Стандарт C++11 – C++14 multithreading

Полубенцева Марина Игоревна

Кроссплатформенные многопоточные библиотеки

- Набор библиотек Boost
- OpenMP
- OpenThreads
- POCO Thread (часть проекта POCO — http://pocoproject.org/poco/info/index.html)
- Zthread
- Pthreads
- Qt Threads
- Intel Threading Building Blocks
- **Стандартная библиотека C++ (C++11)**

ПРОПИСНЫЕ ИСТИНЫ (КОРОТКО)

Цель у разработчиков схемотехники и у программистов общая - **повышение производительности**

- задача разработчика схемотехники – предоставить средства,
  задача программиста — наиболее эффективно эти средства задействовать
- современный компьютер – это многопроцессорное оборудование
  => **распараллеливание** обработки данных
  => распараллеливание приводит к возникновению общих (**shared**) данных, доступ к которым программист должен **синхронизировать**

Средства синхронизации, предоставляемые ОС, и параллельность

- средства ОС не предоставляют **средств построения параллельных структур данных**, обеспечивающих совместный доступ
- вместо этого ОС предоставляет средства **ограничения** доступа к данным в виде примитивов синхронизации
- => в некотором смысле синхронизация – это **антипод** параллельности

Синхронизация –**антипод** параллельности

- распараллеливая алгоритмы, мы работаем с последовательными структурами данных, регулируя доступ к данным примитивами синхронизации – критическими секциями, мьютексами (mutex), условными переменными (condvar), …
- в результате мы выстраиваем все наши потоки в очередь на доступ к структуре данных,
- тем самым убивая параллельность

Важно!

- При возрастании числа потоков синхронизированный доступ к данным становится узким местом программы;
- => при увеличении степени параллельности вместо пропорционального увеличения производительности можно получить её ухудшение в условиях большой нагрузки (high contention)

Стандарт C++11

- добавляет в стандартную библиотеку thread library:
  - поддержку параллельного выполнения (потоки)
  - средства блокирующей синхронизации потоков в рамках одного приложения
  - средства «неблокирующей» синхронизации: атомарные операции и атомарные типы
  - средства для межпоточной обработки исключений
  - …
- но! **не** поддерживает коммуникацию между разными процессами

Параллелизм может быть реализован:

- Аппаратно. На компьютере может быть:
  - несколько процессоров
  - многоядерный процессор
  - комбинация двух предыдущих вариантов
- Программно:
  - «псевдо-параллельно» - переключение потоков ОС

Средства C++11 применимы **независимо** от аппаратной поддержки, но всегда нужно оценивать cost/benefit от использования параллелизма! => прикладной программист должен уметь корректно и эффективно проектировать параллельный код

Основные способы распараллеливание задач:

- Посредством **процессов** – «+»/«-» ???
- Посредством **потоков** – «+»/«-» ???


Однопоточная программа


Многопоточная программа
с блокировками


Многопоточная программа
без блокировок

#include <chrono>

namespace std::chrono

CHRONO

До C++11
#include <ctime>

Типы:

- clock_t
- time_t
- tm

Функции:

- clock()
- time()
- localtime()
- ctime()
- mktime()
- …

Используется для задания/получения интервалов и моментов срабатывания функциями:

std::this_thread::**sleep_for**()
std::this_thread::**sleep_until**()
std::conditional_variable::**wait_for**()
std::conditional_variable::**wait_until**()
std::timed_mutex::**try_lock_for**()
std::timed_mutex::**try_lock_until** ()
std::recursive_timed_mutex::**try_lock_for**()
std::recursive_timed_mutex::**try_lock_until** ()
std::unique_lock:: **try_lock_for** ()
std::unique_lock:: **try_lock_until** ()
std::future::**wait_for**()
std::future::**wait_until**()
std::shared_future::**wait_for**()
std::shared_future::**wait_until**()
std::chrono::system_clock::**now()**

#include <chrono>

C++11 предоставляет три вида часов:

- ***system_clock*** - системное время в текущей ОС. Имеет функции для преобразования моментов времени в time_t и обратно
- ***high_resolution_clock*** - максимально возможное **на данной** системе разрешение (то есть наименьший тактовый период)
- ***steady_clock*** - «стабильные часы», так как гарантированно не допускают коррекции времени системой, то есть перевода стрелок

???

- какие часы лучше использовать для измерения времени выполнения фрагмента кода

Информация, предоставляемая chrono:

- текущее время – статический метод **now**()
- тип, для хранения времени – typedef **time_point** (для часов конкретного типа)
- величина такта часов – typedef **period** (в долях секунды)
- признак равномерного хода времени – не допускают коррекции времени системой, то есть перевода стрелок (такие часы называются стабильными) – статическая переменная **is_steady**

Реализация концепции **нейтральной точности std::chrono**

- отделение понятия интервала (duration) и момента времени (timepoint) от конкретных часов:

- шаблон **duration** – количество тактов заданной продолжительности/дискретности (в любых единицах, в частности в долях)
- шаблон **timepoint** – момент времени, измеренный для конкретных часов. Комбинация начала отсчета (эпохи) и интервала

Интервалы времени std::chrono::**duration**

```
template<
    class Rep, //тип представления (int, double…)
    class Period = std::ratio<1> //дробь –
                                <число секунд>/<число тиков>
> class duration;
```

Замечание: Period – константа, известная компилятору на этапе компиляции!

Интервалы времени
Примеры:

```
std::chrono::duration<int> sec(10); //10 сек по умолчанию 1/1
std::chrono::duration<double, std::ratio<60>>  min(0.5);
                                                //0.5 мин  60/1
std::chrono::duration<long, std::ratio<1,1000>>  ms(2);
                                                //2 мс  1/1000

int n = 1000;
std::chrono::duration<long, std::ratio<1, n>> msn(2); //???

//Псевдонимы
std::chrono::seconds sec(10);
std::chrono::hours h(5);
std::chrono::milliseconds ms(2);
```

Замечание:

- между типами duration существует **НЕЯВНОЕ** преобразование, если точность при этом повышается:
  - то есть часы в секунды можно
  - секунды в часы нельзя
- для явного преобразования используется std::chrono::**duration_cast**<…>(…)
  при явном преобразовании время не округляется, а «отсекается»

Примеры преобразования duration:

```
std::chrono::milliseconds ms(60800);

//std::chrono::seconds s1 = ms; //ошибка – нет
                                подходящего преобразования

std::chrono::seconds s2 =
std::chrono::duration_cast<std::chrono::seconds>(ms);
                                //60 сек
```

C++14 – стандартные суффиксы для chrono-литералов

- «h», «min», «s», «ms», «us» и «ns» для создания соответствующих временных интервалов std::chrono::duration

```
using namespace std::chrono_literals;
std::chrono::seconds s1 = 10s;
auto s2 = 20s;
```

