

Архитектура Общее устройство PostgreSQL



Авторские права

© Postgres Professional, 2017–2024

Авторы: Егор Рогов, Павел Лузанов, Илья Баштанов, Игорь Гнатюк

Фото: Олег Бартунов (монастырь Пху и пик Бхрикути, Непал)

Использование материалов курса

Некоммерческое использование материалов курса (презентации, демонстрации) разрешается без ограничений. Коммерческое использование возможно только с письменного разрешения компании Postgres Professional. Запрещается внесение изменений в материалы курса.

Обратная связь

Отзывы, замечания и предложения направляйте по адресу:

edu@postgrespro.ru

Отказ от ответственности

Компания Postgres Professional не несет никакой ответственности за любые повреждения и убытки, включая потерю дохода, нанесенные прямым или косвенным, специальным или случайным использованием материалов курса. Компания Postgres Professional не предоставляет каких-либо гарантий на материалы курса. Материалы курса предоставляются на основе принципа «как есть» и компания Postgres Professional не обязана предоставлять сопровождение, поддержку, обновления, расширения и изменения.

Клиент-серверный протокол

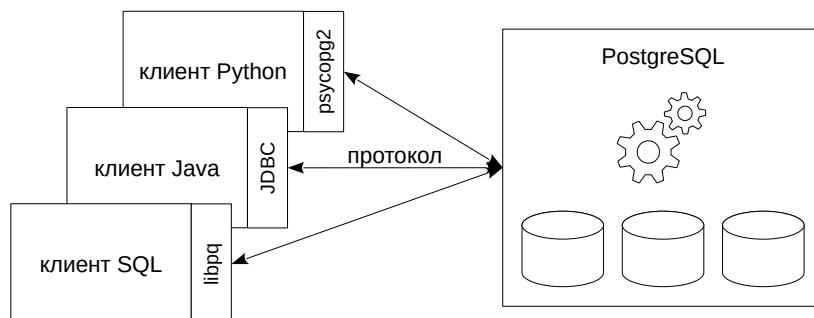
Транзакционность и механизмы ее реализации

Схема обработки и способы выполнения запросов

Процессы и структуры памяти

Хранение данных на диске и работа с ними

Расширяемость системы



подключение
формирование запросов
управление транзакциями

аутентификация
выполнение запросов
поддержка транзакционности

Клиентское приложение — например, `psql` или любая другая программа, написанная на любом языке программирования (ЯП), — подключается к серверу и «общается» с ним. Чтобы клиент и сервер понимали друг друга, они должны использовать один и тот же *протокол* взаимодействия. Обычно клиент использует *драйвер*, реализующий протокол и предоставляющий набор функций для использования в программе. Внутри драйвер может пользоваться стандартной реализацией протокола (библиотекой `libpq`), либо реализовывать этот протокол самостоятельно.

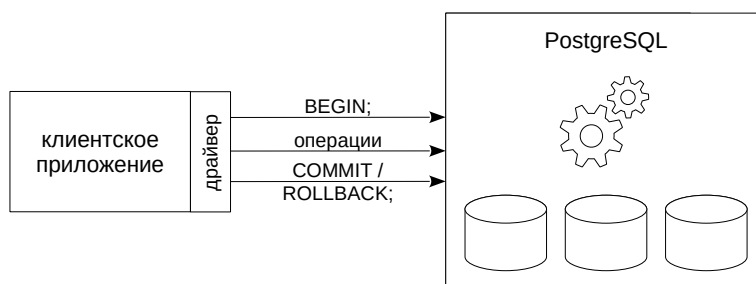
Не так важно, на каком ЯП написан клиент — за разным синтаксисом будут возможности, определенные протоколом. Мы будем использовать для примеров язык SQL с помощью клиента `psql`. В реальной жизни клиентскую часть на SQL пишут редко, но нам для учебных целей это удобно. Мы рассчитываем, что сопоставить команды SQL с аналогичными возможностями вашего любимого языка программирования не составит для вас большого труда.

Если говорить в самых общих чертах, то протокол позволяет клиенту подключиться к одной из баз данных кластера. При этом сервер выполняет *аутентификацию* — решает, можно ли разрешить подключение, например, запросив пароль.

Далее клиент посылает серверу запросы на языке SQL, а сервер выполняет их и возвращает результат. Наличие мощного и удобного языка запросов — одна из особенностей реляционных СУБД.

Другая особенность — поддержка согласованной работы транзакций.

<https://postgrespro.ru/docs/postgresql/16/protocol>



атомарность	— все или ничего
согласованность	— ограничения целостности и пользовательские ограничения
изоляция	— влияние параллельных процессов
долговечность	— сохранность данных даже после сбоя

Под *транзакцией* понимается последовательность операций, которая сохраняет согласованность данных при условии, что операции выполнены полностью и без помех со стороны других транзакций.

