Авторы: Егор Рогов, Павел Лузанов, Павел Толмачев, Илья Баштанов

Обратная связь
Отзывы, замечания и предложения направляйте по адресу:
edu@postgrespro.ru

Темы

Последовательное соединение хешированием:
одно- и двухпроходное

Группировка с помощью хеширования

Вычислительная сложность

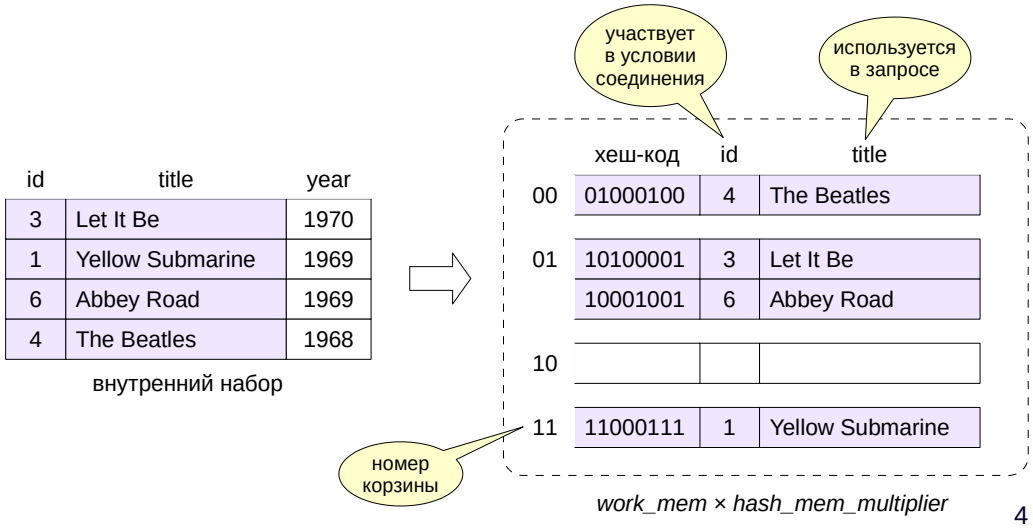
Параллельное соединение хешированием:
одно- и двухпроходное

Однопроходное соединение

Применяется, когда для хеш-таблицы достаточно оперативной памяти

Построение хеш-таблицы

```
SELECT a.title, s.name
FROM albums a JOIN songs s ON a.id = s.album_id;
```



Первым этапом в памяти строится хеш-таблица.

Идея хеширования состоит в том, что функция хеширования *равномерно* распределяет значения по ограниченному числу корзин хеш-таблицы. В таком случае разные значения как правило будут попадать в разные корзины. Если равномерности не будет, в одну корзину может попасть много значений. В таком случае они выстраиваются в список, и по мере увеличения длины списка эффективность поиска по хеш-таблице будет падать.

Итак, строки первого набора читаются последовательно, и для каждой из них вычисляется хеш-функция от значения полей, входящих в условие соединения (в нашем примере — числовые идентификаторы).

По значению хеш-функции определяется номер корзины. Например, если используется 4 корзины, то в качестве номера корзины можно взять два младших бита.

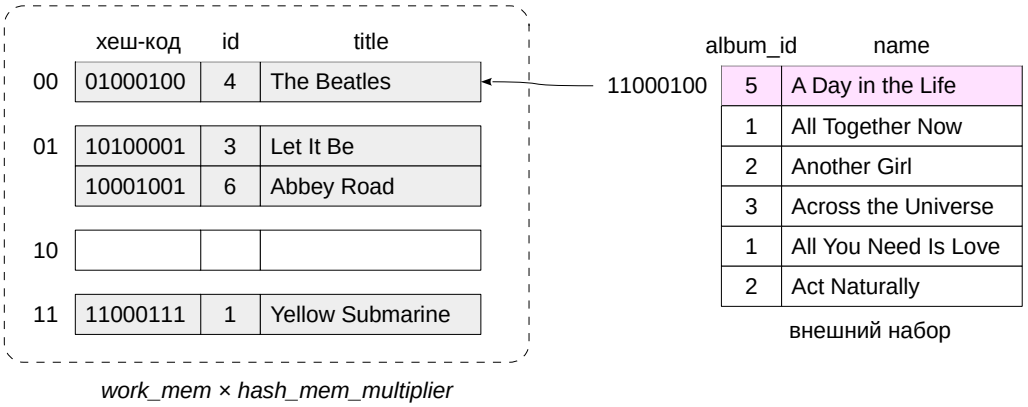
В корзину хеш-таблицы помещаются вычисленный хеш-код и все поля, которые входят в условие соединения или используются в запросе.

Размер хеш-таблицы в памяти ограничен значением *work_mem* × × *hash_mem_multiplier*. Наилучшая эффективность достигается, если вся хеш-таблица помещается в этот объем памяти целиком. (Это еще одна причина не использовать в запросе лишние поля, в том числе, «звездочку».)

Исходный код алгоритма можно найти в файле src/backend/executor/nodeHashjoin.c.

Сопоставление

```
SELECT a.title, s.name
FROM albums a JOIN songs s ON a.id = s.album_id;
```



На втором этапе мы последовательно читаем второй набор строк. По мере чтения мы вычисляем хеш-функцию от значения полей, участвующих в условии соединения. Если в соответствующей корзине хеш-таблицы обнаруживается строка

- с таким же хеш-кодом,

- и со значениями полей, подходящими под условие соединения,

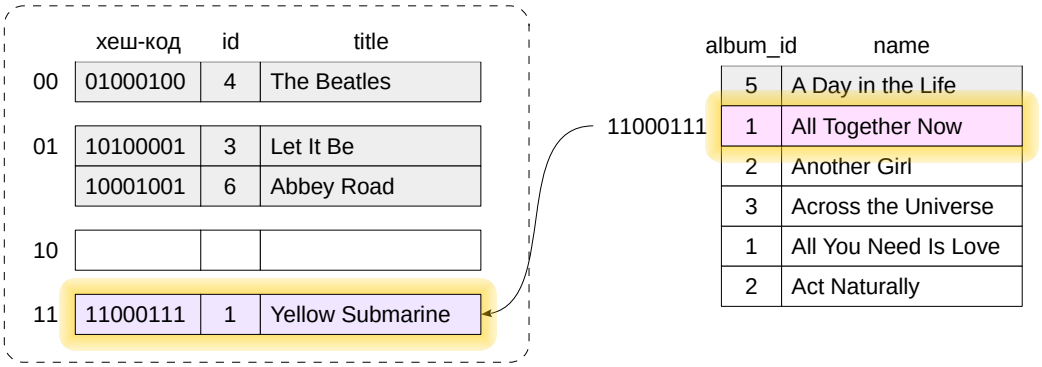
то мы нашли пару.

Проверки одного только хеш-кода недостаточно. Во-первых, не все условия соединения, перечисленные в запросе, могут быть учтены при выполнении соединения хешированием (поддерживаются только эквисоединения). Во-вторых, возможны коллизии, при которых разные значения получат одинаковые хеш-коды (вероятность этого мала, но тем не менее она есть).

