Авторы: Егор Рогов, Павел Лузанов

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

Темы

Клиент-серверный протокол

Транзакционность и механизмы ее реализации

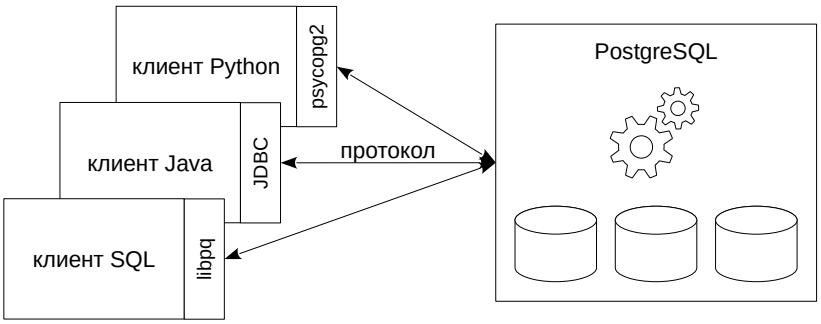
Схема обработки и способы выполнения запросов

Процессы и структуры памяти

Хранение данных на диске и работа с ними

Расширяемость системы

Клиент и сервер



подключение
формирование запросов
управление транзакциями

аутентификация
выполнение запросов
поддержка транзакционности

Клиентское приложение — например, psql или любая другая программа, написанная на любом языке программирования, — подключается к серверу и как-то «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 может реализовать протокол самостоятельно.

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

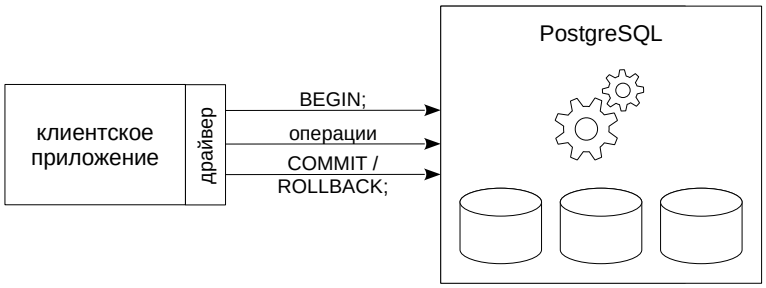
Если говорить в самых общих чертах, протокол позволяет клиенту подключиться к одной из баз данных кластера. При этом сервер выполняет *аутентификацию* — решает, можно ли разрешить подключение, например, запросив пароль.

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/12/protocol

Транзакции



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

Под *транзакцией* понимается некоторая логически неделимая часть работы, сохраняющая согласованность данных в базе.

От транзакций ожидают соответствия четырем требованиям (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 начинается в согласованном состоянии и, завершаясь, также сохраняет согласованность.

- Изоляция: другие транзакции, выполняющиеся одновременно с данной, не должны оказывать на нее влияние.

- 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. Управлять транзакциями на стороне сервера могут хранимые процедуры (с которыми мы познакомимся в модулях «SQL» и «PL/pgSQL»).

https://postgrespro.ru/docs/postgresql/12/sql-begin

https://postgrespro.ru/docs/postgresql/12/sql-savepoint

Управление транзакциями

По умолчанию psql работает в режиме автофиксации:

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

```
on
```

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

- 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
```

Изменения можно откатывать, не прерывая транзакцию (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 изменения состояния БД, выполненные 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
```