От транзакций ожидают выполнения четырех свойств (ACID):

- Атомарность: транзакция либо выполняется полностью, либо не выполняется вовсе. Для этого начало транзакции отмечается командой `BEGIN`, а конец — либо `COMMIT` (фиксация изменений), либо `ROLLBACK` (отмена изменений).
- Согласованность: транзакция переводит базу данных из одного согласованного состояния в другое согласованное состояние (под согласованностью понимается соблюдение определенных ограничений).
- Изоляция: другие транзакции, выполняющиеся одновременно с данной, не должны оказывать на нее влияния.
- Долговечность: после того, как данные зафиксированы, они не должны потеряться даже в случае сбоя.

За управление транзакциями (то есть за определение команд, составляющих транзакцию, и за фиксацию или отмену транзакции) в PostgreSQL, как правило, отвечает клиентское приложение. На стороне сервера управлять транзакциями могут хранимые процедуры.

<https://postgrespro.ru/docs/postgresql/16/sql-begin>

<https://postgrespro.ru/docs/postgresql/16/sql-savepoint>

<https://postgrespro.ru/docs/postgresql/16/transactions>

Управление транзакциями

По умолчанию psql работает в режиме автофиксации:

```
=> \echo :AUTOCOMMIT
```

on

Это приводит к тому, что любая одиночная команда, выданная без явного указания начала транзакции, сразу же фиксируется.

- Проверьте, включен ли аналогичный режим в драйвере PostgreSQL вашего любимого языка программирования?

Создадим таблицу с одной строкой:

```
=> CREATE TABLE t(  
  id integer,  
  s text  
);
```

CREATE TABLE

```
=> INSERT INTO t(id, s) VALUES (1, 'foo');
```

INSERT 0 1

Другая транзакция увидит таблицу и строку?

```
| => SELECT * FROM t;
```

```
|      id | s  
|-----+-----  
|      1 | foo  
| (1 row)
```

Да. Сравните:

```
=> BEGIN; -- явно начинаем транзакцию
```

BEGIN

```
=> INSERT INTO t(id, s) VALUES (2, 'bar');
```

INSERT 0 1

Что увидит другая транзакция на этот раз?

```
| => SELECT * FROM t;
```

```
|      id | s  
|-----+-----  
|      1 | foo  
| (1 row)
```

Изменения еще не зафиксированы, поэтому не видны другой транзакции.

```
=> COMMIT;
```

COMMIT

А теперь?

```
| => SELECT * FROM t;
```

```
|      id | s  
|-----+-----  
|      1 | foo  
|      2 | bar  
| (2 rows)
```

Режим без автофиксации неявно начинает транзакцию при первой выданной команде; изменения надо фиксировать самостоятельно.

```
=> \set AUTOCOMMIT off
```

```
=> INSERT INTO t(id, s) VALUES (3, 'baz');
```

INSERT 0 1

Что на этот раз?

```
=> SELECT * FROM t;
```

id	s
1	foo
2	bar

(2 rows)

Изменения не видны; транзакция была начата неявно.

```
=> COMMIT;
```

COMMIT

Ну и наконец:

```
=> SELECT * FROM t;
```

id	s
1	foo
2	bar
3	baz

(3 rows)

Восстановим режим, в котором psql работает по умолчанию.

```
=> \set AUTOCOMMIT on
```

Клиент-серверный протокол позволяет отправить на выполнение несколько SQL-операторов в одном сообщении. Такие операторы будут выполняться сервером в одной транзакции. Функция `pg_current_xact_id` покажет нам номер этой транзакции:

```
=> SELECT 1 AS res1, pg_current_xact_id(); SELECT 2 AS res2, pg_current_xact_id();
```

res1	pg_current_xact_id
1	14195

(1 row)

res2	pg_current_xact_id
2	14195

(1 row)

Отдельные изменения можно откатывать, не прерывая транзакцию целиком (хотя необходимость в этом возникает нечасто).

```
=> BEGIN;
```

BEGIN

```
=> SAVEPOINT sp; -- точка сохранения
```

SAVEPOINT

```
=> INSERT INTO t(id, s) VALUES (4, 'qux');
```

INSERT 0 1

```
=> SELECT * FROM t;
```

id	s
1	foo
2	bar
3	baz
4	qux

(4 rows)

Обратите внимание: свои собственные изменения транзакция видит, даже если они не зафиксированы.

Теперь откатим все до точки сохранения.

Откат к точке сохранения не подразумевает передачу управления (то есть не работает как GOTO); отменяются только те изменения состояния БД, которые были выполнены от момента установки точки до текущего момента.

```
=> ROLLBACK TO sp;
```

ROLLBACK

Что увидим?