Действия с интервалами

```
// -, +, ==, <, % ….
std::chrono::seconds s(10);
std::chrono::hours h(5);
std::chrono::milliseconds ms(2);

std::chrono::milliseconds msres = ms + s;
//Ho!
//std::chrono::seconds sres = ms + s;
```

Пример представления интервала в привычном виде:

```
using namespace std::chrono;
milliseconds ms(7255042);
hours h = duration_cast<hours>(ms);
minutes m =
        duration_cast<minutes>(ms%hours(1));
seconds s =
        duration_cast<seconds>(ms%minutes(1));
milliseconds mss =
       duration_cast<milliseconds>(ms%seconds(1));
```

Моменты времени std::chrono::**time_point**

```
template<
    class Clock, // используемые часы
    class Duration = typename Clock::duration
                                        //единица измерения
> class time_point;
```

- промежуток времени (в указанных единицах) с некоторой точки на временной оси – эпохи (обычно 01.01.1970)

Эпоха:

- в стандарте это понятие не определено и не регламентировано
- напрямую запросить это значение невозможно (чему равна эпоха)
- но! можно получить время между указанным моментом time_point и началом эпохи – time_since_epoch()

Действия с моментами времени:

при условии, что они относятся к одним и тем же часам!

- можно вычитать
- к моменту времени можно прибавить/вычесть интервал
- ==, !=, <, <=, >, >=

Преобразования
std::chrono::**time_point** <-> std::**time_t**

```
static std::time_t to_time_t( const time_point& t );
static std::chrono::system_clock::time_point from_time_t(
                                                std::time_t t );

//Получение текущего момента времени
{
  std::chrono::system_clock::time_point tp =
        std::chrono::system_clock::now();
  std::time_t t =
        std::chrono::system_clock::to_time_t(tp);
 std::string ts = std::ctime(&t);
}
```

Формирование момента времени

```
//static std::chrono::time_point from_time_t(std::time_t t );

std::tm tTm = { 0 };
tTm.tm_year = 2015 - 1900;
tTm.tm_mon = 5;
tTm.tm_mday = 12;
tTm.tm_hour = 12;
tTm.tm_min = 00;
time_t t = std::mktime(&tTm);
std::chrono::system_clock::time_point tp =
                    std::chrono::system_clock::from_time_t(t);
```

Измерение времени

```
auto start = std::chrono::high_resolution_clock::now();
                                                    //в наносекундах
//измеряемый фрагмент
auto stop = std::chrono::high_resolution_clock::now();

//а результат интересует в мс
std::chrono::milliseconds t=
std::chrono::duration_cast<std::chrono::milliseconds>
                                                    (stop - start);
```

Интервалы и моменты времени используются:

- this_thread::**sleep_for**() и this_thread::**sleep_until**() - для блокировки текущего потока
- **try_lock_for**() и **try_lock_until**() – для задания timeout-а для мьютекса
- **wait_for**() и **wait_until**() - для задания timeout-а для переменной условия или объекта future

Замечание: для функций *_until – если до наступления момента время будет скорректировано, то изменения будут учтены

Важно!

Если используемая ОС не является ОСРВ, то заданный интервал или момент времени гарантируют только «не раньше, чем»!

РЕАЛЬНЫЙ ПАРАЛЛЕЛИЗМ

Важно!

Для любого использования параллелизма (реального или псевдо) программисту необходимо на этапе проектирования программы заложить в структуру программы возможность распараллеливания!

Когда параллелизм вреден!

cost/benefit:

- структура параллельных программ сложнее (=> дополнительное время на проектирование, разработку, отладку… + ошибки)
- накладные расходы на запуск и переключение потоков
- ограниченное количество вычислительных ядер в системе
- ограниченные ресурсы процесса (для каждого потока формируется свой стек => память)

STD::THREAD

Наступила эпоха реальной параллельности

```
void threadHello()
{ std::cout<<“Hello, parallel world!”;}

int main()
{
        std::thread th(threadHello);
        …
}
```

Назначение многопоточных приложений:

- использование одновременно нескольких вычислительных ядер для параллельного выполнения задач => **повышение производительности** приложения в целом за счет параллельного выполнения задач
- возможность выполнения одной задачи, пока другая задача ожидает какого-нибудь события => **повышение производительности** приложения в целом за счет использования вынужденных простоев

До стандарта C++11

«поддержка» параллелизма только с помощью платформенно-зависимых расширений
(_beginthreadex())

Проблемы:

- портируемость
- не сформулирована модель памяти с учетом многопоточности
- отсутствует поддержка механизма обработки межпоточных исключений

Преемственность от Boost

Из Boost Thread Library заимствованы:

- Функциональность
- Имена классов
- Имена методов и функций

boost vs C++11

- Boost поддерживает принудительное корректное завершение потока, C++11 нет
- в C++11 реализован std::async, в Boost нет
- Boost - boost::shared_mutex для multiple-reader/single-writer locking, в C++11 – нет, в C++14 shared_timed_mutex
- тайм-ауты организованы по-разному
- Отличия некоторых имен: boost::unique_future - std::future
- Каким образом передаются параметры потоковой функции: boost::bind, C++11 – variadic templates.
- в деструкторе boost::thread объект «отключается» (detach()) от системного потока. C++11 – если на момент вызова деструктора объект не отключен от системного потока, std::terminate() => приложение аварийно завершается

Способы распараллеливания с точки зрения прикладного программиста:

- по задачам - каждый поток выполняет свою подзадачу (=> возникают зависимости между частями общей работы => **синхронизация выполнения**)
- по данным – каждый поток выполняет свою специфическую операцию над общими данными (=> возникают конкуренция за данные => **синхронизация доступа к данным**)

Накладные расходы на запуск потока:

- ОС должна создать соответствующие служебные структуры данных (Windows – объекты исполняющей системы)
- выделить память для стека
- «сообщить» о новом потоке планировщику
- время на переключение потока
- потоки – это ограниченный ресурс (ОС может накладывать квоты на количество потоков в процессе, адресное пространство – не «безразмерное»…). Частично эту проблему решают пулы потоков

=> если накладные расходы на запуск потока соизмеримы с временем его выполнения, то производительность приложения в целом может **ухудшиться** по сравнению с выполнением задач в одном потоке! => для достижения максимальной производительности нужно выбирать количество потоков исходя из аппаратного параллелизма

На системном уровне

- Объект исполняющей системы thread описывается (ОС Windows):
  - дескриптор
  - идентификатор
- Задание приоритета только системными средствами (в C++11 соответствующих средств нет)
- Возможность задания ядер для выполнения – только системными средствами (Windows – SetProcessAffinityMask(), SetThreadAffinityMask())

Специфика:

1. выделение потоку времени для выполнения производится исключительно ОС, и ее в общем случае не интересует: относятся переключаемые потоки к одному процессу или к разным процессам

2. если в системе несколько ядер, ОС сама распределяет потоки по разным процессорам

3. все потоки одного процесса выполняются в едином адресном пространстве, поэтому

- «+» имеют доступ ко всем ресурсам процесса
- «-» - синхронизация

4. очередность выполнения потоков с одинаковым приоритетом определяется ОС => синхронизация

5. у каждого потока свой стек =>

- с локальными переменными ОК (если только другому потоку не передаются адреса локальных данных)
- глобальные и динамические данные доступны всем потокам одного процесса => синхронизация, TLS

ПОНЯТИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ПОТОКАМИ

1. Первичный и вторичные потоки ???
2. Контекст потока ???
3. Состояние потока ???