В нашем примере для первой строки соответствия нет.

Сопоставление

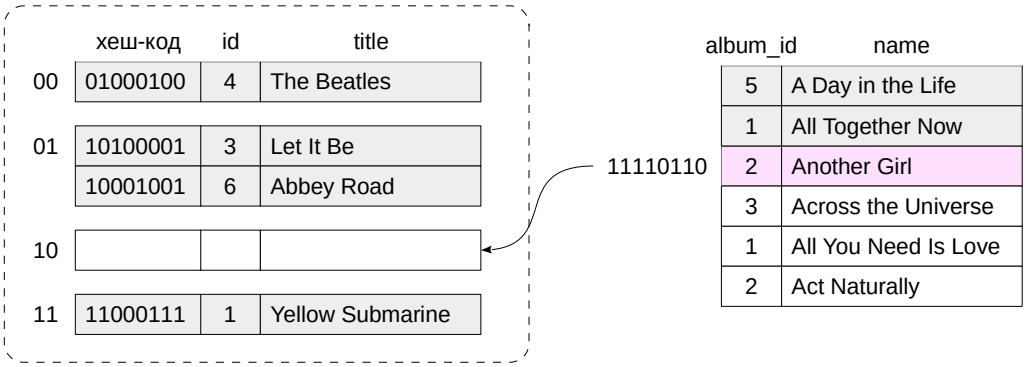
```
SELECT a.title, s.name
FROM albums a JOIN songs s ON a.id = s.album_id;
```



Вторая строка второго набора дает соответствие, которое уже можно вернуть вышестоящему узлу плана: («Yellow Submarine», «All Together Now»).

Сопоставление

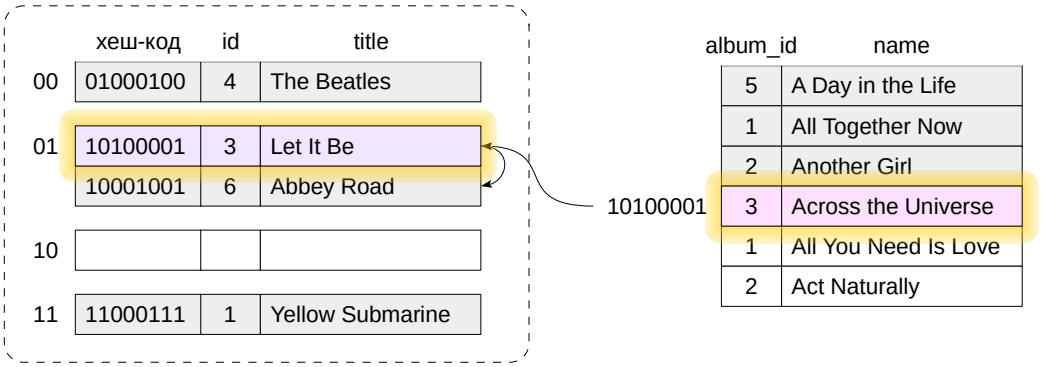
```
SELECT a.title, s.name
FROM albums a JOIN songs s ON a.id = s.album_id;
```



Для третьей строки соответствия нет (соответствующая корзина хеш-таблицы пуста).

Сопоставление

```
SELECT a.title, s.name
FROM albums a JOIN songs s ON a.id = s.album_id;
```

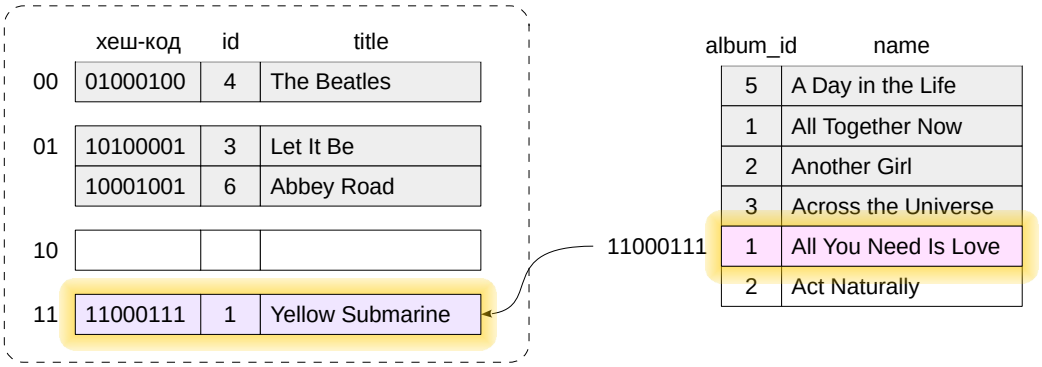


Для четвертой получаем соответствие («Let It Be», «Across the Universe»).

Заметим, что в корзине хеш-таблицы оказалось две строки первого набора, и в общем случае их придется просмотреть обе.

Сопоставление

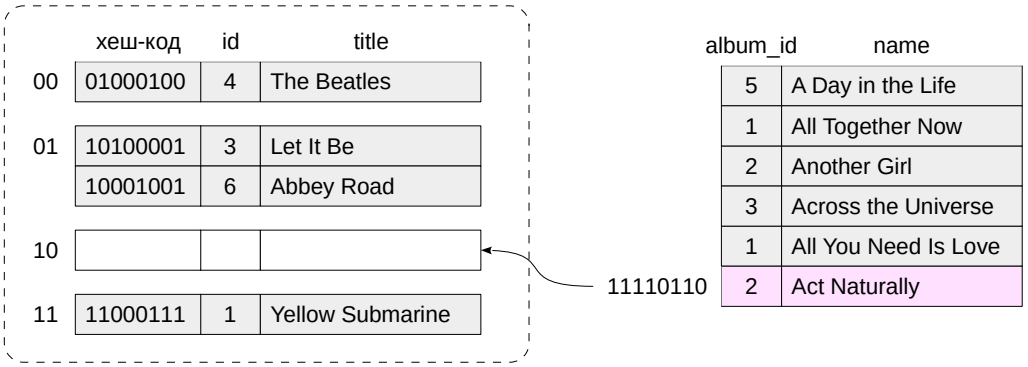
```
SELECT a.title, s.name
FROM albums a JOIN songs s ON a.id = s.album_id;
```



Для пятой строки получаем соответствие («Yellow Submarine», «All You Need Is Love»).

Сопоставление

```
SELECT a.title, s.name
FROM albums a JOIN songs s ON a.id = s.album_id;
```



Для шестой строки соответствия нет. На этом работа соединения завершена.

Однопроходное соединение хешированием

Для большой выборки оптимизатор предпочитает соединение хешированием:

```
=> EXPLAIN (costs off)
SELECT *
FROM tickets t
  JOIN ticket_flights tf ON tf.ticket_no = t.ticket_no;

                QUERY PLAN
-----------------------------------------
 Hash Join
   Hash Cond: (tf.ticket_no = t.ticket_no)
   ->  Seq Scan on ticket_flights tf
   ->  Hash
         ->  Seq Scan on tickets t
(5 rows)
```

Узел Hash Join начинает работу с того, что обращается к дочернему узлу Hash. Тот получает от своего дочернего узла (здесь — Seq Scan) весь набор строк и строит хеш-таблицу.