=> **SELECT** * **FROM** t;

id	s
1	foo
2	bar
3	baz

(3 rows)

Сейчас изменения отменены, но транзакция продолжается:

=> **INSERT INTO** t(id, s) **VALUES** (4, 'xyz');

INSERT 0 1

=> **COMMIT**;

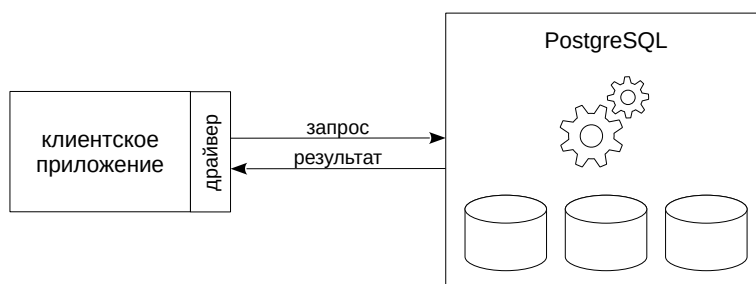
COMMIT

=> **SELECT** * **FROM** t;

id	s
1	foo
2	bar
3	baz
4	xyz

(4 rows)

Выполнение запроса



разбор	← системный каталог
переписывание	← правила
планирование	← статистика
выполнение	← данные

Выполнение запроса — довольно сложная задача. Запрос передается от клиента серверу в виде текста. Текст надо *разобрать* — выполнить синтаксический разбор (складываются ли буквы в слова, а слова — в команды) и семантический разбор (есть ли в базе данных таблицы и другие объекты, на которые запрос ссылается по имени). Для этого требуется информация о том, что вообще содержится в базе данных. Такая *мета-информация* называется *системным каталогом*, она хранится в самой базе данных в специальных таблицах.

Запрос может *переписываться* (трансформироваться) — например, вместо имени представления подставляется текст запроса. Можно придумать и свои трансформации, для чего есть механизм *правил*.

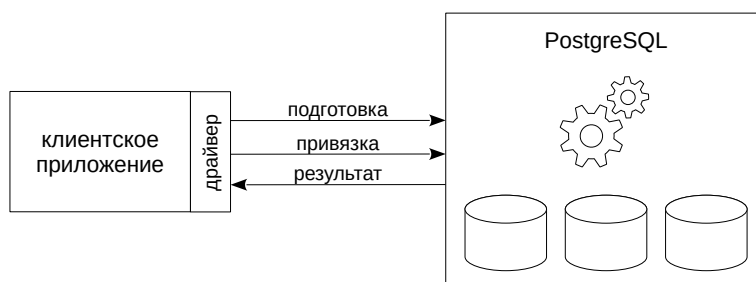
SQL — декларативный язык: запрос, составленный на нем, говорит о том, какие данные надо получить, но не говорит, как это сделать. Поэтому запрос (уже разобранный и представленный в виде дерева), передается *планировщику*, который разрабатывает *план выполнения*. Например, планировщик решает, надо ли использовать индексы. Чтобы качественно спланировать работу, планировщику нужна информация о размере таблиц и о распределении данных в них — *статистика*.

Далее запрос выполняется в соответствии с планом и результат возвращается клиенту — целиком и полностью:

<https://postgrespro.ru/docs/postgresql/16/query-path>

Это удобный и простой способ для небольших выборок, он обеспечивается простым режимом протокола. Однако при значительном объеме данных и большом числе однотипных запросов он может оказаться проблематичным: неоправданно растут накладные расходы.

Подготовка операторов



разбор
переписывание

привязка
планирование
выполнение

← значения параметров

Итак, каждый запрос проходит перечисленные ранее шаги: разбор, переписывание, планирование и выполнение. Но если один и тот же запрос (с точностью до параметров) выполняется много раз, нет смысла каждый раз разбирать его заново.

Поэтому кроме обычного выполнения запросов протокол PostgreSQL предусматривает *расширенный режим*, который позволяет более детально управлять выполнением операторов.

В качестве одной из возможностей расширенный режим позволяет *подготовить* запрос — заранее выполнить разбор и переписывание и запомнить дерево разбора.

При выполнении запроса выполняется *привязка* конкретных значений параметров. Если необходимо, здесь выполняется планирование (в некоторых случаях PostgreSQL запоминает план запроса и не выполняет повторно этот шаг). Затем запрос выполняется.

Еще одно преимущество использования подготовленных операторов — невозможность внедрения SQL-кода.

<https://postgrespro.ru/docs/postgresql/16/sql-prepare>

<https://postgrespro.ru/docs/postgresql/16/sql-execute>

Подготовленные операторы

В SQL оператор подготавливается командой PREPARE (эта команда является расширением PostgreSQL, она отсутствует в стандарте):

```
=> PREPARE q(integer) AS
    SELECT * FROM t WHERE id = $1;
```

PREPARE

При этом выполняются разбор и переписывание, и полученное дерево разбора запоминается.

