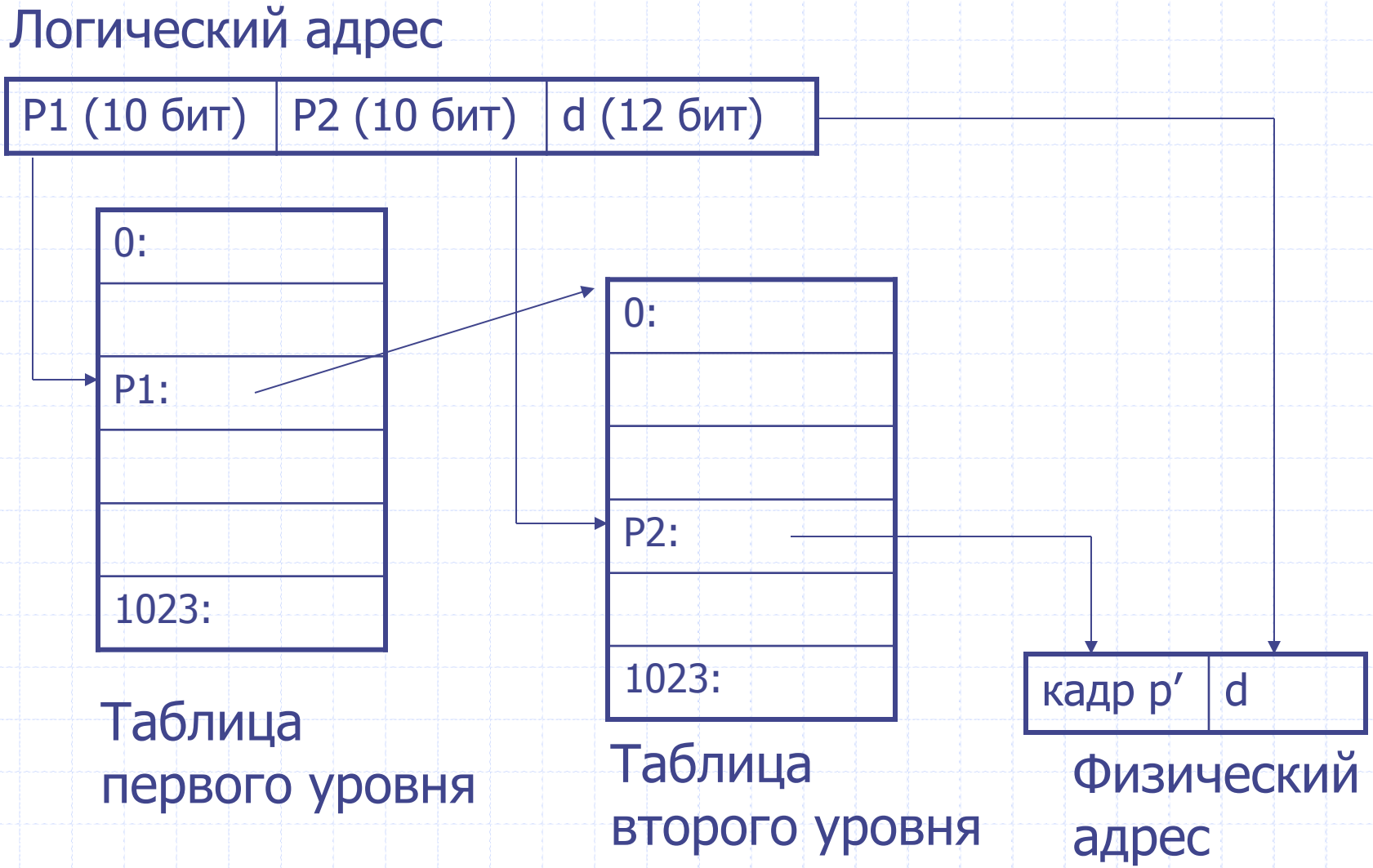
где p – номер виртуальной страницы,

d – смещение

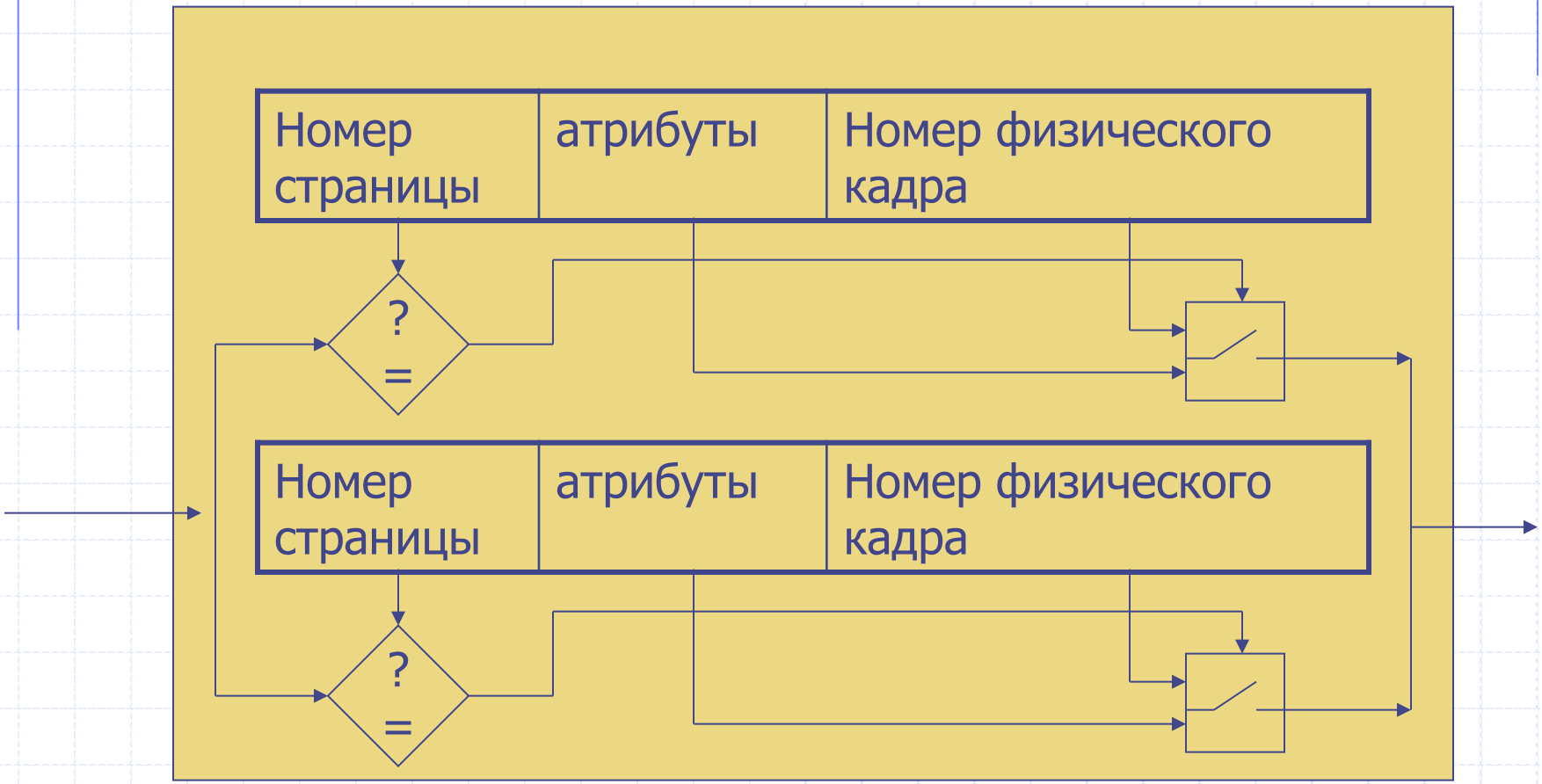
Запись таблицы страниц:

- номер физического кадра
- бит присутствия
- биты защиты
- бит модификации
- …

Многоуровневые таблицы страниц



Translation Lookaside Buffer (TLB)



Инвертированная таблица страниц

- Записи соответствуют физическим кадрам
- Достаточно одной таблицы на все процессы
- Усложнён поиск необходимой записи – можно применить хеширование

Реализация систем виртуальной памяти

Прерывания и виртуальная память

Пользовательский процесс

...