Затем Hash Join обращается ко второму дочернему узлу и соединяет строки, постепенно возвращая полученные результаты.

Модификации Hash Join включают уже рассмотренные ранее Left (Right), Semi и Anti, а также Full для полного соединения:

```
=> EXPLAIN SELECT *
FROM aircrafts a
  FULL JOIN seats s ON a.aircraft_code = s.aircraft_code;

                                  QUERY PLAN
-------------------------------------------------------------------------------
 Hash Full Join  (cost=3.47..30.04 rows=1339 width=55)
   Hash Cond: (s.aircraft_code = ml.aircraft_code)
   ->  Seq Scan on seats s  (cost=0.00..21.39 rows=1339 width=15)
   ->  Hash  (cost=3.36..3.36 rows=9 width=40)
         ->  Seq Scan on aircrafts_data ml  (cost=0.00..3.36 rows=9 width=40)
(5 rows)
```

Группировка и уникальные значения

Для группировки (GROUP BY) и устранения дубликатов (DISTINCT и операции со множествами без слова ALL) используются методы, схожие с методами соединения. Один из способов выполнения состоит в том, чтобы построить хеш-таблицу по нужным полям и получить из нее уникальные значения.

```
=> EXPLAIN SELECT fare_conditions, count(*)
FROM seats
GROUP BY fare_conditions;

                         QUERY PLAN
------------------------------------------------------------
 HashAggregate  (cost=28.09..28.12 rows=3 width=16)
   Group Key: fare_conditions
   ->  Seq Scan on seats  (cost=0.00..21.39 rows=1339 width=8)
(3 rows)
```

То же самое и с DISTINCT:

```
=> EXPLAIN SELECT DISTINCT fare_conditions
FROM seats;

                         QUERY PLAN
------------------------------------------------------------
 HashAggregate  (cost=24.74..24.77 rows=3 width=8)
   Group Key: fare_conditions
   ->  Seq Scan on seats  (cost=0.00..21.39 rows=1339 width=8)
(3 rows)
```

Использование памяти

Увеличим размер памяти, отведенной под хеш-таблицу:

```
=> SET work_mem = '64MB';
```

```
SET
```

```
=> SET hash_mem_multiplier = 3;
```

```
SET
```

Теперь размер ограничен значением:

```
=> SELECT wm.setting work_mem, wm.unit,
  hmm.setting hash_mem_multiplier,
  wm.setting::numeric * hmm.setting::numeric total
FROM pg_settings wm, pg_settings hmm
WHERE wm.name = 'work_mem' AND hmm.name = 'hash_mem_multiplier';
```

```
 work_mem | unit | hash_mem_multiplier | total
----------+------+---------------------+--------
 65536    | kB   | 3                   | 196608
(1 row)
```

Команда EXPLAIN показывает нестандартные значения параметров при указании settings:

```
=> EXPLAIN (analyze, settings, costs off, timing off, summary off)
SELECT *
FROM bookings b
  JOIN tickets t ON b.book_ref = t.book_ref;
```

```
                                          QUERY PLAN
-----------------------------------------------------------------------------------------------
 Hash Join (actual rows=2949857 loops=1)
   Hash Cond: (t.book_ref = b.book_ref)
   ->  Seq Scan on tickets t (actual rows=2949857 loops=1)
   ->  Hash (actual rows=2111110 loops=1)
         Buckets: 4194304  Batches: 1  Memory Usage: 145986kB
         ->  Seq Scan on bookings b (actual rows=2111110 loops=1)
 Settings: hash_mem_multiplier = '3', jit = 'off', search_path = 'bookings, public', work_mem = '64MB'
(7 rows)
```

Хеш-таблица поместилась в память (Batches: 1). Параметр Buckets показывает число корзин в хеш-таблице, а Memory Usage — использованную оперативную память.

Обратите внимание, что хеш-таблица строилась по меньшему набору строк.

Сравним с таким же запросом, который выводит только одно поле:

```
=> EXPLAIN (analyze, costs off, timing off, summary off)
SELECT b.book_ref
FROM bookings b
  JOIN tickets t ON b.book_ref = t.book_ref;
```

```
                           QUERY PLAN
-----------------------------------------------------------------
 Hash Join (actual rows=2949857 loops=1)
   Hash Cond: (t.book_ref = b.book_ref)
   ->  Seq Scan on tickets t (actual rows=2949857 loops=1)
   ->  Hash (actual rows=2111110 loops=1)
         Buckets: 4194304  Batches: 1  Memory Usage: 113172kB
         ->  Seq Scan on bookings b (actual rows=2111110 loops=1)
(6 rows)
```

Расход памяти уменьшился, так как в хеш-таблице теперь только одно поле (вместо трех).

Обратите внимание на строку Hash Cond: она содержит предикаты, участвующие в соединении. Условие может включать и такие предикаты, которые не могут использоваться механизмом соединения, но должны учитываться. Они отображаются в отдельной строке Join Filter, и нужные для их вычисления поля тоже попадают в хеш-таблицу (сравните объем памяти):

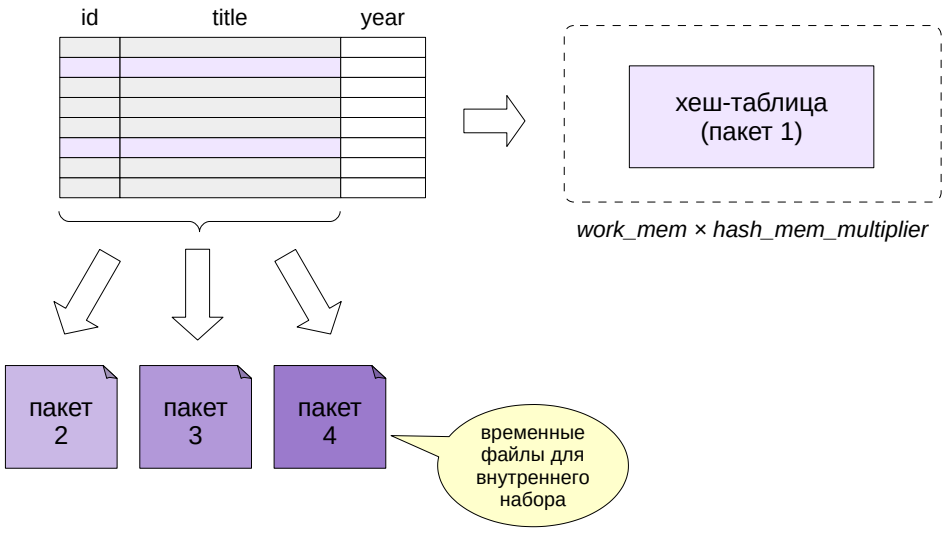
```
=> EXPLAIN (analyze, costs off, timing off, summary off)
SELECT b.book_ref
FROM bookings b
  JOIN tickets t ON b.book_ref = t.book_ref
                AND b.total_amount::text > t.passenger_id;
```

```
                            QUERY PLAN
------------------------------------------------------------------------
 Hash Join (actual rows=1198320 loops=1)
   Hash Cond: (t.book_ref = b.book_ref)
   Join Filter: ((b.total_amount)::text > (t.passenger_id)::text)
   Rows Removed by Join Filter: 1751537
   ->  Seq Scan on tickets t (actual rows=2949857 loops=1)
   ->  Hash (actual rows=2111110 loops=1)
         Buckets: 4194304  Batches: 1  Memory Usage: 127431kB
         ->  Seq Scan on bookings b (actual rows=2111110 loops=1)
(8 rows)
```