ПОТОКОВАЯ ФУНКЦИЯ

- Для **первичного** потока – стартовый код стандартной библиотеки (из которого вызывается main())
- Для **вторичного** потока – программист должен предоставить функцию, с которой начнется выполнение потока

Специфика потоковой функции

- порядок вызова обычных функций определяет программист, **потоковую функцию запускает система**.

Отличия вызова функции и запуска потока

Вызов обычной функции	Запуск потока
Вызывающая функция и вызываемая пользуются одним и тем же стеком.	Стек у каждого потока (порождающего и порожденного) свой

Отличия вызова функции и запуска потока

Вызов обычной функции	Запуск потока
Последовательность выполнения вызывающей и вызываемой функций предопределена и гарантируется компилятором.	Последовательность выполнения порождающего и порожденного потоков определяется системой, они относительно независимы.

Отличия вызова функции и запуска потока

Вызов обычной функции	Запуск потока
Параметры передаются в том же стеке => компилятор гарантирует, что локальные данные вызывающей функции существуют, пока выполняется вызываемая (=> безопасно передавать адреса локальных переменных)	Параметр формируется в стеке потоковой функции. Данные, передаваемые потоковой функции должны гарантированно существовать, пока ими пользуется порожденный поток

Памятка программисту:

- Чем меньше разделяемых данных, тем меньше проблем!
- С локальными для потока данными проблем нет (если только адреса этих локальных данных не передаются другому потоку)!

Преимущества/недостатки использования thread library C++11

- «+» - независимость от платформы, абстрагирование действий
- «-» - потеря эффективности по сравнению с чисто системными средствами за счет использования классов-оберток, ограниченность средств поддержки многопоточности по сравнению с системными возможностями

C++11

Новая часть стандартной библиотеки предоставляет **платформенно-независимые объектно-ориентированные**:

- управление потоками
- защиту разделяемых данных
- синхронизацию потоков
- атомарные операции

но! не поддерживает платформенно-независимое межпроцессное взаимодействие!

Средства C++11 для поддержки многопоточности:

- **thread**s,
- **mutex**es,
- **lock()** operations,
- packaged_tasks,
- futures
- promises
- atomic
- TLS
- **…**

Специфика

- Платформенная независимость
- Эффективность (несмотря на абстрагирование)
- Возможность «спускаться» на системный уровень

Специфика реализация потоковой функции в C++11

- На системном уровне можно реализовать только посредством глобальной функции или статического метода класса
- Средствами высокоуровневой обертки C++11 шаблона function – все, что «можно вызвать» **callable**:
  - глобальную функцию
  - статический метод класса
  - функциональный объект
  - лямбда-функцию
  - bind
  - метод класса

Специфика передачи параметров потоковой функции в C++11

- На системном уровне единственный параметр типа void*
- Реализация C++11 – любое количество параметров любого типа, так как реализована посредством variadic template

#include <thread>

namespace std

НИЗКОУРОВНЕВЫЙ ИНТЕРФЕЙС ДЛЯ ЗАПУСКА ПОТОКОВ - КЛАСС THREAD

std::thread

Конструкторы:

- thread(); //резервируется и инициализируется память под объект, привязки к потоку нет! **поток НЕ стартует**!
- thread(const thread&) = delete;
- thread(thread&& other);
- template< class Function, class... Args >
  explicit thread(Function&& f, Args&&... args);

operator= :

- thread& operator=(const thread&) = delete;
- thread& operator=(thread &&) ;

move конструктор копирования и move operator=

Передача «владения» потоком другому объекту.

Используется:

- для передачи в качестве параметра
- для возврата по значению
- чтобы объединить объекты thread в коллекцию

Пример:

```
void threadFunc(int n, char c)
{ for(int i=0; i<n; i++) {std::cout<<c;} }

void f(std::thread t){
…
}
int main(){
        std::thread t(threadFunc, 10, ‘A’);
        f(t); //???
}
```

Замечание:

Механизм не поддерживает задание параметров потоковой функции по умолчанию:

void threadFunc(char, size_t **=10**);

```
int main()
{
        std::thread t1(threadFunc, 'A', 5);
        //std::thread t2(threadFunc, 'B'); //”too few parameters ”
        …
}
```

???

```
int main(){
   std::vector<thread> v;
   for(int i=0; i<10; i++)
          {
                 std::thread th(threadFunc, i+10, ‘A’+i);
                   v.push_back(th);  //???
           }
   …
}
```

Как лучше?

Запуск потока

Посредством:

- конструктора с параметром (параметрами):
  - первым (обязательным) параметром должен быть callable (указатель на потоковую функцию, функциональный объект, …)
  - все остальные параметры – параметры, которые требуется передать потоковой функции
- в случае неудачи генерирует std::system_error

При вызове конструктора с параметрами:

- значения параметров копируются в локальный анонимный объект (если при этом генерируются исключения, то генерация происходит в текущем потоке!)
- вызывается метод, который запускает системный поток

Завершение потока

- естественное завершение - при завершении потоковой функции
- C++11 - принудительного завершения нет (только системными средствами, Windows – ExitThread())
- аварийное завершение (при генерации исключения)
- Важно! при завершении первичного потока все вторичные принудительно завершаются ОС

Пример запуска потока посредством конструктора с параметром

```
void SimpleThreadFunc()
{
…
}

int main()
{
    std::thread th(SimpleThreadFunc);

    …
}
```

Разница???

```
void SimpleThreadFunc() { … }

int main()
{
    SimpleThreadFunc();
    std::thread th(SimpleThreadFunc);
    …
}
```