После подготовки оператор можно вызывать по имени, передавая фактические параметры:

```
=> EXECUTE q(1);
```

```
id | s
----+-----
 1 | foo
(1 row)
```

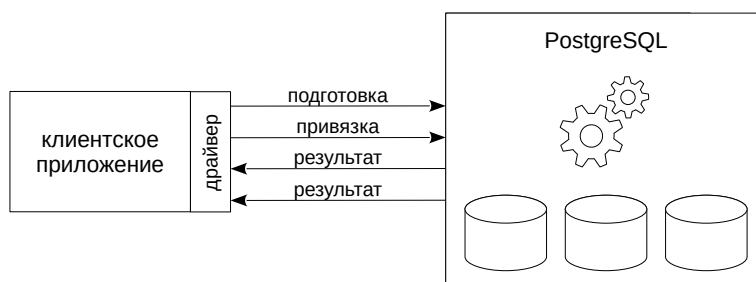
Если у запроса нет параметров, при подготовке запоминается и построенный план выполнения. Если же параметры есть, как в этом примере, то их фактические значения принимаются во внимание при планировании. Планировщик может счесть, что план, построенный без учета параметров, окажется не хуже, и тогда перестанет выполнять планирование повторно.

- А как подготовить и выполнить оператор в вашем любимом языке?
- Есть ли возможность выполнить оператор, НЕ подготавливая его?

Все подготовленные операторы текущего сеанса можно увидеть в представлении:

```
=> SELECT * FROM pg_prepared_statements \gx
```

```
-[ RECORD 1 ]-----+-----
name          | q
statement     | PREPARE q(integer) AS
               |     SELECT * FROM t WHERE id = $1;
prepare_time  | 2024-01-18 12:39:56.462896+03
parameter_types | {integer}
result_types  | {integer,text}
from_sql      | t
generic_plans | 0
custom_plans  | 1
```



разбор
переписывание

привязка
планирование
выполнение

получение результата

← значения параметров

Не всегда клиенту бывает удобно получить все результаты сразу. Данных может оказаться много, но не все они могут быть нужны.

Для этого расширенный режим протокола предусматривает *курсоры*. Можно открыть курсор для какого-либо оператора, а затем получать результирующие данные построчно по мере необходимости.

Курсор можно рассматривать как окно, в котором видна только часть из множества результатов. При получении строки данных окно сдвигается. Иными словами, курсоры позволяют работать с реляционными данными (множествами) итеративно, строка за строкой.

Открытый курсор представлен на сервере так называемым *порталом*. Это слово встречается в документации; в первом приближении можно считать «курсор» и «портал» синонимами.

Запрос, используемый в курсоре, неявно подготавливается (то есть сохраняется его дерево разбора и, возможно, план выполнения).

<https://postgrespro.ru/docs/postgresql/16/sql-declare>

<https://postgrespro.ru/docs/postgresql/16/sql-fetch>

Курсоры

При выполнении команды SELECT сервер передает, а клиент получает сразу все строки:

```
=> SELECT * FROM t ORDER BY id;
```

```
id | s
----+-----
 1 | foo
 2 | bar
 3 | baz
 4 | xyz
(4 rows)
```

Курсор позволяет получать данные построчно.

```
=> BEGIN;
```

```
BEGIN
```

```
=> DECLARE c CURSOR FOR
      SELECT * FROM t ORDER BY id;
```

```
DECLARE CURSOR
```

```
=> FETCH c;
```

```
id | s
----+-----
 1 | foo
(1 row)
```

Размер выборки можно указывать:

```
=> FETCH 2 c;
```

```
id | s
----+-----
 2 | bar
 3 | baz
(2 rows)
```

Этот размер играет большое значение, когда строк очень много: обрабатывать большой объем данных построчно очень неэффективно.

Что, если в процессе чтения мы дойдем до конца таблицы?

```
=> FETCH 2 c;
```

```
id | s
----+-----
 4 | xyz
(1 row)
```

```
=> FETCH 2 c;
```

```
id | s
----+-----
(0 rows)
```

FETCH просто перестанет возвращать строки. В обычных языках программирования всегда есть возможность проверить это условие.

- Как в вашем языке программирования получать данные построчно с помощью курсора?
- Есть ли возможность НЕ пользоваться курсором и получить все строки сразу?
- Как настраивается размер выборки для курсора?

По окончании работы открытый курсор закрывается, освобождая ресурсы:

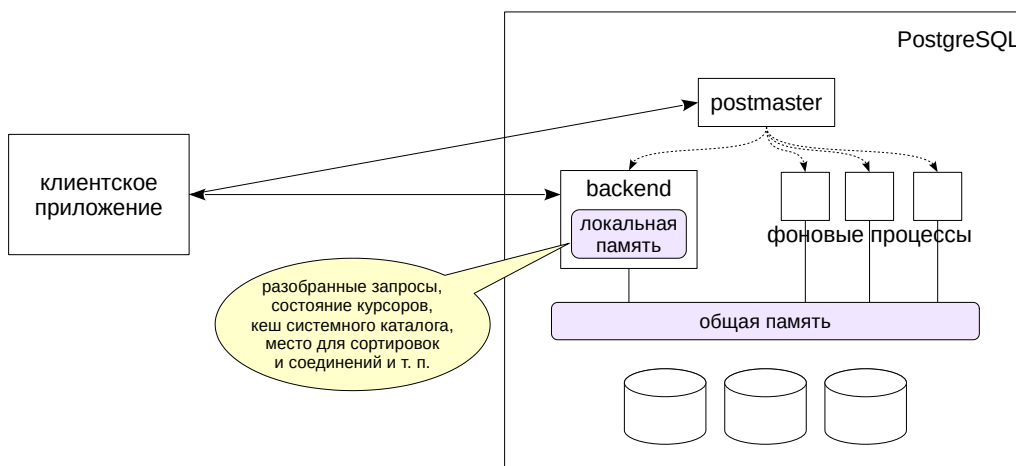
```
=> CLOSE c;
```

```
CLOSE CURSOR
```

Однако курсоры автоматически закрываются по завершению транзакции, так что можно не закрывать их явно. (Исключение составляют курсоры, открытые с указанием WITH HOLD.)

```
=> COMMIT;
```

```
COMMIT
```



Между обращениями клиента сервер должен хранить вспомогательную информацию: разобранные запросы и их планы, состояние открытых курсоров (порталы). Где и как он это делает?

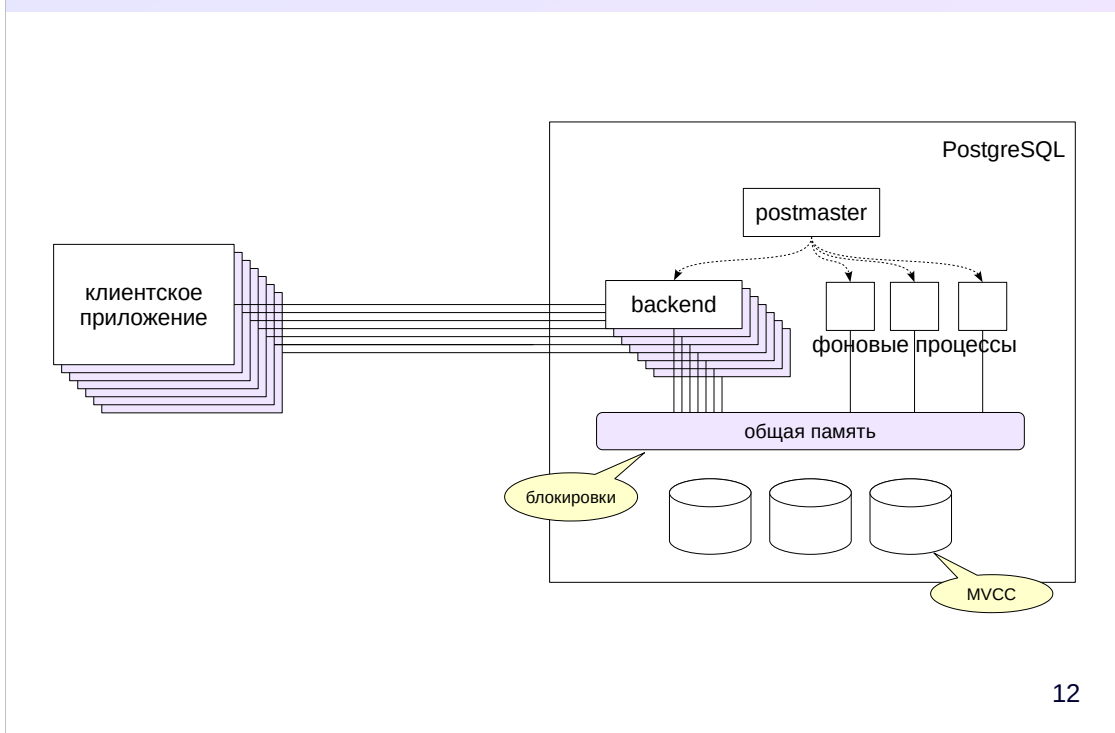
Сервер PostgreSQL состоит из нескольких взаимодействующих процессов. В первую очередь при старте сервера запускается процесс, традиционно называемый `postmaster`. Он запускает все остальные процессы (с помощью системного вызова `fork` в Unix) и «присматривает» за ними — если какой-нибудь процесс завершится аварийно, `postmaster` перезапустит его (или перезапустит весь сервер, если сочтет, что процесс мог повредить общие данные).

Работу сервера обеспечивает ряд фоновых служебных процессов. В следующих темах этого модуля мы поговорим об основных из них.

Чтобы процессы могли обмениваться информацией, `postmaster` выделяет *общую память*, доступ к которой могут получить все процессы. Кроме общей памяти, каждый процесс имеет и свою *локальную память*, доступную только ему самому.

`Postmaster` слушает входящие соединения. Для каждого вновь подключающегося клиента `postmaster` порождает обслуживающий процесс (`backend`) и дальше клиент общается уже с этим процессом. Обслуживающий процесс, в том числе, производит аутентификацию.

