Видео Герб Саттер

- https://www.youtube.com/watch?v=L7zSU9HI-6I&feature=youtu.be&t=1h6m40s

Локальная память потока

C++11 СПЕЦИФИКАТОР КЛАССА ХРАНЕНИЯ THREAD_LOCAL

М.Полубенцева

Спецификаторы класса хранения C++ ???

- До стандарта C++11 ???
- **C++11** - спецификатор класса хранения **thread_local** (ключевое слово => подключать заголовочные файлы не требуется)

Время жизни

- все переменные, определенные со спецификатором thread_local, обладают потоковым временем жизни – **thread storage duration**
- thread storage duration имеет много общего со статическим временем жизни (static storage duration). Отличие:
  – статическое время жизни – до завершения программы
  – потоковое время жизни – до завершения потока

Инициализация “блочных” thread_local переменных
(похожа на инициализацию статических переменных)

```
void ThreadFunc(){
        for(int i=0; i<10; i++)     {
        thread_local int z=33;
        z++;
        …
        }
}
```

- инициализируется один раз
- при первом выполнении в каждом потоке!
- память освобождается при завершении потока

Замечание:

```
void ThreadFunc()
{
        …
        [static] thread_local int z=33; //избыточно
                                //память отводится в TLS!
        z++;
        …
}
```

«Глобальные» thread_local переменные

1.cpp	2.cpp

extern thread_local int x;
int main(){
// **x = ?**
x++;
// **x = ?**
std::thread t1(ThreadFunc);
std::thread t2(ThreadFunc);
t1.join(); t2.join();
// **x = ?**
…
}
	thread_local int **x;**
	void ThreadFunc()
	{
	// **x = ?**
	x++;
	// **x = ?**
	…
	}

Разница thread_local и static – способ компоновки:

1.cpp	2.cpp

thread_local int x;
static thread_local int y;
	extern thread_local int x;
	extern thread_local int y;
	
	void f2(){
	x++; //OK
	y++; //???
	}

Статические thread_local переменные класса

```
class A {
        thread_local  static size_t count;
public:
        …
};
```

Разница:

A.h **class A{** **static size_t count;** **public:** **…** **};**	**A.h** **class A{** **static thread_local size_t count;** **public:** **…** **};**
A.cpp #include “A.h” **size_t A::count;** //на этапе компиляции в единственном экземпляре	A.cpp #include “A.h” **thread_local size_t A::count;** //на этапе выполнения для каждого потока

Нельзя объявлять со спецификатором thread_local:

- параметры функций
- переменные со спецификатором register
- нестатические переменные класса

```
void f(thread_local int x); //ошибка

class A {
        thread_local  size_t count; //ошибка
};
int f1(){
    thread_local register int y; //ошибка
}
```

Специфика thread_local объекта

- копия thread_local переменной, определенной вне функции, должная быть проницализирована (сконструирована) к моменту первого использования (на момент запуска потока или непосредственно перед первым использованием – стандарт не оговаривает)
- => может вычисляться во время выполнения
- => не может быть constexpr
- неявная инициализация thread_local переменных базового типа – «0»
- если при конструировании thread_local переменной пользовательского типа генерируется исключение, то вызывается terminate()
- передавать адрес другому потоку можно, но НЕ безопасно!

Пример использования thread_local

- при реализации иерархического мьютекса для решения проблемы dead-lock-ов

Реализация иерархического мьютекса

- В C++11-14-17 отсутствует иерархический мьютекс
- Для его реализации нужно учесть:
  - у каждого мьютекса должен быть свой уникальный уровень
  - 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

Решение:

- мьютекс можно захватить только при условии, что его «личный» уровень меньше текущего уровня в потоке!

Пример реализации иерархического мьютекса:

```
                                                    // hierarch_mutex.h
class hierarch_mutex{
  mutable std::mutex m;
  int prev_level;
  const int this_level;
  static thread_local int thread_cur_level;
public:
  hierarch_mutex(int l) : this_level(l), prev_level(0){}
  void lock();
  void unlock();
};
                                                    // hierarch_mutex.cpp
thread_local int hierarch_mutex ::thread_cur_level = INT_MAX;
```

Продолжение примера

```
void hierarch_mutex ::lock(){
  if(thread_cur_level <=this_level)
      {throw “error level”;}
  m.lock();
  prev_level = thread_cur_level ;
  thread_cur_level = this_level;
 }
```

Продолжение примера ???

```
void hierarch_mutex ::unlock(){
  if(thread_cur_level != this_level) {throw... }
   thread_cur_level = prev_level;
   m.unlock();
}
```