Использование лямбда-функции

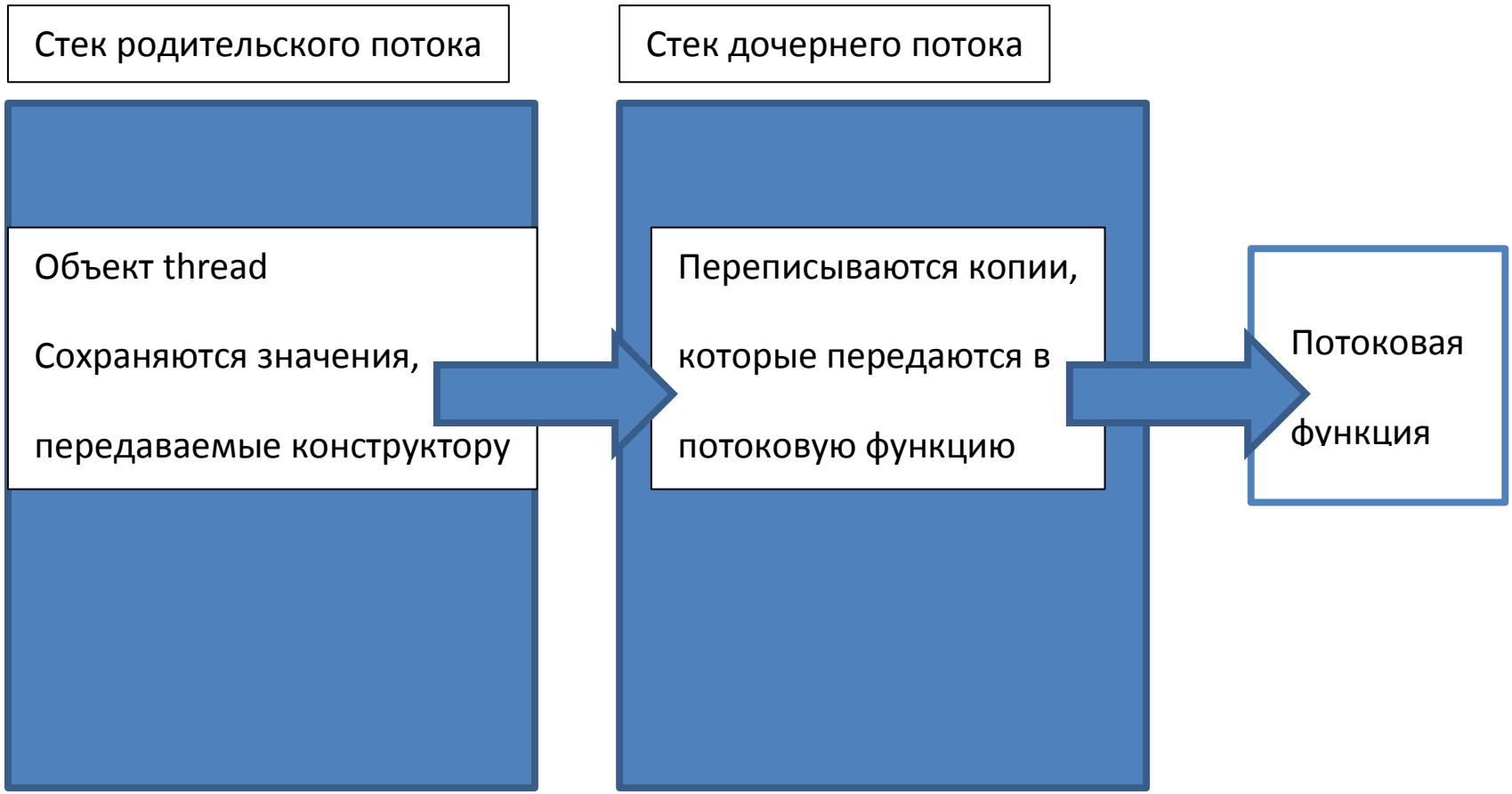
```
int main()
{
   std::thread th(
        [](){ std::cout<<“Hello, parallel World!”; }
   );
        …
}
```

Передача потоковой функции параметров по значению

```
void ThreadFuncParamsByValue(int n, double d)
{ std::cout << n << ‘ ‘<<d<<std::endl; }


int main()
{
        …
        std::thread th(ThreadFuncParamsByValue, 5, 3.3);
        …
}
```

Передача параметров потоковой функции



Использование семантики перемещения

```
void ThreadFuncByValue(std::string s) {  … }

int main() {
        …
        std::string str(“abc”);
        std::thread th(ThreadFuncByValue,
                                        std::move(str));
        //str???
        …
}
```

Параметр – функциональный объект

```
class A {
…
void operator() ();
};

int main()
{
        std::thread th1( A() ); //???
        std::thread th2( ( A() ) );
        std::thread th3{ A() };
        …
}
```

Передача потоковой функции параметров по ссылке

```
class A{
        int m_a;
public:
        A(int=0);
        void Inc() { m_a++;}
};

void ThreadFuncParamsByRef(A& a) {  a.Inc(); }

int main() {
        A a(1);
        std::thread th(ThreadFuncParamsByRef, a); //конструктор создает копию, а адрес
                                                  этой копии по ссылке передается в потоковую функцию
        …
        // модификация a???
}
```

Передача потоковой функции параметров по ссылке

```
class A{
        int m_a;
public:
        A(int=0);
        void Inc() { m_a++;}
};

void ThreadFuncParamsByRef(A& a) {  a.Inc(); }

int  main() {
        A a(1);
        std::thread th(ThreadFuncParamsByRef, std::ref(a));
        // модификация a???
        …
}
```

std::ref() и std::cref()

- шаблоны функций, которые создают объект типа std::reference_wrapper
- в котором (в свою очередь) запоминаются адреса передаваемых параметров, а не их копии

Потоковая функция – шаблон ???

```
template<typename C> void templateThreadFunc(C& c)
{
        for (auto& e : c)       { e = -e; }
}
int main()
{
  std::vector<int> v{-1,5,-7,2,-9,0};
  std::thread th(templateThreadFunc<decltype(v)>, v); //???
   …
}
```

Потоковая функция - шаблон

```
template<typename C> void templateThreadFunc(C& c)
{
        for (auto& e : c)       { e = -e; }
}
int main()
{
  std::vector<int> v{-1,5,-7,2,-9,0};
  std::thread th(templateThreadFunc<decltype(v)>, std::ref(v));
   …
}
```

Варианты действий после запуска потока:

std::thread th(ThreadFunc, <параметры>);

- ***th.join();***
  родительский поток должен ожидать завершения дочернего (блокировка родительского потока)
- ***th.detach();***
  «отключает» дочерний поток от объекта th => дальнейшее взаимодействие с потоком посредством объекта th невозможно (не блокирует родительский поток)
- Если ничего не вызвано, в деструкторе объекта th будет вызвана *std::terminate()*

thread::join()

```
void Draw(char c)
{ for (int i = 0; i < N; i++){std::cout << c;} }

int main()
{//если одно вычислительное ядро?
        std::thread t1(Draw, 'A');
        std::thread t2(Draw, 'B');
        std::thread t3(Draw, 'C');
        t1.join();
        t2.join();
        t3.join();
}
```

Специфика join()

- При вызове обнуляются данные объекта thread => с потоком объект уже не ассоциирован!
- => дважды вызвать нельзя, так как после первого вызова данные (дескриптор и идентификатор потока) обнуляются
- чтобы определить: связан объект thread с потоком или нет -> joinable()