Место, необходимое для выполнения запроса (разобранные запросы и их планы, состояние курсоров, кеш системного каталога, место для сортировки данных и т. п.), выделяется в *локальной памяти* обслуживающего процесса.



Когда к серверу подключается много клиентов, для каждого из них порождается собственный обслуживающий процесс. Это не проблема, пока клиентов не очень много, на всех хватает оперативной памяти, а соединения не происходят слишком часто.

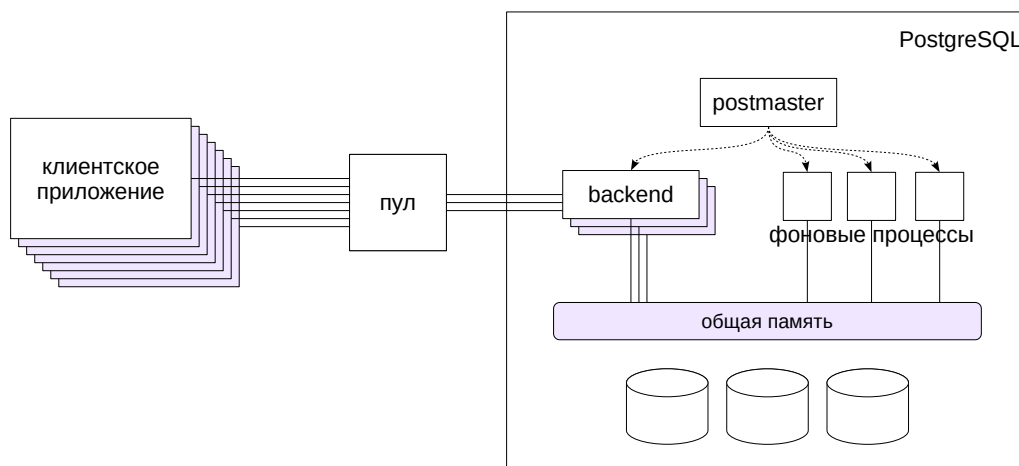
Тем не менее при одновременной работе с какими-либо объектами приходится принимать меры, чтобы один процесс не поменял какие-то данные в то время, пока с ними работает другой процесс.

Для объектов в общей памяти используются короткоживущие блокировки. PostgreSQL делает это достаточно аккуратно для того, чтобы система хорошо масштабировалась при увеличении числа процессоров (ядер).

С таблицами сложнее, поскольку блокировки нужно удерживать до конца транзакций (то есть потенциально в течение длительного времени), из-за чего масштабируемость может пострадать. Поэтому PostgreSQL использует механизм *многоверсионности* (MVCC, *multiversion concurrency control*) и *изоляция на основе снимков данных*: одни и те же данные могут одновременно существовать в разных версиях, а каждый процесс видит собственную (но всегда согласованную) картину данных. Это позволяет блокировать только те процессы, которые пытаются изменить данные, уже измененные, но еще не зафиксированные, другими процессами.

Многоверсионность — основной механизм, который обеспечивает первые три свойства транзакций (атомарность, согласованность, изоляция). Про него мы будем говорить отдельно в теме «Изоляция и многоверсионность».

Пул соединений



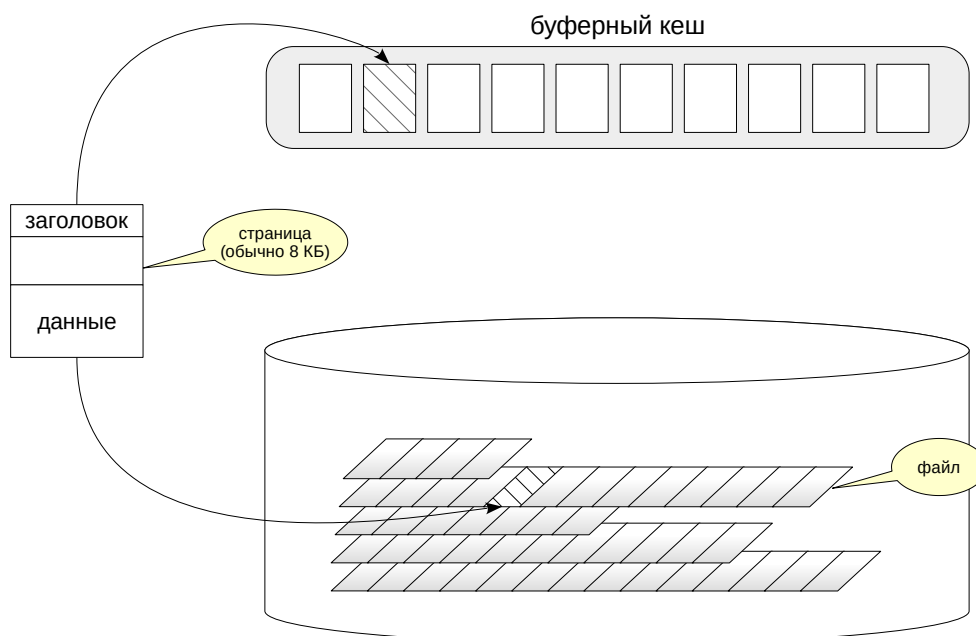
13

Если клиентов слишком много, или соединения устанавливаются и разрываются слишком часто, стоит подумать о применении пула соединений. Такую функцию обычно предоставляет сервер приложений или можно воспользоваться сторонними менеджерами пула (наиболее известен pgBouncer).