Двухпроходное соединение

Применяется, когда хеш-таблица не помещается в оперативную память: наборы данных разбиваются на пакеты и последовательно соединяются

Построение хеш-таблицы



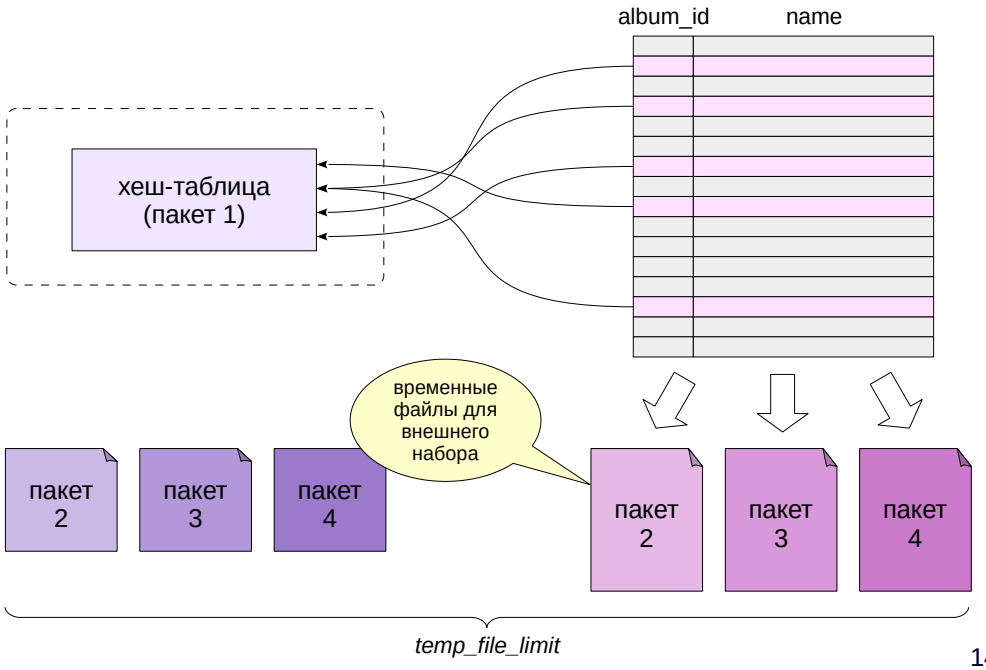
Если хеш-таблица не помещается в объем памяти, ограниченный *work_mem* × *hash_mem_multiplier,* первый (внутренний) набор строк разбивается на отдельные пакеты. Для распределения по пакетам используется некоторое количество битов хеш-кода, поэтому число пакетов всегда кратно двум. В идеале в каждый пакет попадает примерно одинаковое количество строк, но, если значения в строках повторяются, возможен перекос.

При планировании запроса заранее вычисляется минимально необходимое число пакетов так, чтобы хеш-таблица для каждого пакета помещалась в памяти. Это число не уменьшается, даже если оптимизатор ошибся с оценками, но при необходимости может динамически увеличиваться.

Хеш-таблица для первого пакета остается в памяти, а строки, принадлежащие другим пакетам, сбрасываются на диск во временные файлы — каждый пакет в свой файл.

На рисунке показано четыре пакета.

Сопоставление – пакет 1



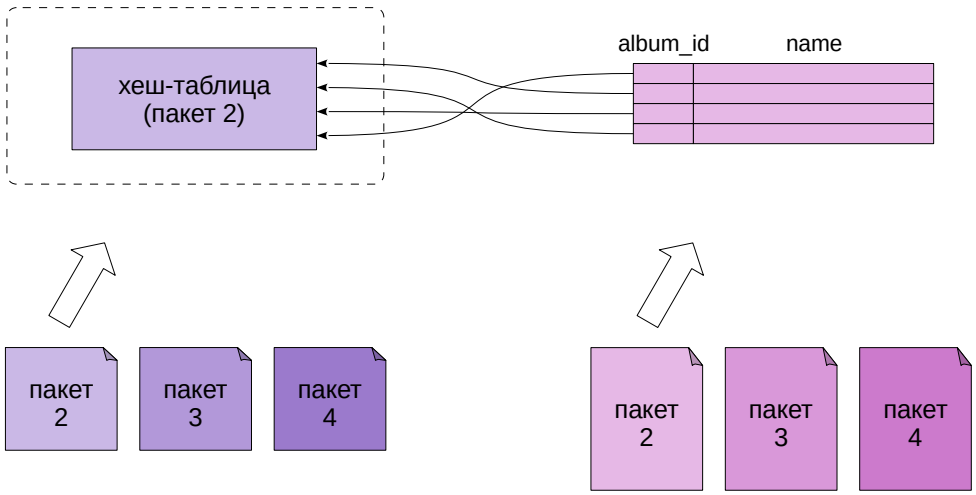
Далее читается второй (внешний) набор строк. Если строка принадлежит первому пакету, она сопоставляется с хеш-таблицей, которая как раз содержит первый пакет. С другими пакетами строку сопоставлять не надо — в них не может найтись соответствие, поскольку хеш-коды заведомо будут отличаться.

Если строка принадлежит другому пакету, она сбрасывается на диск — опять же, каждый пакет в свой временный файл.

Таким образом, при *N* пакетах используются 2(*N*–1) файлов.

Следует учитывать, что использование временных файлов на диске ограничивается параметром *temp_file_limit*, который определяет общий предел дисковой памяти для сеанса. (Буферы временных таблиц в это ограничение не входят.)