Специфика
bool thread::joinable() const

- true – если объект ассоциирован с потоком
- если поток завершился - true
- после вызова default-конструктора – false
- после вызова join() – false
- после вызова detach() - false

join() и исключения
Проблемы

```
std::thread th(threadFunc, <параметры>);

//код, который нужно выполнить до join()
// и который может сгенерировать исключение

th.join(); //если сгенерировано исключение, не будет выполнено! => в деструкторе  th - terminate()
```

Решение «в лоб»

```
std::thread th(threadFunc, <параметры>);
try{
//код, который нужно выполнить до join()
//и который может сгенерировать исключение
} catch(...){th.join();}

if(th.joinable()) { th.join();}
```

Возможное решение (идиома RAII):

```
class thread_guard{
  std::thread m_t;
public:
  explicit thread_guard(std::thread&& t)
                : m_t(std::move(t) ){}
  ~thread_guard(){if(m_t.joinable()) { m_t.join();} }
  thread_guard(const thread_guard&) = delete;
  thread_guard& operator=(const thread_guard&) = delete;
};
```

Возможное решение. Продолжение

```
{
   std::thread th(threadFunc, <параметры>);
   thread_guard tg( std::move(th) );

//код, который нужно выполнить до join()
// и который может сгенерировать исключение

} //?
```

Фоновые потоки - thread::**detach**()

```
void Draw(size_t n, char c)
{ for (int i = 0; i < n; i++){std::cout << c;} }

int main()
{//если одно вычислительное ядро?
        std::thread t1(Draw, 10, 'A');
        std::thread t2(Draw, 10, 'B');
        std::thread t3(Draw, 10, 'C');
        t1.detach();
        t2.detach();
        t3.detach();
        …
}
```

Проблемы при передаче потоковой функции параметров по ссылке

```
class A{
        int m_a;
public:
        A(int=0);
        void Inc() { m_a++;}
};

void ThreadFuncParamsByRef(A& a) {  a.Inc(); }

void f() {
        …
        A a(1);
        std::thread th(ThreadFuncParamsByRef, std::ref(a));
        th.detach(); //плохо!!! - почему?
        …
}
```

Передача потоковой функции параметров по ссылке

```
class A{
        int m_a;
public:
        A(int=0);
        void Inc() { m_a++;}
};

void ThreadFuncParamsByRef(A& a) {  a.Inc(); }

int main() {
        …
        A a(1);
        std::thread th(ThreadFuncParamsByRef, std::ref(a));
        th.join(); //ждем завершения потока
        …
}
```

Передача параметров в лямбда-функцию по ссылке

```
int n=0;
std::thread th( [&n]() { n++; } );
th.join();
```

Осторожно! Висячие ссылки и указатели!

```
class th{
        char* m_str;
public:
        th(char* s):m_str(s){}
        void operator()(){std::cout<<m_str;}
};
void func() {
        char s[] = {“qwerty”};
        std::thread t{ th(s) };
        t.detach(); //???
}
```

Вызов метода класса в отдельном потоке

```
class A{
        int m_a;
public:
        A(int a= 0){ m_a = a; }
        void Inc() { m_a++; }
};

int main()
{
        A a(1);
        std::thread th(&A::Inc, &a));
        th.join();
        …
}
```

Вызов метода класса в отдельном потоке

```
class A{
        int m_a;
public:
        A(int a= 0){ m_a = a; }
        void Inc(int d) { m_a += d; }
};

int main()
{
        A a(1);
        //std::thread th(&A::Inc, std::ref(a),5);  //работало до VS15RC (internal error)
        std::thread th(&A::Inc, &a,5);  // VS15RC
        th.join();
        …
}
```

Проблемы при передаче параметров (о которых нужно знать!)

<table>
<tr><td colspan="2">void f(const std::string&);</td></tr>
<tr><td colspan="2">Разница??? Проблемы???</td></tr>
<tr><td>char str[] = “abc”;
std::thread th(f,str);
th. detach();</td><td>std::string str(“abc”);
std::thread th(f,str);
th. detach();</td></tr>
</table>

Деструктор ~thread()

Важно!

- если объект ассоциирован с потоком (даже если поток уже завершился на момент вызова деструктора), то вызывается std::terminate()

«Привязка» к системному потоку

native_handle_type thread::**native_handle**();

- тип зависит от ОС. В ОС Windows – HANDLE
- может быть использован
  - для получения дополнительной (зависящей от ОС) функциональности (например, для задания приоритета)
  - в ущерб кроссплатформенности

Пример **native_handle**()

```
#include <Windows.h>

int main()
{
	std::thread th(SimpleThreadFunc);
	HANDLE h = th.native_handle();
	SetThreadPriority(h, THREAD_PRIORITY_LOWEST);
	…
}
```

Класс std::thread::id

- хранит уникальный идентификатор потока + ОС-зависимый дескриптор (обертка для системных идентификатора + дескриптора)
- формируется при вызове конструктора
- возвращается методом thread::get_id()

Специфика:

- может быть не ассоциирован с потоком (если default конструктор thread или после отключения потока от объекта)
- может быть использован как ключ для хранения объектов в ассоциативных контейнерах
- при завершении ассоциированного потока может быть использован для другого потока

Идентификатор потока

```
#include <Windows.h>
{
  std::thread th(SimpleThreadFunc);

  DWORD idSystem= ::GetThreadId(th.native_handle());
  std::thread::id idC11 = th.get_id(); //запакованы дескриптор и
                                       идентификатор

  std::cout << idC11; //public доступа нет, но перегружен operator<<
  …
}
```

Использование std::thread::id для хранения данных в std::map

```
std::vector<std::thread> th;
std::map<std::thread::id, size_t> table;
for(size_t i=0; i<5; i++){
        th.emplace_back(threadFunc, <параметры>);
        table[th.back().get_id()] = i;
}
//пользоваться table можно только до вызова join()
for (auto& t : th)
{  t.join(); }
```

Количество ядер <-> количество потоков

```
static unsigned
        std::thread::hardware_concurrency() ;
```

Замечание: если значение не определяется, то 0 => нужно учитывать такой вариант

Параллельная реализация std::accumulate()

```
template< class InputIt, class T >
T std::accumulate( InputIt first, InputIt last, T
init );
```

```
std::vector<int> v;
//формирование значений
```

Параллельное суммирование - ???