Продолжение примера

```
bool hierarch_mutex ::try_lock(){
  if(thread_cur_level <= this_level)
      {throw “error level”;} //или return false;
  if(!m.try_lock()){return false;}
  prev_level = thread_cur_level ;
  thread_cur_level = this_level;
  return true;
 }
```

Джефри Рихтер:
«Не нужно плодить потоки, потому что переключение контекстов - вещь дорогая»

THREAD POOL

Проблемы нерационального использования потоков

Если для решения часто возникающих **небольших** заданий для каждого задания запускается отдельный поток:

- поток создается непосредственно при поступлении задания и разрушается по завершении его обработки => порождение и уничтожение потока приводят к **значительным издержкам**
- требуется «**вручную**» задавать/определять количество одновременно работающих потоков
- для некоторых задач требуется организовать досрочное завершение потока (в классе std::thread не реализовано)

Шаблон проектирования «пул потоков»

- позволяет создавать **разумное** количество потоков
- и многократно их использовать, пока существует пул
- при уничтожении самого пула потоки также удаляются.

В результате экономятся ресурсы, которые до этого шли на создание, переключение и уничтожение потоков.

Идея пула потоков:

- создаем N (как выбираем N?) потоков и помещаем их в хранилище (пул).
- по мере возникновения новой задачи «достаем» из хранилища готовый поток и отдаем ему задачу на выполнение (при этом не происходит каждый раз создание/уничтожение => **при частых обращениях выигрыш**)
- как только поток отрабатывает отведенную ему задачу - он высвобождается (но продолжает существовать) => можно использовать его для выполнения следующей задачи.

Простейшая реализация пула потоков

Сущности:

- рабочий поток,
- пул потоков,
- задание
- очередь заданий

В данной упрощенной реализации не предусмотрены:

- получение результатов выполнения задания
- генерация исключений заданиями

```
class thread_pool {
   mutable std::mutex m; //для безопасной многопоточной работы с очередью
   std::queue<std::function<void()>> tasks; //очередь заданий
   std::vector<std::thread> threads; //совокупность рабочих потоков
   bool stop = false; //по-хорошему это должна быть atomic-переменная
   void task_thread(); //потоковая функция (в общем случае с параметрами)
public:
   thread_pool();
   ~thread_pool();
   void add_task(); //в общем случае принимает параметры для задания
    thread_pool(const thread_pool&); //???
    thread_pool& operator=(const thread_pool&); //???
};
```

```
void thread_pool::task_thread(){
  while (!stop){
        std::function<void()> task;
        m.lock();
        if (tasks.empty()) {
              m.unlock();
              std::this_thread::yield(); //отдыхаем
        }else {
              task = tasks.front();
              tasks.pop();
              m.unlock();
              task(); //или на всякий случай if (task) task();
        }

  }
}
```

```
thread_pool::thread_pool() {
   size_t nThreads = <количество потоков в пуле>;
   //Запускаем потоки:
   for (size_t i = 0; i < nThreads; i++){
   threads.emplace_back(&thread_pool::task_thread, this);
//может быть сгенерировано исключение => по-хорошему нужно обработать
   }
}
```

```
thread_pool:: ~thread_pool(){
        ???
}
```

Реализация деструктора

```
thread_pool:: ~thread_pool(){

        stop = true;
        for( std::thread& t:threads)
        {if (t.joinable()) t.join();}

}
```

Продолжение

```
void thread_pool:: add_task(параметры)
{
        m.lock();
        tasks.push(<задание_с_полученными_параметрами>);
        m.unlock();
}
```

#include <conditional_variable>

УСЛОВНЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ

М.Полубенцева

Если один поток должен дождаться выполнения условия другим потоком. **Совсем плохой вариант**:

bool ReadyFlag = false;
std::mutex m;

```
void thread1(){
 m.lock();
//подготовка данных
ReadyFlag=true;
m.unlock();
//…
}
```

```
void thread2(){
   m.lock();
   if(ReadyFlag){
  //обработка данных
   }
m.unlock();
}
```

Если один поток должен дождаться выполнения условия другим потоком:

bool ReadyFlag = false;
std::mutex m;

```
void thread1(){
 m.lock();
//подготовка данных
 ReadyFlag = true;
  m.unlock();
//…
}
```

```
void thread2(){
 m.lock();
 while(!ReadyFlag){
    m.unlock();
    std::this_thread::sleep_for(100ms);
    m.lock();
  }
//обработка данных
m.unlock();
}
```

Использование оберток для мьютекса?

???