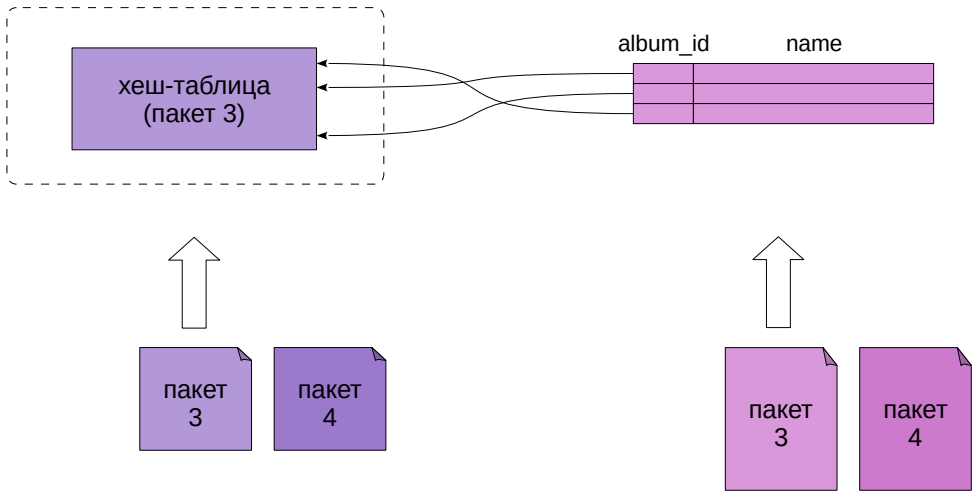
Сопоставление – пакет 2



Далее по очереди обрабатываются все пакеты, начиная со второго. Из временного файла в хеш-таблицу считываются строки внутреннего набора, затем из другого временного файла считываются строки внешнего набора и сопоставляются с хеш-таблицей.

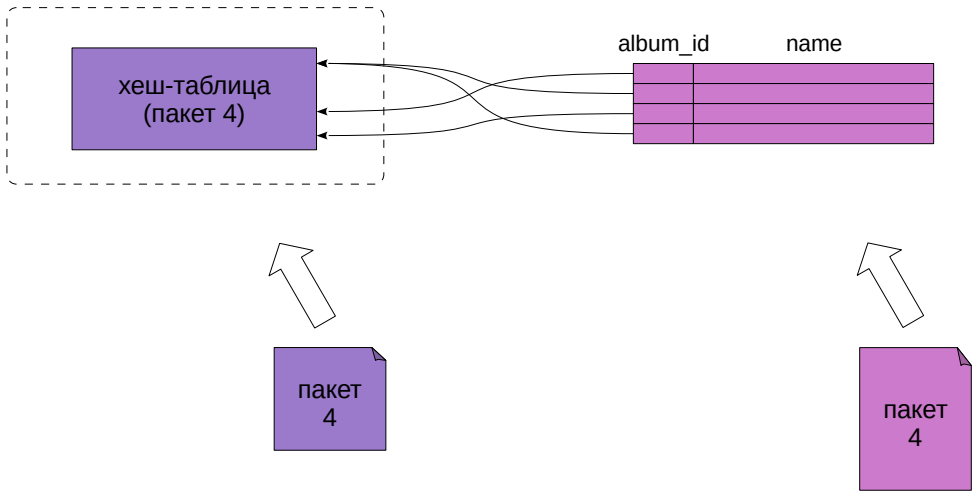
Процедура повторяется для всех оставшихся *N*–1 пакетов. На рисунке показано соединение для второго пакета.

Сопоставление – пакет 3



На рисунке показано соединение для третьего пакета.

Сопоставление – пакет 4



После обработки последнего пакета соединение завершено и временные файлы освобождены.

Таким образом, при нехватке оперативной памяти алгоритм соединения становится двухпроходным: каждый пакет (кроме первого) требуется записать на диск и затем прочитать повторно. Разумеется, это сказывается на эффективности соединения. Поэтому важно, чтобы:

- в хеш-таблицу попадали только действительно нужные поля (обязанность автора запроса),

- хеш-таблица строилась по меньшему набору строк (обязанность планировщика).

Двухпроходное соединение хешированием

Теперь уменьшим ограничение памяти так, чтобы хеш-таблица не поместилась, и выведем статистику использования буферного кеша:

```
=> SET work_mem = '32MB';
```

```
SET
```

```
=> SET hash_mem_multiplier = 1;
```

```
SET
```

```
=> EXPLAIN (analyze, buffers, costs off, timing off, summary off)
SELECT b.book_ref
FROM bookings b
  JOIN tickets t ON b.book_ref = t.book_ref;
```

```
                            QUERY PLAN
------------------------------------------------------------------------
 Hash Join (actual rows=2949857 loops=1)
   Hash Cond: (t.book_ref = b.book_ref)
   Buffers: shared hit=192 read=62670, temp read=12515 written=12515
   ->  Seq Scan on tickets t (actual rows=2949857 loops=1)
         Buffers: shared hit=96 read=49319
   ->  Hash (actual rows=2111110 loops=1)
         Buckets: 1048576  Batches: 4  Memory Usage: 28291kB
         Buffers: shared hit=96 read=13351, temp written=5217
         ->  Seq Scan on bookings b (actual rows=2111110 loops=1)
               Buffers: shared hit=96 read=13351
 Planning:
   Buffers: shared hit=8
(12 rows)
```

Теперь потребовалось четыре пакета (Batches: 4).

Видно, что узел Hash записывает пакеты во временные файлы (temp written), а узел Hash Join и записывает, и читает (temp read и written).

Вычислительная сложность

$\sim N + M$, где

N и M — число строк в первом и втором наборах данных

Начальные затраты на построение хеш-таблицы

Эффективно для большого числа строк

Общая сложность соединения хешированием пропорциональна сумме числа строк в одном и другом наборах данных. Поэтому метод соединения хешированием гораздо эффективнее вложенного цикла при большом числе строк.

Однако, чтобы начать соединение, требуется заплатить накладные расходы на построение хеш-таблицы: из-за этого при небольшом числе строк вложенный цикл более эффективен.

Соединение хешированием (в сочетании с полным сканированием таблиц) характерно для OLAP-запросов, в которых надо обработать большое число строк, причем общая пропускная способность важнее времени отклика.

Стоимость хеш-соединения

```
=> EXPLAIN SELECT *
FROM tickets t JOIN ticket_flights tf ON tf.ticket_no = t.ticket_no;

                                    QUERY PLAN
--------------------------------------------------------------------------------
 Hash Join  (cost=161874.35..498578.52 rows=8391852 width=136)
   Hash Cond: (tf.ticket_no = t.ticket_no)
   ->  Seq Scan on ticket_flights tf  (cost=0.00..153851.52 rows=8391852 width=32)
   ->  Hash  (cost=78912.49..78912.49 rows=2949749 width=104)
         ->  Seq Scan on tickets t  (cost=0.00..78912.49 rows=2949749 width=104)
(5 rows)
```

Начальная стоимость узла Hash Join складывается из стоимостей:

- получения всего первого набора данных (здесь — билеты);
- построения хеш-таблицы — пока таблица не готова, соединение не может начаться.

Можно обратить внимание на то, что в узле Hash стоимость построения хеш-таблицы не отражена.