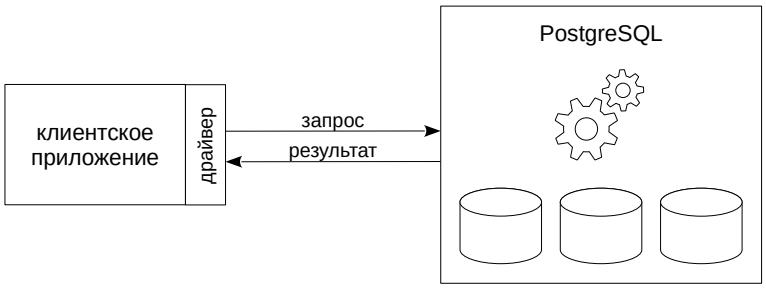
```
=> COMMIT;
```

```
COMMIT

=> SELECT * FROM t;

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

Выполнение запроса



разбор	← *системный каталог*
трансформация	← *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* и хранится в самой же базе данных в специальных таблицах.

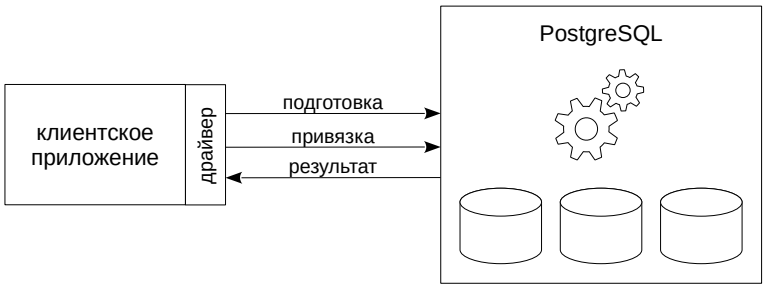
Запрос может трансформироваться — например, вместо имени представления подставляется текст запроса. Можно придумать и свои трансформации, для чего есть механизм *правил.*

SQL — декларативный язык: запрос 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 или не надо использовать индексы. Чтобы качественно спланировать работу, планировщику нужна информация о размере таблиц, о распределении данных — *статистика*.

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

Это удобный и простой способ для небольших выборок, однако при большом объеме данных он может оказаться проблематичным.

Подготовка операторов



разбор
трансформация

привязка
планирование
выполнение

← *значения параметров*

Каждый запрос проходит перечисленные ранее шаги: разбор, трансформацию, 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 трансформацию и запомнить дерево разбора.

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

Еще одно преимущество подготовленных операторов — невозможность внедрения SQL-кода (этот аспект будет подробно рассмотрен в теме «PL/pgSQL. Динамические команды»).

https://postgrespro.ru/docs/postgresql/12/sql-prepare

https://postgrespro.ru/docs/postgresql/12/sql-execute

Подготовленные операторы

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

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

```
PREPARE
```

При этом выполняется разбор, трансформация и запоминается полученное дерево разбора.

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. Но планировщик может счесть, что план, построенный без учета параметров, окажется не хуже, и тогда перестанет выполнять планирование повторно.

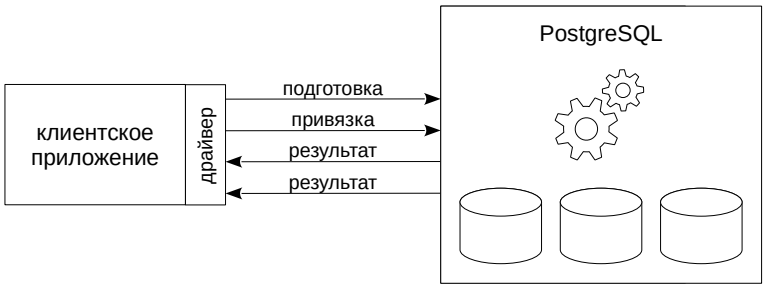
- А как подготовить и выполнить оператор в вашем любимом языке?
- Есть ли возможность выполнить оператор, НЕ подготавливая его?

Все подготовленные операторы 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    | 2022-12-16 21:09:49.433918+03
parameter_types | {integer}
from_sql        | t
```