R1← *p:d

...

ОС

...

page_fault:

...

Таблица страниц

№		Frame
0	☑	0x23E0
...		
P	☐	-------
...		

Таблица прерываний

IRQ	Обработчик
...	
page fault	0x12345678
...	

Обработка страничного исключения

1. Обработка прерывания
2. Поиск свободного / замещение занятого кадра
3. Подкачка страницы с диска
4. Возобновление процесса

Замещение страницы

1. Выбрать (занятый) кадр в ОЗУ
2. Скопировать его содержание на диск
3. Считать содержимое требуемой страницы с диска в выбранный кадр
4. Модифицировать таблицы страниц
5. Продолжить выполнение процесса

Стратегии управления памятью

- Стратегия очистки/ cleaning policy
  когда сохранять страницы на диск
- Стратегия выборки / fetch policy
  когда считывать страницу с диска
- Стратегия размещения / placement policy
  где в ОЗУ разместить считываемую страницу
- Стратегия замещения / replacement policy
  какую страницу вытеснить если нет места

Стратегия очистки

Грязная страница / **dirty page** – страница, которая была модифицирована и отличается от версии в страничном файле

Чистая страница / clean page – страница, точная копия которой находится в страничном файле. Не требует сохранения при замещении.

Очистка страницы / **cleaning** – сохранение в страничный файл

Стратегия очистки

Когда проводить очистку?

- В момент замещения

  хорошо когда у нас полнодуплексный канал во внешнюю память

- Заранее / Precleaning
  - Необходимо определять страницы, которые могут быть скоро замещены
  - Если очистить слишком рано, страница может успеть «испачкаться» ещё раз

Стратегия выборки

- **По запросу / demand paging** – страница считывается когда к ней происходит обращение
- С упреждением:
  - **Loader paging –** при запуске процесса загружаем его целиком
  - **Anticipatory paging** – выборка нескольких последовательных страниц
  - **Swap prefetch** – выборка с прогнозированием кандидатов на загрузку (не обязательно последовательно)

Виды алгоритмов замещения

- Глобальные алгоритмы

  При замещении может быть использована страница любого процесса

- Локальные алгоритмы

  Вытесняются только страницы того же процесса

  резидентное множество процесса – множество физических кадров, выделенных процессу

Строка обращений

Строка обращений / reference string – последовательность обращений процесса к памяти

- Запоминаются только номера страниц
- Последовательные обращения к одной странице объединяются в одно

Аппаратные средства фиксации обращений

- **Флаг ссылки / reference bit** – устанавливается при любом обращении к странице
- **Флаг изменения / modify bit** – устанавливается при записи на страницу
- Устанавливаются процессором автоматически
- Сбрасываются ОС после проверки состояния

Алгоритм FIFO

Вытесняется «старейшая» страница:

- создаётся очередь страниц
- при загрузке страница помещается в конец очереди
- для замещения выбирается страница из начала очереди

Аномалия Билэди (Belady)

Вариант 1: доступно 3 кадра

Строка обращения	**0**	**1**	**2**	**3**	**0**	**1**	**4**	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**
Самая новая	0	1	2	3	0	1	4	4	4	2	3	3
		0	1	2	3	0	1	1	1	4	2	2
Самая старая			0	1	2	3	0	0	0	1	4	4
Page fault	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	

Всего 9 страничных исключений

Аномалия Билэди (Belady)