Полная стоимость складывается из стоимостей:

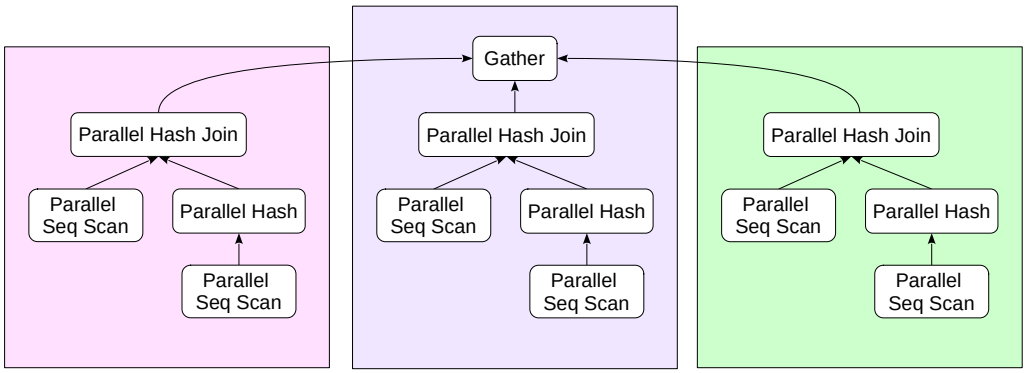
- получения всего второго набора данных (здесь — перелеты);
- проверки по хеш-таблице;
- обращения к диску в случае, когда предполагается использование более одного пакета.

Главный вывод: стоимость хеш-соединения пропорциональна N + M, где N и M — число строк в соединяемых наборах данных. При больших N и M это значительно выгоднее, чем произведение в случае соединения внешним циклом.

Параллельно, один проход

Процессы используют общую хеш-таблицу

Параллельный алгоритм



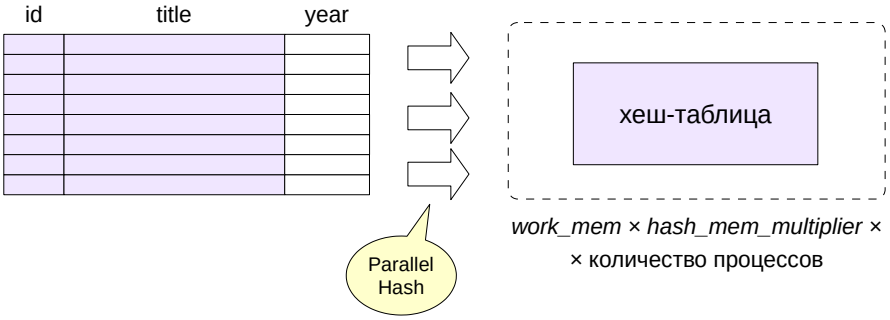
В отличие от других способов соединения, хеш-соединение не только может участвовать в параллельных планах, но и имеет отдельный эффективный алгоритм работы. Этот алгоритм позволяет параллельно выполнять оба этапа соединения: и построение хеш-таблицы по первому (внутреннему) набору строк, и сопоставление с ней строк второго (внешнего) набора.

Возможность параллельного хеш-соединения управляется параметром *enable_parallel_hash*; по умолчанию параметр включен.

Как и у последовательного алгоритма, у параллельного есть два варианта: однопроходный при достаточном количестве оперативной памяти и двухпроходный.

Начнем с однопроходного варианта.

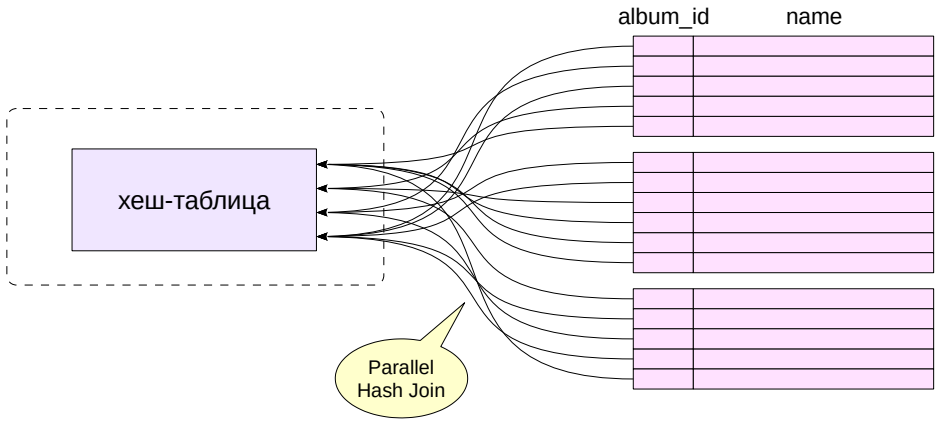
Построение хеш-таблицы



Однопроходный алгоритм используется, если хеш-таблица помещается в *суммарный* объем памяти, выделенный всем участвующим в соединении процессам, то есть размер хеш-таблицы ограничен значением *work_mem* × *hash_mem_multiplier* × количество процессов.

Процессы параллельно читают первый набор строк (например, используя узел Parallel Seq Scan) и строят общую хеш-таблицу в разделяемой памяти, где каждый из них имеет к ней доступ.

Сопоставление



После того, как хеш-таблица полностью построена, рабочие процессы приступают к параллельному чтению второго набора и сопоставляют прочитанные ими строки с общей-хеш-таблицей. Таким образом, каждый из процессов проверяет по хеш-таблице только часть данных.

Однопроходное параллельное хеш-соединение

```
=> SET work_mem = '64MB';
```

```
SET
```

Выполним запрос с агрегацией:

```
=> EXPLAIN (analyze, costs off, timing off, summary off)
SELECT count(*)
FROM bookings b
  JOIN tickets t ON b.book_ref = t.book_ref;
```

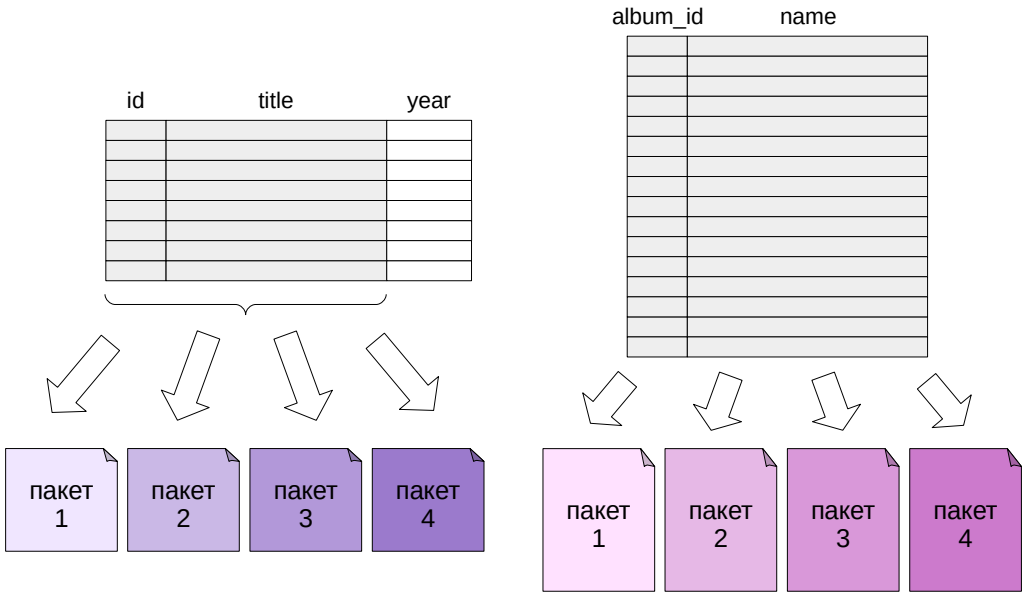
```
                                      QUERY PLAN
---------------------------------------------------------------------------------------
 Finalize Aggregate (actual rows=1 loops=1)
   ->  Gather (actual rows=3 loops=1)
         Workers Planned: 2
         Workers Launched: 2
         ->  Partial Aggregate (actual rows=1 loops=3)
               ->  Parallel Hash Join (actual rows=983286 loops=3)
                     Hash Cond: (t.book_ref = b.book_ref)
                     ->  Parallel Seq Scan on tickets t (actual rows=983286 loops=3)
                     ->  Parallel Hash (actual rows=703703 loops=3)
                           Buckets: 4194304  Batches: 1  Memory Usage: 115392kB
                           ->  Parallel Seq Scan on bookings b (actual rows=703703 loops=3)
(11 rows)
```