Курсоры



разбор
трансформация

привязка ← *значения параметров*
планирование
выполнение

получение результата

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

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

Курсор можно рассматривать как окно, в которое видна только часть строк из результирующего множества. 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/12/sql-declare

https://postgrespro.ru/docs/postgresql/12/sql-fetch

Курсоры

Обычная команда SELECT 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)
```

Размер выборки 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 можно закрыть, освобождая ресурсы:

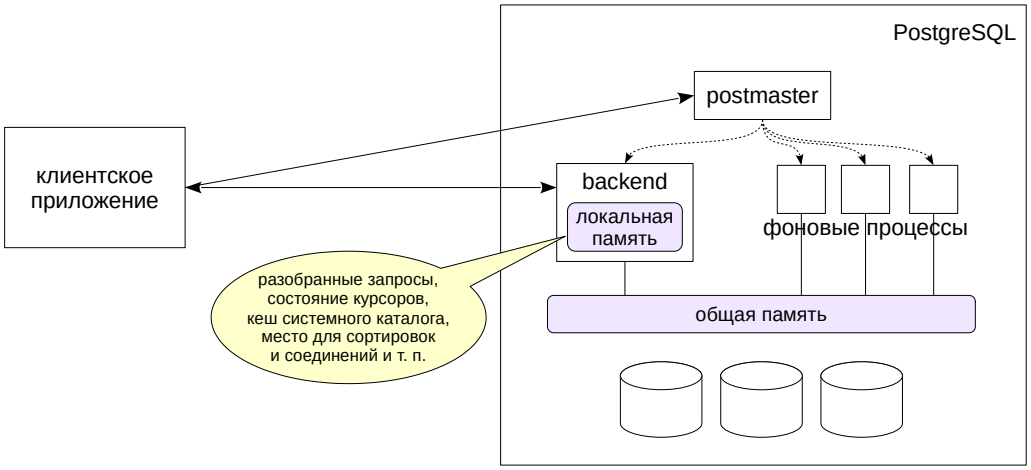
```
=> CLOSE c;
```