Вариант 2: доступно 4 кадра

Строка обращения	**0**	**1**	**2**	**3**	**0**	**1**	**4**	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**
Самая новая	0	1	2	3	3	3	4	0	1	2	3	4
		0	1	2	2	2	3	4	0	1	2	3
			0	1	1	1	2	3	4	0	1	2
Самая старая				0	0	0	1	2	3	4	0	1
Page fault	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓

Всего 10 страничных исключений

Оптимальный алгоритм / OPT

Стратегия замещения Билэди:

Следует выталкивать страницу, к которой дольше всего не будет происходить обращений

Алгоритм LRU

Выталкивание дольше всего не использовавшейся страницы / Least Recently Used

- Храним двунаправленный список всех кадров
- При каждом обращении к кадру помещаем его в начало списка / O(1)
- Для замещения выбираем кадры из конца списка, новые кадры помещаем в начало списка / O(1)

Алгоритм LRU - пример

Доступно 4 кадра

Строка обращения	**0**	**1**	**2**	**3**	**0**	**1**	**4**	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**
Недавно				3	0	1	4	0	1	2	3	4
			2	2	3	0	1	4	0	1	2	3
		1	1	1	2	3	0	1	4	0	1	2
Давно	0	0	0	0	1	2	3	3	3	4	0	1
Page fault	✓	✓	✓	✓			✓			✓	✓	✓

Всего 8 страничных исключений

Алгоритм LRU – альтернативная реализация

- Имеется аппаратный 64-битный счётчик, который увеличивается при выполнении каждой инструкции
- При каждом обращении к странице значение счётчика сохраняется в таблице страниц
- Для замещения выбирается кадр с минимальным значением счётчика

Алгортим LRU. Выводы.

- Достоинства
  - Не более чем в N раз больше страничных исключений, чем у OPT
- Недостатки
  - Много исключений при последовательном сканировании N+1 страницы
  - Много исключений при загрузке ОС

    Можно попытаться обнаружить эту ситуацию и переключится на другой алгоритм, например Most Recently Used (MRU)
  - Не учитывает частоту использования страницы

N – размер резидентного множества

Стековые алгоритмы

Для фиксированной строки обращений резидентное множество для N страниц является подмножеством резидентного множества для N+1 страницы.

- не подвержены аномалии Билэди

- Оптимальный алгоритм
- LRU

Алгоритм NFU

Выталкивание не часто используемой страницы / Not Frequently Used

- Для каждого кадра храним счётчик, начальное значение =0
- По прерыванию по времени сканируем флаги обращений и там где он установлен увеличиваем счётчик, флаг сбрасываем
- Для замещения выбираем страницу с минимальным значением счётчика

Алгоритм Aging

Усовершенствованный NFU

- Для каждого кадра храним счётчик, начальное значение =0
- По прерыванию по времени:
  - сдвигаем значение всех счетчиков на 1 вправо
  - сканируем флаги обращений и там где он установлен увеличиваем счётчик, флаг сбрасываем
- Для замещения выбираем страницу с минимальным значением счётчика

Not Recently Used / NRU

- По прерыванию таймера сбрасываются биты ссылок
- При выборе кадра на замещение:
  - Все кадры разбиваются на 4 класса:
    1. reference = false, modify = false
    2. reference = false, modify = true
    3. reference = true, modify = false
    4. reference = true, modify =true
  - Выбирается случайная страница из непустого класса с наименьшим номером

Алгоритм Second Chance

- Действуем как в FIFO
- При выборе страницы на замещение проверяем флаг ссылки:
  - Если сброшен – замещаем
  - Если установлен:
    - сбрасываем флаг и помещаем страницу в начало очереди
    - проверяем следующую страницу в конце очереди