Обратите внимание на использование памяти (Memory Usage): объем превышает ограничение, установленное для одного рабочего процесса, но в общую память трех процессов хеш-таблица помещается. Поэтому выполняется однопроходное соединение (Batches: 1).

Параллельно, два прохода

Наборы строк разбиваются на пакеты, которые затем параллельно обрабатываются рабочими процессами

Разбиение на пакеты



Хеш-таблица может не поместиться в объем памяти, ограниченный *work_mem* × *hash_mem_multiplier* × количество процессов, причем это может выясниться и на этапе выполнения соединения. В этом случае используется двухпроходный алгоритм, который существенно отличается и от двухпроходного последовательного, и от однопроходного параллельного.

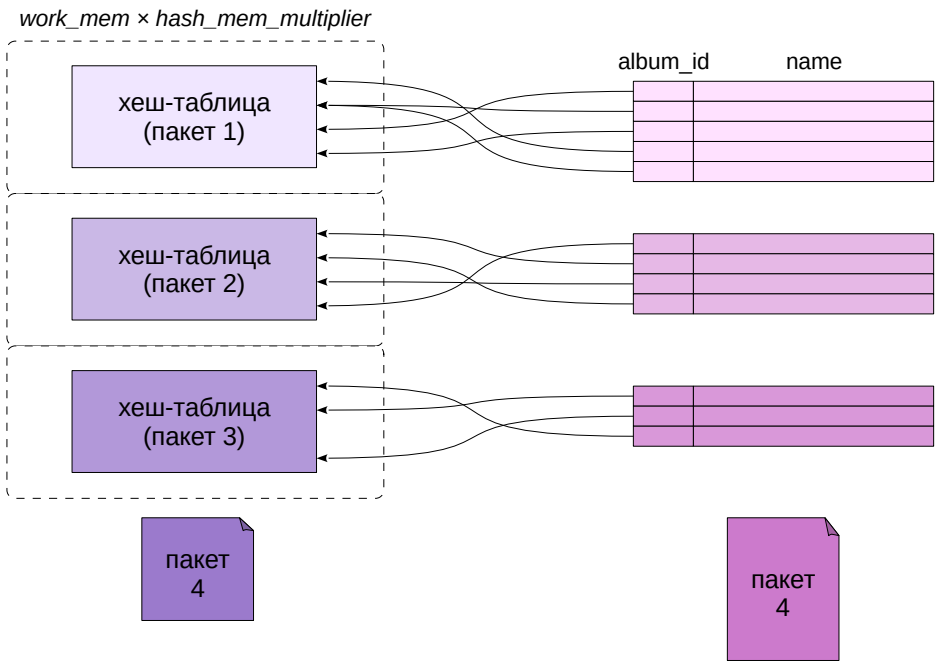
Сначала рабочие процессы параллельно читают первый набор данных, разбивают его на пакеты и записывают пакеты во временные файлы. Первый пакет тоже попадает в файл; хеш-таблица в памяти не строится.

Обратите внимание, что каждый процесс записывает строки в каждый временный файл; запись синхронизируется.

Затем рабочие процессы параллельно читают второй набор данных и также разбивают его на пакеты и записывают во временные файлы.

Таким образом, при *N* пакетах на диск записываются 2*N* файлов.

Сопоставление



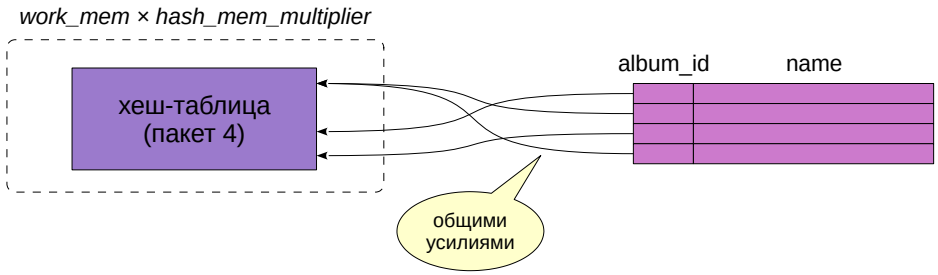
Затем каждый рабочий процесс выбирает себе по одному пакету.

Процесс загружает первый набор выбранного пакета в хеш-таблицу в памяти. В этом алгоритме у каждого процесса своя хеш-таблица размером *work_mem* × *hash_mem_multiplier*, но располагаются они в общей памяти, то есть доступ к каждой таблице есть у всех рабочих процессов.

После заполнения хеш-таблицы процесс читает второй набор выбранного пакета и сопоставляет строки.

Когда процесс завершает обработку одного пакета, он выбирает следующий, еще не обработанный.

Сопоставление



Когда необработанные пакеты заканчиваются, освободившийся процесс подключается к обработке одного из еще не завершенных пакетов, пользуясь тем, что все хеш-таблицы находятся в разделяемой памяти.

Несколько хеш-таблиц работают лучше, чем одна большая: в этом случае проще организовать совместную работу и меньше ресурсов тратится на синхронизацию.