```
CLOSE CURSOR
```

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

```
=> COMMIT;
COMMIT
```

Процессы и память



11

Пока клиент подключен, сервер должен хранить всю относящуюся к сеансу 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 юниксе) 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).

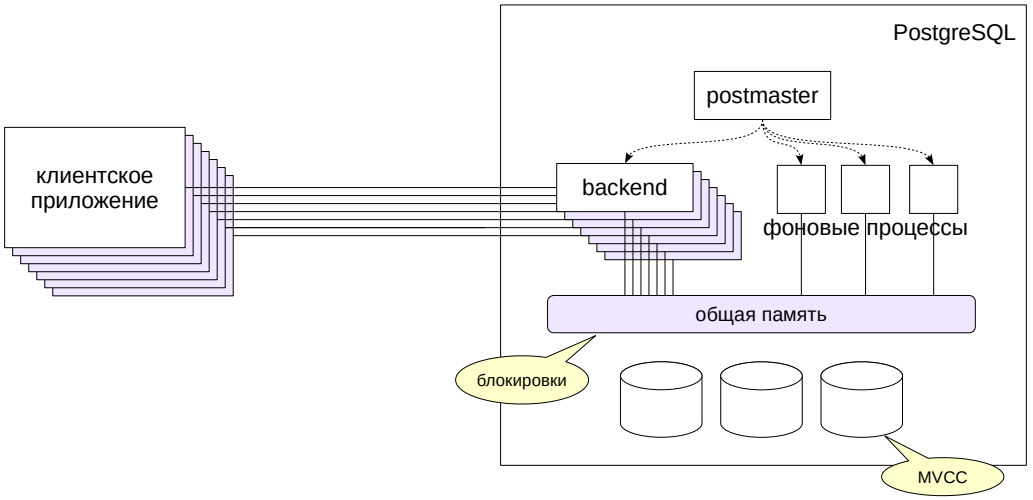
Работу сервера обеспечивает ряд фоновых служебных процессов. В следующих темах этого модуля мы поговорим об основных из них.

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. При появлении клиента postmaster порождает для него обслуживающий процесс (backend), и дальше клиент общается уже со своим процессом.

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.

Много клиентов



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.

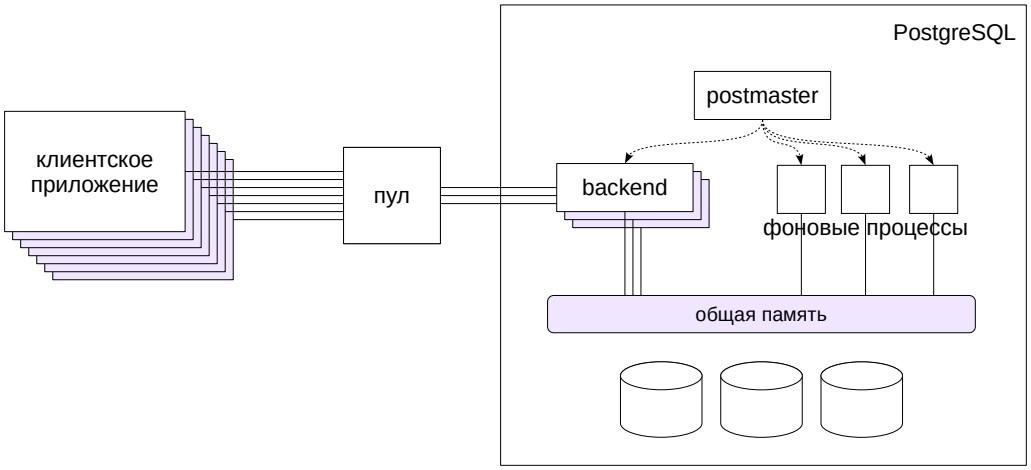
Тем не менее при одновременной работе с какими-либо объектами приходится принимать меры, чтобы один процесс не поменял какие-либо данные в то время, пока с ними работает другой процесс.

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 придется удерживать до конца транзакций (то есть потенциально в течение долгого времени), из-за чего масштабируемость может пострадать. Поэтому PostgreSQL использует механизм *многоверсионности (MVCC, multiversion concurrency control)* и *изоляцию 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 — тот основной механизм, который обеспечивает первые три свойства транзакций (атомарность, согласованность, изоляция). Про него мы будем говорить отдельно в теме «Изоляция и многоверсионность».

Пул соединений



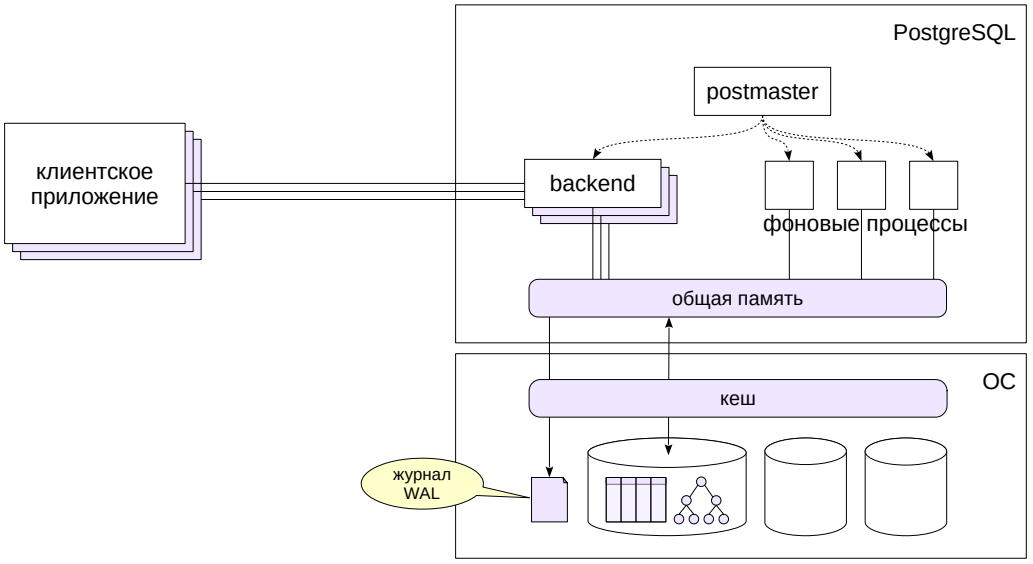
Если клиентов слишком много, или соединения устанавливаются и разрываются слишком часто, стоит подумать о применении пула соединений. Такую функцию обычно предоставляет сервер приложений, или можно воспользоваться сторонними менеджерами пула (наиболее известен PgBouncer).