Алгоритм Clock

Second Chance с кольцевым буфером

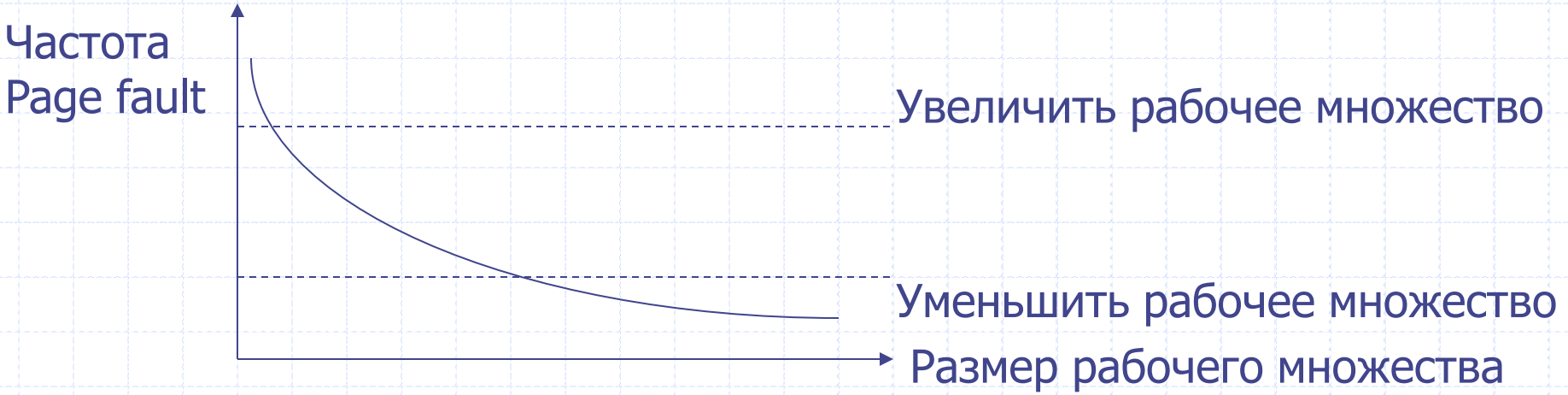
- Организуем кольцевой буфер кадров
- При замещении анализируем флаг ссылки текущего кадра:
  - Если сброшен – замещаем
  - Если установлен – сбрасываем и сдвигаемся к следующему кадру

Трешинг / Trashing

Высокая частота страничных исключений (trashing) вызывает снижение производительности на порядки

Для уменьшения эффекта от трешинга желательно применять локальные алгоритмы.

- Большое рабочее множество – мало памяти для других процессов
- Маленькое рабочее множество – возможен трешинг.



Модель рабочего множества

Рабочее множество процесса $W(t,\tau)$ – набор информации, используемый процессом в интервале времени $(t-\tau,t)$

Исходя из приницпа локальности

$$W(t,\tau) \approx W(t+\tau,\tau)$$

Нужно стараться чтобы резидентное множество = рабочее множество

Деннинг / Denning 1968

Алгоритм WSClock

- Отслеживаем текущее число прерываний по времени
- По каждому прерыванию записываем его номер в качестве времени последнего доступа ко всем кадрам у которых установлен бит доступа
- Как кандидаты на замещение рассматриваются кадры, которые старее τ
- Сначала пытаемся использовать чистые страницы, если их нет – грязные
- Если встречается грязная старая страница, она очищается (но не больше лимита)
- Список страниц для просмотра замкнут в кольцо

Причины развития алгоритмов замещения

- Увеличение размера ОЗУ
  - Снижает эффективность алгоритмов, периодически просматривающих все таблицы страниц
- Увеличение числа уровней в иерархии памяти
  - Нужно стараться работать в пределах кэш-памяти CPU
- Ослабление локальности за счёт использования ООП, сложных структур данных, сборки мусора
- Объединение систем виртуальной памяти и кэширования диска