Двухпроходное параллельное хеш-соединение

Еще уменьшим объем памяти, и соединение станет двухпроходным с четырьмя пакетами:

```
=> SET work_mem = '32MB';
```

```
SET
```

Выполним запрос с агрегацией:

```
=> EXPLAIN (analyze, costs off, timing off, summary off)
SELECT count(*)
FROM bookings b
  JOIN tickets t ON b.book_ref = t.book_ref;
```

```
                                        QUERY PLAN
-------------------------------------------------------------------------------------------
 Finalize Aggregate (actual rows=1 loops=1)
   ->  Gather (actual rows=3 loops=1)
         Workers Planned: 2
         Workers Launched: 2
         ->  Partial Aggregate (actual rows=1 loops=3)
               ->  Parallel Hash Join (actual rows=983286 loops=3)
                     Hash Cond: (t.book_ref = b.book_ref)
                     ->  Parallel Seq Scan on tickets t (actual rows=983286 loops=3)
                     ->  Parallel Hash (actual rows=703703 loops=3)
                           Buckets: 1048576  Batches: 4  Memory Usage: 28864kB
                           ->  Parallel Seq Scan on bookings b (actual rows=703703 loops=3)
(11 rows)
```

Итоги

Соединение хешированием требует подготовки

- надо построить хеш-таблицу

Эффективно для больших выборок

- в том числе есть возможность параллельного соединения

Зависит от порядка соединения

- внутренний набор должен быть меньше внешнего, чтобы минимизировать хеш-таблицу

Поддерживает только эквисоединения

- для хеш-кодов операторы «больше» и «меньше» не имеют смысла

В отличие от соединения вложенным циклом, хеш-соединение требует подготовки: построения хеш-таблицы. Пока таблица не построена, ни одна результирующая строка не может быть получена.

Зато соединение хешированием эффективно работает на больших объемах данных. Оба набора строк читаются последовательно и только один раз (два раза в случае нехватки оперативной памяти).

Ограничением соединения хеширования является поддержка только эквисоединений. Дело в том, что хеш-значения можно сравнивать только на равенство, операции «больше» и «меньше» просто не имеют смысла.

Практика

1. Напишите запрос, показывающий занятые места в салоне для всех рейсов.
   Какой способ соединения выбрал планировщик? Проверьте, хватило ли оперативной памяти для размещения хеш-таблиц.
2. Измените запрос, чтобы он выводил только общее количество занятых мест.
   Как изменился план запроса? Почему планировщик не использовал аналогичный план для предыдущего запроса?
3. Напишите запрос, показывающий имена пассажиров и номера рейсов, которыми они следуют.
   Разберитесь по плану запроса, в какой последовательности выполняются операции.

1. Для этого достаточно соединить рейсы (flights) с посадочными талонами (boarding_passes).

3. Такой запрос должен соединять три таблицы: билеты (tickets), перелеты (ticket_flights) и рейсы (flights).

1. Список занятых мест

```
=> EXPLAIN SELECT f.flight_id, bp.seat_no
FROM flights f
  JOIN boarding_passes bp ON bp.flight_id = f.flight_id;

                                    QUERY PLAN
--------------------------------------------------------------------------------
 Hash Join  (cost=8298.51..229398.23 rows=7925569 width=7)
   Hash Cond: (bp.flight_id = f.flight_id)
   ->  Seq Scan on boarding_passes bp  (cost=0.00..137534.69 rows=7925569 width=7)
   ->  Hash  (cost=4772.67..4772.67 rows=214867 width=4)
         ->  Seq Scan on flights f  (cost=0.00..4772.67 rows=214867 width=4)
(5 rows)
```

Использовано соединение хешированием.

```
=> EXPLAIN (analyze, costs off, timing off,  summary off)
SELECT f.flight_id, bp.seat_no
FROM flights f
  JOIN boarding_passes bp ON bp.flight_id = f.flight_id;

                             QUERY PLAN
---------------------------------------------------------------------
 Hash Join (actual rows=7925812 loops=1)
   Hash Cond: (bp.flight_id = f.flight_id)
   ->  Seq Scan on boarding_passes bp (actual rows=7925812 loops=1)
   ->  Hash (actual rows=214867 loops=1)
         Buckets: 131072  Batches: 4  Memory Usage: 2917kB
         ->  Seq Scan on flights f (actual rows=214867 loops=1)
(6 rows)
```

Хеш-таблица не поместилась целиком в память, потребовалось четыре пакета.

2. Количество занятых мест

```
=> EXPLAIN SELECT count(*)
FROM flights f
  JOIN boarding_passes bp ON bp.flight_id = f.flight_id;

                                                QUERY PLAN
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------
 Finalize Aggregate  (cost=114694.80..114694.81 rows=1 width=8)
   ->  Gather  (cost=114694.58..114694.79 rows=2 width=8)
         Workers Planned: 2
         ->  Partial Aggregate  (cost=113694.58..113694.59 rows=1 width=8)
               ->  Parallel Hash Join  (cost=5467.82..105438.78 rows=3302320 width=0)
                     Hash Cond: (bp.flight_id = f.flight_id)
                     ->  Parallel Seq Scan on boarding_passes bp  (cost=0.00..91302.20 rows=3302320 width=4)
                     ->  Parallel Hash  (cost=3887.92..3887.92 rows=126392 width=4)
                           ->  Parallel Seq Scan on flights f  (cost=0.00..3887.92 rows=126392 width=4)
(9 rows)
```

Здесь планировщик использовал параллельный план. В предыдущем запросе это не было оправдано из-за высокой стоимости пересылки данных между процессами, а в данном случае передается только одно число.

```
=> EXPLAIN (analyze, costs off, timing off, summary off)
SELECT count(*)
FROM flights f
  JOIN boarding_passes bp ON bp.flight_id = f.flight_id;
```

```
                                                                 QUERY PLAN
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------
 Finalize Aggregate (actual rows=1 loops=1)
   ->  Gather (actual rows=3 loops=1)
         Workers Planned: 2
         Workers Launched: 2
         ->  Partial Aggregate (actual rows=1 loops=3)
               ->  Parallel Hash Join (actual rows=2641937 loops=3)
                     Hash Cond: (bp.flight_id = f.flight_id)
                     ->  Parallel Seq Scan on boarding_passes bp (actual rows=2641937 loops=3)
                     ->  Parallel Hash (actual rows=71622 loops=3)
                           Buckets: 262144  Batches: 1  Memory Usage: 10496kB
                           ->  Parallel Seq Scan on flights f (actual rows=71622 loops=3)
(11 rows)
```

Обратите внимание на поле loops в узлах выше и ниже Gather — оно соответствует реальному числу процессов, работавших над запросом.

3. Пассажиры и номера рейсов

```
=> EXPLAIN (costs off)
SELECT t.passenger_name, f.flight_no
FROM tickets t
  JOIN ticket_flights tf ON tf.ticket_no = t.ticket_no
  JOIN flights f ON f.flight_id = tf.flight_id;
```

```
                    QUERY PLAN
-------------------------------------------------
 Hash Join
   Hash Cond: (tf.flight_id = f.flight_id)
   ->  Hash Join
         Hash Cond: (tf.ticket_no = t.ticket_no)
         ->  Seq Scan on ticket_flights tf
         ->  Hash
               ->  Seq Scan on tickets t
   ->  Hash
         ->  Seq Scan on flights f
(9 rows)
```

Сначала выполняется соединение билетов (tickets) с перелетами (ticket_flights), причем хеш-таблица строится по таблице билетов.

Затем рейсы (flights) соединяются с результатом первого соединения; хеш-таблица строится по таблице рейсов.