Клиенты подключаются не к серверу PostgreSQL, а к менеджеру пула. Менеджер удерживает открытыми несколько соединений с сервером баз данных и использует одно из свободных для того, чтобы выполнять запросы клиента. Таким образом, с точки зрения сервера число клиентов остается постоянным вне зависимости от того, сколько клиентов обращаются к менеджеру пула.

Но при таком режиме работы несколько клиентов разделяют один и тот же обслуживающий процесс, который — как мы говорили — в своей локальной памяти хранит определенное состояние (в частности, разобранные запросы для подготовленных операторов). Это необходимо учитывать при разработке приложения.

Подробнее вопросы применения пула соединений рассматриваются в курсе DEV2.

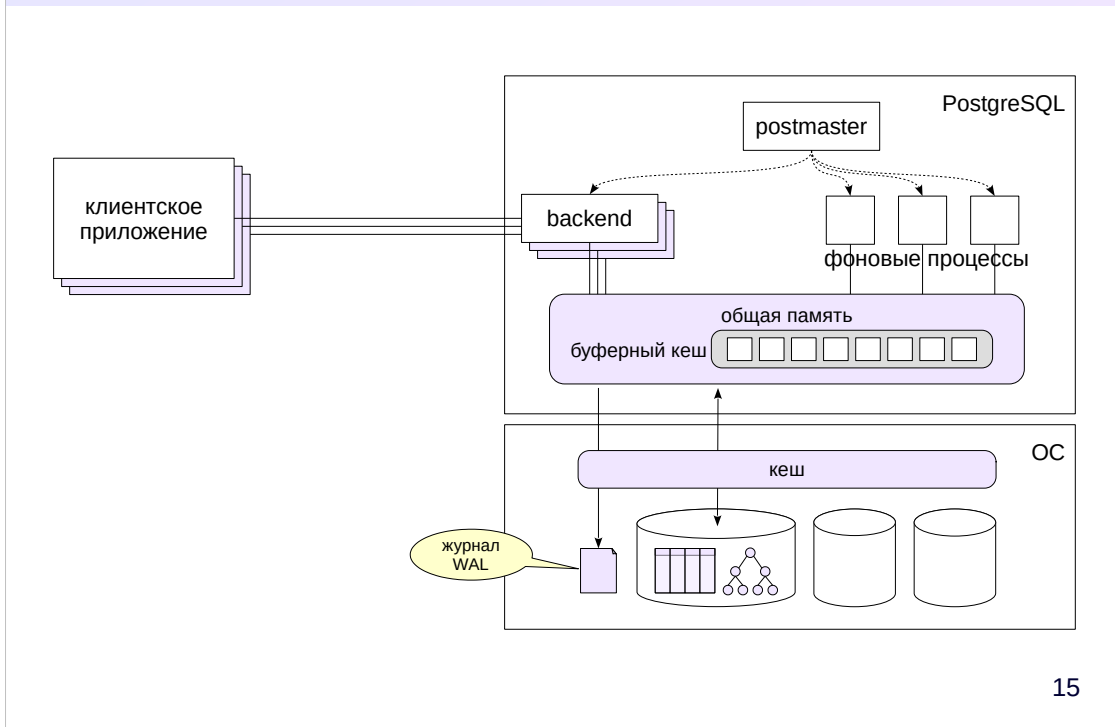


Данные хранятся на дисках в обычных файлах операционной системы. Как именно данные распределены по файлам, рассматривается в теме «Низкий уровень».

Логически файлы разделены на *страницы* (иногда используется термин *блок*). Страница обычно имеет размер 8 Кбайт. Его в некоторых пределах можно поменять (16 или 32 Кбайта), но только при сборке сервера. Таким образом собранный и запущенный кластер может работать со страницами только одного размера.

Каждая страница имеет внутреннюю разметку. Страница содержит заголовок и полезные данные; между ними может находиться свободное пространство, если страница занята не полностью.