Параллельная реализация std::accumulate()

```
//Потоковая функция
template<typename It, typename T> void
sum_block (It first, It last, T& result)
{
        result = std::accumulate(first, last, result);
}
```

Параллельная реализация std::accumulate(). Продолжение

```
int main(){
  std::vector<int> v{ 1, 2, 3, 4, 5 , …}; //большой!
  std::vector<std::thread> th;
  const size_t nThreads = 2; //на самом деле нужно
                вычислить, исходя из количества ядер
  std::vector<int> res(nThreads+1); //для частичных сумм
  size_t part = v.size() / nThreads ; //целое количество
                элементов для суммирования каждым потоком
  auto first = v.begin();
```

Параллельная реализация std::accumulate(). Продолжение

```
for (size_t i = 0; i < nThreads; i++){
   auto last = first;
   std::advance(last, part);
   th.emplace_back(sum_block<decltype(first),int>,first, last, std::ref(res[i]));
   first = last;
}
//остаток досуммируем в данном потоке
if(first != v.end()){
    res[nThreads]=(std::accumulate(first, v.end(), 0);
}
for (auto& t : th) { t.join(); }
int sum = std::accumulate(res.begin(), res.end(), 0); //суммируем частичные суммы
```

#include <thread>

ПРОСТРАНСТВО ИМЕН THIS_THREAD

М.Полубенцева

Специфика:

набор «потоковых» глобальных функций, которые

- можно использовать «внутри» любого потока:
  - как в коде любого порожденного потока,
  - так и в первичном потоке
- «извне» посредством объекта thread вызвать невозможно

void std::this_thread::**yield**();

- отказ от остатка кванта времени => планировщик может назначить другой поток на выполнение

например:

```
while(!условие)
{std::this_thread::yield();}
```

Функции std::this_thread::

- std::this_thread:: **sleep_for**() - исключает из планирования на указанный интервал (отправляет в спячку)
- std::this_thread:: **sleep_until**() - исключает из планирования до указанного момента времени
- std::this_thread:: **get_id**() - возвращает идентификатор текущего потока

ОБРАБОТКА МЕЖПОТОЧНЫХ ИСКЛЮЧЕНИЙ

Некорректная обработка исключений между потоками ???

```
try
{
    std::thread th(threadFunction);  //threadFunction может
                                     сгенерировать  исключение


    th.join();
}
catch (const std::exception &ex)
{
    std::cout << ex.what() << std::endl;
}
```

std::exception_ptr, std::current_exception(), std::rethrow_exception()

#include <exception>

- **std::current_exception**()
  - обычно вызывается в обработчике исключения (catch)
  - возвращает объект std::exception_ptr, который содержит копию объекта-исключения или ссылку на объект-исключение
  - если вызывается вне catch, то возвращается «пустой» объект std::exception_ptr
- **std::rethrow_exception**() – генерирует заново исключение, сохраненное в объекте std::exception_ptr

Корректная (но не очень красивая) обработка исключений между потоками

```
std::vector<std::exception_ptr>  g_exceptions;

void throw_function(){
    throw std::exception("Error"); //здесь возможна гонка => нужно
            «защищать» этот код, чтобы он выполнялся только одним потоком!
}

void threadFunction(){
    try
    {
        throw_function();
    }
    catch (...)    { g_exceptions.push_back(std::current_exception()); }
}
```

Продолжение. Корректная обработка исключений

```
int main(){
    std::thread th(threadFunction);
    th.join();

     for(auto& e: g_exceptions)  {
         try
         {
             if(e != nullptr)
                 std::rethrow_exception(e);
         }
         catch (const std::exception &e){std::cout << e.what()<<std::endl;}
     }
}
```

СИНХРОНИЗАЦИЯ ЗАДАЧ

Синхронизация осуществляется посредством:

- задания приоритетов потоков – не поддерживается C++11
- синхронизирующих объектов
- условных переменных
- блокировок

Общие правила безопасности многопоточной программы:

- без синхронизации доступ к одним и тем же данным
  - чтение данных можно разрешить **всем** потокам
  - для записи – опасно (состязание за данные) => синхронизация

Какие данные требуют синхронизации доступа?

- локальные?
- статические?
- динамические?

Дж. Рихтер: «СИНХРОНИЗАЦИЯ ПОТОКОВ. ХУДШЕЕ, ЧТО МОЖНО СДЕЛАТЬ»

```
BOOL gFlag = FALSE;          //глобальный флаг, синхронизирующий потоки

void threadFunc()//Потоковая функция
{
        ...          //выполняем какие-то вычисления
        gFlag = TRUE;      //с этого момента может продолжаться порождающий поток
        ...
        return 0;
}
//Порождающий поток
int main()
{
        ...
        std::thread(threadFunc);
        ...
        while(gFlag == FALSE); //ждем установки флага
        //продолжаем выполнение
}
```

Чем плох такой подход, если в системе одно вычислительное ядро?

- вызывающий поток при таком решении проблемы не исключается из планирования => бесполезная работа;
- если у порождающего потока приоритет выше, чем у порожденного???
- если потоки выполняются в разных процессах, тогда эта переменная должна быть разделяемой;
- так как два потока пользуются одной и той же переменной - запретить компилятору оптимизировать работу с такой переменной (???)

Вывод:

- для системы **с одним вычислительным** ядром потоки следует синхронизировать, исключая их из диспетчирования («**в спячку**»)!
- для системы с несколькими вычислительными ядрами это может быть не эффективно! => lock-free программирование

#include <**mutex**>

STD::MUTEX

Главные проблемы конкурентного программирования:

- гонка за данными (**data race**)
- «голодание» (**resource starvation**) - поток блокируется, а условия освобождения не выполняются
- взаимоблокировка (**deadlock**) – более изощренная форма голодания, когда группа потоков не могут продолжить выполнение, так как они блокируют друг друга
- **livelock** – группа потоков не блокируется, при этом выполняют операции, которые не могут завершиться из-за ожидания захваченного другим потоком ресурса

Важно!

- мьютексы решают (не всегда эффективно) гонку за данными (на высоком уровне), предоставляя возможность блокировки других потоков на время чтения/записи текущим потоком
- но **не** решают проблемы голодания и взаимоблокировок

Классический пример взаимоблокировок

История обедающих философов – иллюстрация того, как несколько синхронизированных потоков соревнуются за лимитированные ресурсы:

- пять философов садятся за круглый стол
- перед каждым – тарелка риса
- между каждой парой философов – палочка для риса
- чтобы съесть порцию, у каждого философа должны быть две палочки (слева и справа)
- => deadlock

data race

- Под состоянием гонки понимается любая ситуация, исход которой зависит от относительного порядка выполнения операций двух и более потоков (конкуренция за право выполнить операцию первым)
- Попытка модификации разделяемых данных может привести к неопределенному поведению

Пример data race

std::vector<int> v ; //глобальный
//формирование значений

//поток 1	//поток 2
std::cout<< v.top();	std::cout<< v.top();
v.pop();	v.pop();

мьютекс – взаимоисключающая блокировка

- позволяет выполнять защищенный мьютексом код только одному потоку
- => все синхронизируемые мьютексом потоки должны пользоваться одним и тем же объектом-мьютексом!!!
- => нужно гарантировать существование мьютекса, пока есть хотя бы один использующий его поток

Варианты мьютексов:

- **std::mutex -** не рекурсивный
- **std::recursive_mutex -** рекурсивный
- **std::timed_mutex -** не рекурсивный, допускающий таймауты для блокирующих функций try_lock_for() и try_lock_until()
- **std:: recursive_timed_mutex** - рекурсивный мьютекс, допускающий таймауты для блокирующих функций.
- **std:: shared_timed_mutex** - разделяемый C++14