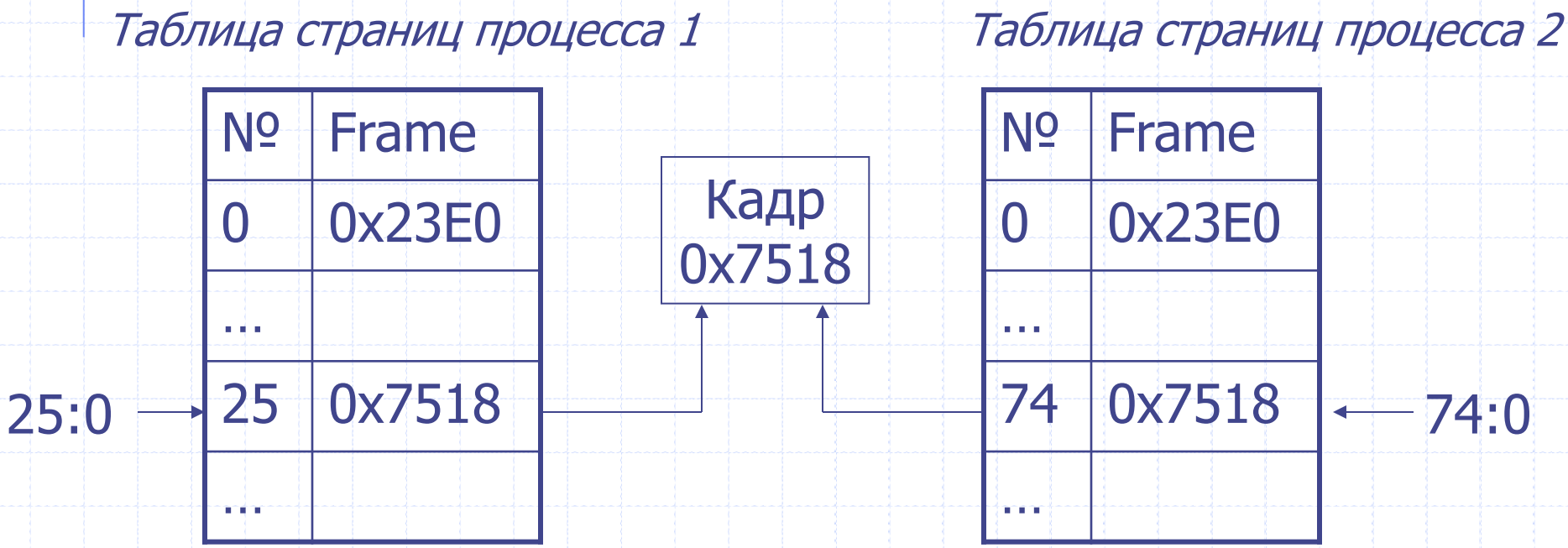
Локализация страниц в памяти

Если страница используется для чтения данных с использованием механизма DMA она не может быть замещена.

- Использовать для ввода-вывода специальные страницы в памяти ОС
- Использовать специальный бит локализации в таблице страниц для запрещения замещения
  - опасно «забывать» сбросить этот бит
  - может носить рекомендательный характер (SunOS)

Разделяемая память

Если разместить ссылки на один и тот же кадр в таблицах страниц разных процессов, то его можно использовать для обмена данными



Копирование при записи

- Некоторые фрагменты памяти могут совместно использоваться разными процессами, до тех пор пока они не будут модифицированы
- Модификация возможна, но происходит не часто и затрагивает небольшие регионы памяти
  - Сегменты кода при запуске одного приложения несколько раз

Копирование при записи

- Помечаем страницы специальным битом Copy-On-Write
- При попытке записи на такую страницу:
  - Происходит прерывание
  - Выделяем новый кадр
  - Копируем содержание разделяемого кадра
  - Модифицируем таблицу страниц пишущего процесса так, чтобы она ссылалась на новый кадр и снимаем флаг Copy-On-Write
  - Возобновляем выполнение процесса
  - Другие процессы продолжают работать с разделяемым кадром