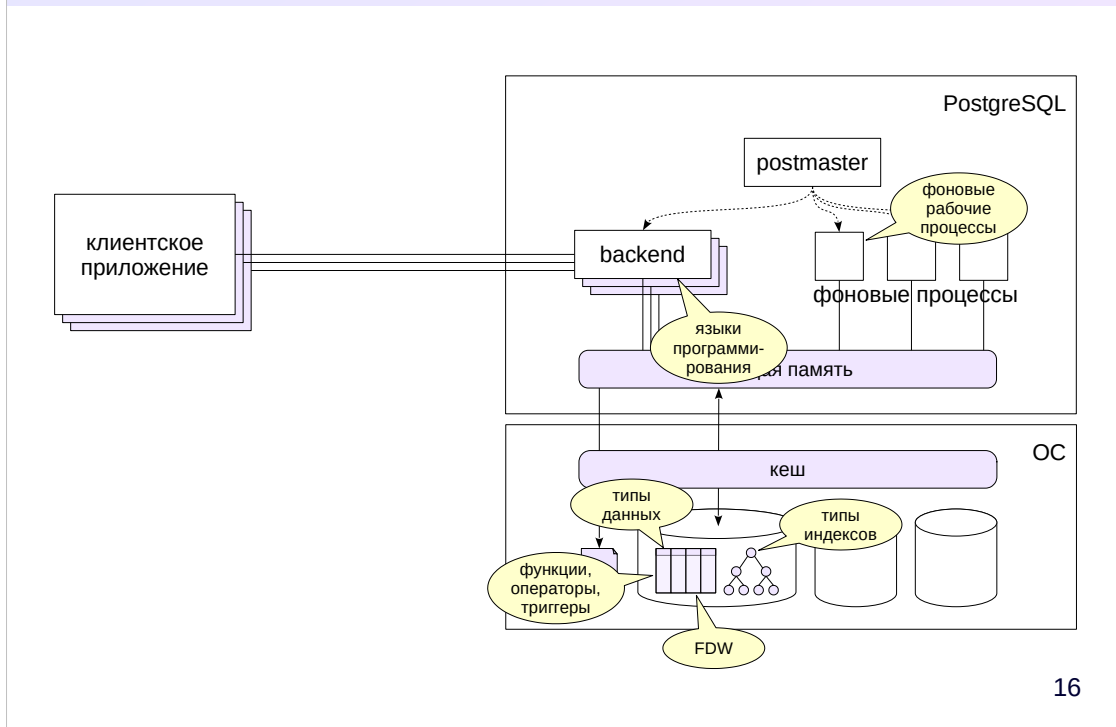
Из-за того, что диски работают значительно медленнее, чем оперативная память (особенно HDD, но и SSD тоже), применяется *кеширование*: в оперативной памяти отводится место под недавно прочитанные с диска страницы — *буферный кеш*. Расчет делается на то, что одни и те же страницы понадобятся несколько раз и можно будет сэкономить на повторном обращении к диску. Измененные данные также записываются на диск не сразу, а через некоторое время.



Буферный кеш PostgreSQL располагается в общей памяти, чтобы все процессы имели к нему доступ.

PostgreSQL работает с дисками, на которых находятся данные, не напрямую, а через операционную систему. У операционной системы тоже имеется собственный кеш данных. Поэтому, если страница не будет найдена в буферном кеше, остается шанс, что она есть в кеше ОС и обращения к диску удастся избежать.

При сбое (например, питания) содержимое оперативной памяти пропадает и данные, измененные, но еще не записанные на диск, теряются. Это недопустимо и противоречит свойству долговечности транзакций. Поэтому в процессе работы PostgreSQL постоянно записывает специальный журнал, позволяющий повторно выполнить потерянные операции и восстановить данные в согласованном состоянии. Про буферный кеш и журнал мы будем говорить отдельно в одноименной теме.



PostgreSQL спроектирован с расчетом на расширяемость.

Для прикладного программиста есть возможность создавать собственные типы данных на основе уже имеющихся (составные типы, диапазоны, массивы, перечисления), писать хранимые подпрограммы для обработки данных (в том числе триггеры, срабатывающие при наступлении каких-либо событий).

При необходимости можно написать расширение, которое добавляет необходимый функционал. Большинство расширений можно устанавливать «на лету», без рестарта сервера. Благодаря такой архитектуре, существует большое количество расширений, которые:

- добавляют поддержку языков программирования (помимо стандартных SQL, PL/pgSQL PL/Perl, PL/Python и PL/Tcl);
- вводят новые типы данных и операторы для работы с ними;
- создают новые типы индексов для эффективной работы с разнообразными типами данных (помимо стандартных B-деревьев, GiST, SP-GiST, GIN, BRIN, Bloom);
- подключают внешние системы с помощью оберток сторонних данных (foreign data wrapper, FDW);
- запускают фоновые процессы для выполнения дополнительных задач.

Расширяемость всесторонне рассматривается в курсе DEV2.

Сервер управляет кластером баз данных

Протокол позволяет клиентам подключаться к серверу, выполнять запросы и управлять транзакциями

Каждый клиент обслуживается своим процессом

Данные хранятся в файлах, обращение происходит через операционную систему

Кеширование как в локальной памяти (каталог, разобранные запросы), так и в общей (буферный кеш)