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.

Хранение данных



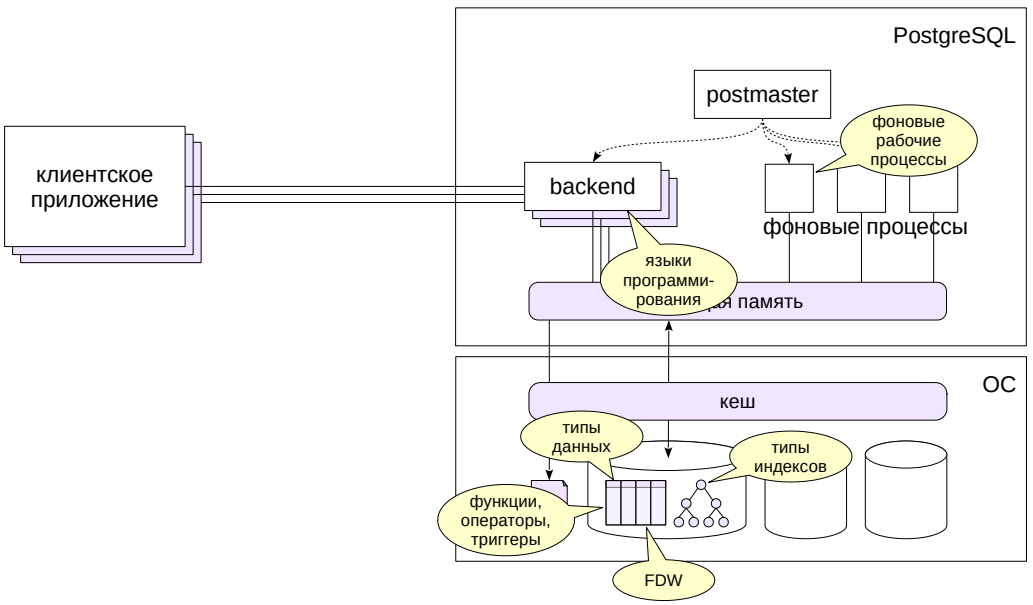
PostgreSQL работает с дисками, на которых находятся данные, не напрямую, а через операционную систему. Данные хранятся в обычных файлах и читаются или записываются с помощью соответствующих системных вызовов.

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 страницы в надежде, что к ним будет несколько обращений и можно будет сэкономить на повторном обращении к диску. Измененные данные также записываются на диск не сразу, а через некоторое время.

Важный момент: кеш имеется как у операционной системы, так и у PostgreSQL. Кеш данных PostgreSQL (буферный кеш) располагается в общей памяти, чтобы все процессы имели к нему доступ.

При сбое (например, питания) содержимое оперативной памяти пропадает и часть данных может потеряться — что недопустимо (свойство долговечности). Поэтому в процессе работы PostgreSQL постоянно записывает журнал, позволяющий повторно выполнить потерянные операции и восстановить данные в согласованном состоянии. Про буферный кеш и журнал мы будем говорить отдельно в одноименной теме.

Расширяемость



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 функции для обработки данных (в том числе триггеры, срабатывающие при наступлении каких-либо событий).

Если владеть языком программирования Си, можно написать расширение, которое добавляет необходимый функционал. Большинство расширений можно устанавливать «на лету», без перезагрузки 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 периодических заданий.

Расширяемость всесторонне рассматривается в курсе DEV2.

Итоги

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)