Предупреждение

- Опасно передавать указатели или ссылки на «защищенные» данные за пределы блокировки!
- Так как, если адрес будет запомнен, то возникает возможность обращения к разделяемым данным вне защищенной секции

std::mutex::lock()

- если мьютекс свободен, то поток «вступает во владение» мьютексом и продолжает выполнение
- если мьютекс занят (другой поток успел вызвать для него lock()), то поток блокируется (исключается из диспетчирования)

Замечание: если владелец такого мьютекса еще раз вызовет lock(), поведение не определено!

std::mutex::unlock()

- переводит мьютекс в свободное состояние
- вызов обязателен! Иначе мьютекс останется для всех ожидающих потоков в занятом состоянии!
- Важно! Мьютекс «передается во владение» захватившему его потоку => только захвативший поток может освободить занятый мьютекс

std::mutex::try_lock()

- неблокирующая попытка захвата мьютекса:
  - true – если мьютекс свободен, поток захватывает мьютекс и **продолжает** выполнение
  - false – если мьютекс занят, поток **продолжает** выполнение

Получение дескриптора системного мьютекса

native_handle_type mutex::**native_handle**();

Важно! Это единственная возможность использовать мьютекс за пределами процесса

Без мьютекса

```
void Draw(char c){ for (size_t i = 0; i < 20; ++i){ cout << c ; } }

int main(){
thread t1 (Draw, ‘A’);
thread t2(Draw, ‘B’);
thread t3 (Draw, ‘C’);
t1.join();
t2.join();
t3.join();
}
//??? Если одно вычислительное ядро? Если несколько?
```

Пример использования мьютекса

```
void DrawMutex(char c, std::mutex& m)
{
        m.lock();
        for (int i = 0; i < 20; i++){std::cout << c;}
        m.unlock();
}
int main()
{
        std::mutex m;
        std::thread t1(DrawMutex, 'A', std::ref(m));
        std::thread t2(DrawMutex, 'B', std::ref(m));
        std::thread t3(DrawMutex, 'C', std::ref(m));
        t1.join();          t2.join();          t3.join();
} //??? Если одно вычислительное ядро? Если несколько?
```

Пример try_lock()

```
void f(std::mutex& m)
{
        while(m.try_lock() == false)
        {
        //делаем что-то другое (безопасное)
        }
        //работаем под защитой
}
```

Взаимная блокировка

```
class A{
        int* p;
        size_t size, cap;
public:
        …
        void swap(A& other){???} //во время обмена
                                 другой поток/потоки могут читать/писать
                                 оба меняющихся данными объекта!
};
```

Взаимная блокировка

```
class A{
        int* p;
        size_t size, cap;
        std::mutex m;
public:
        …
        void swap(A& other)
        {
                //нужно заблокировать оба объекта!
                //обмен
                //освобождение блокировки
        }
};
```

std::lock() для борьбы с deadlock-ами:

template< class Lockable1, class Lockable2, class... LockableN >

void **lock**(Lockable1& lock1, Lockable2& lock2, LockableN&... lockn);

// LockableN - должны иметь методы **lock() , try_lock()** и **unlock()**

последовательно пытается заблокировать все перечисленные объекты. Если при этом генерируется исключение, то для всех на этот момент заблокированных объектов вызывается unlock()

```
void A::swap(A& other){
  if(this !=&other)
  {
        std::lock(this->m, other.m);
        //обмен
        this->m.unlock();
        other.m.unlock();
  }
}
```

std::try_lock()

template< class Lockable1, class Lockable2,
class... LockableN> **int**

try_lock(Lockable1& lock1, Lockable2& lock2,
LockableN&... lockn);

//возвращаемое значение

- -1 – OK
- индекс мьютекса, который не удалось заблокировать

Классы - «обертки» для мьютекса

Специфика: конструкторы классов «оберток» могут принимать параметр, определяющий политику блокировки:

- **defer_lock_t**: не захватывать мьютекс (отложить захват), а только «обернуть», чтобы **в случае дальнейшего захвата мьютекса** в деструкторе был вызван unlock()
- **try_to_lock_t**: попытаться захватить мьютекс без блокировки
- **adopt_lock_t**: предполагается, что вызывающий поток уже захватил указанный мьютекс => требуется только в деструкторе вызвать unlock()

Типы и соответствующие объекты, предоставляемые стандартной библиотекой:

struct **defer_lock_t** { };
struct **try_to_lock_t** { };
struct **adopt_lock_t** { };

constexpr std::defer_lock_t defer_lock =
std::defer_lock_t();
constexpr std::try_to_lock_t try_to_lock =
std::try_to_lock_t();
constexpr std::adopt_lock_t adopt_lock =
std::adopt_lock_t();

std::lock_guard – самая простая обертка для мьютекса

template< class Mutex > class **lock_guard**;

идиома **RAII** – «захват ресурса есть» инициализация

- в конструкторе std::lock_guard(mutex_type& m); – **lock**()
- в деструкторе – **unlock**()

Важно!

//Глобальный мьютекс
std::mutex m;

```
void threadFunc()
{
    m.lock();
    //…
    //здесь может быть
сгенерировано исключение!
   m.unlock(); //если
сгенерировано исключение,
мьютекс?
}
```

```
void threadFunc()
{
    std::lock_guard<std::mutex>
                l(m);
    //…
    //здесь может быть
сгенерировано исключение!
// мьютекс?
}
```

Другие возможности lock_guard

конструктор

lock_guard(mutex_type& m, std::**adopt_lock_t** t);

Специфика:
на момент создания объекта lock_guard вызывающий поток уже **должен** владеть мьютексом, так как в деструкторе - ???

Пример std::adopt_lock

```
void f(std::mutex& m)
{
        while(m.try_lock() == false)
        {
        //делаем что-то другое (безопасное)
        }
        //сюда попадаем с захваченным мьютексом
        std::lock_guard(m, std::adopt_lock);
        //работаем под защитой
} // ???
```

Модифицируем A::swap() с помощью std::lock_guard

```
void A::swap(A& other){
  if(this==&other) return;
  std::lock(this->m, other.m);

  std::lock_guard<std::mutex>
                lock_this(this->m, std::adopt_lock );
  std::lock_guard<std::mutex>
                lock_other(other.m, std::adopt_lock );
                //обмен
} ???
```

std::unique_lock

- гарантирует: в каждый момент времени мьютексом может владеть только один объект **std::unique_lock !**

std::unique_lock – обертка для мьютекса с бОльшей функциональностью по сравнению с lock_guard

отличия от std::lock_guard:

- **std::lock_guard** заблокирован на всем протяжении своего существования
  std::unique_lock – добавляет **признак** + возможность узнать свободен/захвачен мьютекс - **owns_lock**()
- **std::lock_guard** - мьютекс блокируется один раз в конструкторе, освобождается тоже только один раз – в деструкторе
  std::unique_lock – можно блокировать и освобождать посредством lock() и unlock(), а также try_lock(), try_lock_for(), try_lock_until
- **std::lock_guard –** политика захвата мьютекса может быть только std::adopt_lock
  std::unique_lock – может быть adopt_lock, defer_lock или try_to_lock

Функциональность **std::unique_lock:**

- explicit unique_lock(mutex_type& m); - m.lock()
- unique_lock(unique_lock&& other); - можно
- unique_lock(mutex_type& m, std::**adopt_lock_t** t); - аналогично lock_guard
- unique_lock(mutex_type& m, std::**defer_lock_t** t); - отложить захват мьютекса (если до вызова деструктора мьютекс не будет занят, то unlock() не вызывается). Захватить mutex можно позже посредством метода lock()
- unique_lock(mutex_type& m, std::**try_to_lock_t** t); - неблокирующая попытка захвата мьютекса + установка признака

Специфика unique_lock:

- mutex_type* **release**();
  - не выполняются ни lock(), ни unlock()
  - возвращается указатель на ассоциированный мьютекс или nullptr
  - обертка больше не ассоциируется с мьютексом
- explicit operator bool() const; - true, если
  - мьютекс ассоциирован с объектом
  - и мьютекс захвачен
- mutex_type* mutex() const;

Пример:

```
std::mutex m;
std::unique_lock<std::mutex> ul1;
if(ul1) ???     //false

std::unique_lock<std::mutex> ul2(m); //захват
if(ul2) ???     //true

ul2.unlock();
if(ul2) ???     //false
//или
ul2.release();
if(ul2) ???     //false
```

Пример:

```
std::mutex m;
std::unique_lock<std::mutex> ul(m, std::defer_lock);
b = ul.owns_lock(); //???

ul.lock();
b = ul.owns_lock(); //???
```

Модифицируем A::swap() с помощью std::unique_lock

```
void A::swap(A& other){
  std::unique_lock <std::mutex>
                lock_this(this->m, std::defer_lock );
  std:: unique_lock <std::mutex>
                lock_other(other.m, std::defer_lock );
  std::lock(lock_this, lock_other);
                //обмен
} ???
```

Дополнительные возможности unique_lock:

Конструкторы:

- template <class Rep, class Period>
  unique_lock (mutex_type& m, const chrono::**duration**<Rep,Period>& rel_time);
  вызывает m.try_lock_for(rel_time)
- template <class Clock, class Duration>
  unique_lock (mutex_type& m, const chrono::**time_point**<Clock,Duration>& abs_time);
  - m.try_lock_until(abs_time)

std::timed_mutex

- lock()
- unlock()
- try_lock()

Добавляет по сравнению с std::mutex методы:

- **try_lock_for**() – если мьютекс занят, блокируется до истечения интервала или освобождения мьютекса
- **try_lock_until**()

Пример

```
void threadFunc(std::timed_mutex& m)
{
   bool b = m.try_lock_for(std::chrono::seconds (10));
   if(b){
         //…
         m.unlock();
         }
}
```

Обертки для std::timed_mutex

- unique_lock
- lock_guard - ???

Использование обертки для timed_mutex

```
std::timed_mutex m;

void f()  {
   std::unique_lock<std::timed_mutex>
        lk(m, std::chrono::milliseconds(3)); //ожидает до 3 мс
   if(lk) {...} //если блокировка получена, обрабатываем данные
}   // ???
```

Можно (имеет смысл) использовать lock_guard?

std::recursive_mutex

- позволяет потоку-владельцу мьютекса многократно вызывать lock()
- следствие -> столько же раз нужно вызвать unlock()

Рекомендация: не использовать рекурсивные мьютексы. Если таковые понадобились, то стоит подумать об ошибках проектирования

???

```
std::mutex m; //обычный мьютекс

void f1(){
        m.lock();
        …
        m.unlock();
}
void f2(){
        m.lock();
        f1();
        m.unlock();
}
```

Пример std::recursive_mutex

```
std::recursive_mutex m;

void f1(){
        m.lock();
        …
        m.unlock();
}
void f2(){
        m.lock();
        f1();
        m.unlock();
}
```

std::recursive_timed_mutex

Дополнительная функциональность:

- try_lock()
- try_lock_for()
- try_lock_until()

C++14 shared_timed_mutex

#include <shared_mutex> - не поддерживается VS15

Часто возникает задача:

- позволить нескольким потокам осуществлять **чтение** (разделение мьютекса)
- и только одному – **запись** (владение мьютексом)

=> **rw - мьютексы**

Специфика:

Для эксклюзивного использования:

lock(), unlock(), try_lock(), try_lock_for(), try_lock_until()

Для общего использования:

lock_shared(), unlock _shared(), try_lock_shared(), try_lock_shared_for(), try_lock_shared_until()

Обертка для shared_mutex – **shared_lock**

- конструктор – в зависимости от параметра defer_lock, try_to_lock, adopt_lock
- деструктор – если мьютекс захвачен, unlock()

Пример использования r/w мьютекса

```
class Shared{
   mutable std::shared_timed_mutex m;
   Data sharedData;
public:
   Data read()const{
      std::shared_lock< std::shared_timed_mutex > sl(m);
      return sharedData;
   }
  void write(Data newData){ //по значению безопаснее
     std::lock_guard< std::shared_timed_mutex> sl(m);
     sharedData = newData;
   }
            …
};
```

Продолжение примера: ???

Реализация?

Shared& Shared::**operator=** (const Shared&);

Реализация operator=

```
Shared& Shared::operator= (const Shared& other)
{
if(this != &other){
//this - эксклюзивные права на запись
  std::unique_lock< std::shared_timed_mutex >
                                  this_ul(this->m, std::defer_lock);
//остальным (other) – разделяемые права на чтение
  std::shared_lock< std::shared_timed_mutex >
                                  other_sl(other.m, std::defer_lock);
  std::lock(this_ul, other_sl);

//выполняем присваивание:
  this->sharedData = other.sharedData;
}
  return *this;
} //???
```

Рекомендации – как избежать блокировок и не потерять эффективность :

- разумно выбирать гранулярность защищаемого кода
- по возможности использовать один мьютекс (a.lock(); b.lock() - гонки)
- если требуется захват нескольких мьютексов, то порядок захвата везде должен быть одинаков, иначе – гонки
- избегать вызова другого пользовательского кода в защищенной секции
- в сложном многопоточном приложении использовать **иерархические** мьютексы (назначать мьютексам разные уровни и позволять захватывать только в порядке понижения уровня).

Реализация иерархического мьютекса

- В C++11-14 отсутствует иерархический мьютекс
- Для его реализации нужно учесть:
  - для каждого потока должен быть индивидуальный «счетчик» уровней мьютексов в данном потоке => **TLS**
  - при этом нужно гарантировать, что в потоке нет двух мьютексов с одинаковым приоритетом
  - уровни логично задавать не случайно, а в соответствии с важностью защищаемого участка кода