Если один поток должен дождаться выполнения условия другим потоком:

bool ReadyFlag = false;
std::mutex m;

```
void thread1(){
  {//защищаемая секция
  std::lock_guard<std::mutex > lg(m);
 //подготовка данных
   ReadyFlag = true;
   }
//…
}
```

```
void thread2(){
 std::unique_lock <std::mutex > l(m);
 while(!ReadyFlag){
    l.unlock();
    std::this_thread::sleep_for(100ms);
    l.lock();
  }
//обработка данных
}
```

Проблемы:

- флаг проверяется независимо от того, произошло событие или нет
- трудно подобрать время ожидания (в среднем поток будет ждать duration/2):
  - слишком короткий период между проверками -> не производительно
  - слишком длинный -> ожидание даже в том случае, когда условие уже давно выполнено
- ресурсы на unlock()/lock()

=> это неэффективный вариант

=> использование специальных средств для решения таких задач – **conditional variables**!

Цель использования условных переменных:

- когда нужно не просто избежать гонки (mutex), а синхронизировать параллельное выполнение задач
- требуется НЕоднократная передача результата от одного потока другому (future - однократная синхронизация), а многократное получение результатов от разных потоков
- => условные переменные, которые можно использовать для многократной синхронизации при обмене данными с несколькими потоками

Реализации условных переменных

std::condition_variable обеспечивает синхронизацию только посредством мьютекса

std::condition_variable_any обеспечивает синхронизацию посредством любого «мьютексоподобного» объекта => может потребовать дополнительных расходов по памяти, производительности, ресурсов ОС

std::condition_variable
std::condition_variable_any

это примитивы синхронизации, предназначенные для блокировки одного потока, пока

- он не будет оповещен о наступлении некоего события из другого потока
- или не истечет заданный таймаут
- или не произойдет ложное пробуждение (spurious wakeup)

Отправка/получение оповещения

Поток, формирующий условие:

- **notify_one**() – сообщить одному потоку
- **notify_all**() – сообщить всем потокам

Поток, ожидающий выполнения условия:

- **wait**() – безусловное ожидание выполнения условия
- **wait**(условие)
- **wait_for**(), **wait_until**()

Важно!

- в расширение возможностей мьютекса условная переменная позволяет **одному** из ожидающих или **всем** ожидающим потокам продолжить выполнение
- для реализации ожидания на условной переменной все равно необходим мьютекс
- «ложное срабатывание» == возврат управления потоку не всегда означает выполнение условия => необходимо дополнительно проверить выполнение условия

Ложное (spurious) пробуждение

- когда wait завершается без участия notify_one() или notify_all()

То есть возврат из ожидания может сработать даже если условная переменная не осуществила уведомления => дополнительная проверка!

A.Williams: “Ложные срабатывания невозможно предсказать: с точки зрения пользователя они являются совершенно случайными. Однако они часто происходят, когда библиотека потоков не может гарантировать, что ожидающий поток не пропустит уведомления. Поскольку пропущенное уведомление делает условную переменную бесполезной, библиотека потоков активизирует поток, чтобы не рисковать”

void **wait**(std::unique_lock<std::mutex>& lock);

- освобождает ассоциированный мьютекс (это позволяет другим потокам захватывать мьютекс)
- добавляет этот поток в список ожидающих потоков во внутреннюю структуру данных условной переменной
- и блокирует вызвавший wait() поток
- при вызове для условной переменной notify_…() анализируется список и пробуждается один из или все ожидающие потоки,
- управление возвращается функции wait(),
- в которой снова захватывается мьютекс
- и выполнение продолжается под защитой

template< class Predicate >
void **wait**(std::unique_lock<std::mutex>& lock,
Predicate pred);

- используется для защиты от ложных пробуждений, так как
- проверяет дополнительное условие, и если условие==false, то снова освобождает мьютекс и переводит поток в состояние ожидания
- эквивалентно:

while (!pred()) { wait(lock); }

- **важно!** сначала проверка условия => если условие сразу выполняется, то поток
  - **в очередь ожидания условной переменной не заносится**
  - **поток не блокируется**
  - **мьютекс не освобождается**

Важно!

- на момент вызова wait() мьютекс должен быть захвачен! Иначе – неопределенное поведение
- во всех **ожидающих** потоках должен использоваться один и тот же мьютекс
- в потоках, генерирующих уведомление, в зависимости от задачи
  - мьютекс может вообще не использоваться
  - могут использоваться разные мьютексы
  - в большинстве случаев используется один и тот же мьютекс
- начиная с C++14 wait() не генерирует исключений

wait_for(), wait_until()

возврат управления и блокировка мьютекса происходит:

- если вызвана notify_...()
- сработало ложное пробуждение
- истек timeout - wait_for().
- или наступил заданный момент времени - wait_until()

Причину возврата можно узнать посредством возвращаемого значения - enum class **cv_status**; (значения: timeout, no_timeout)

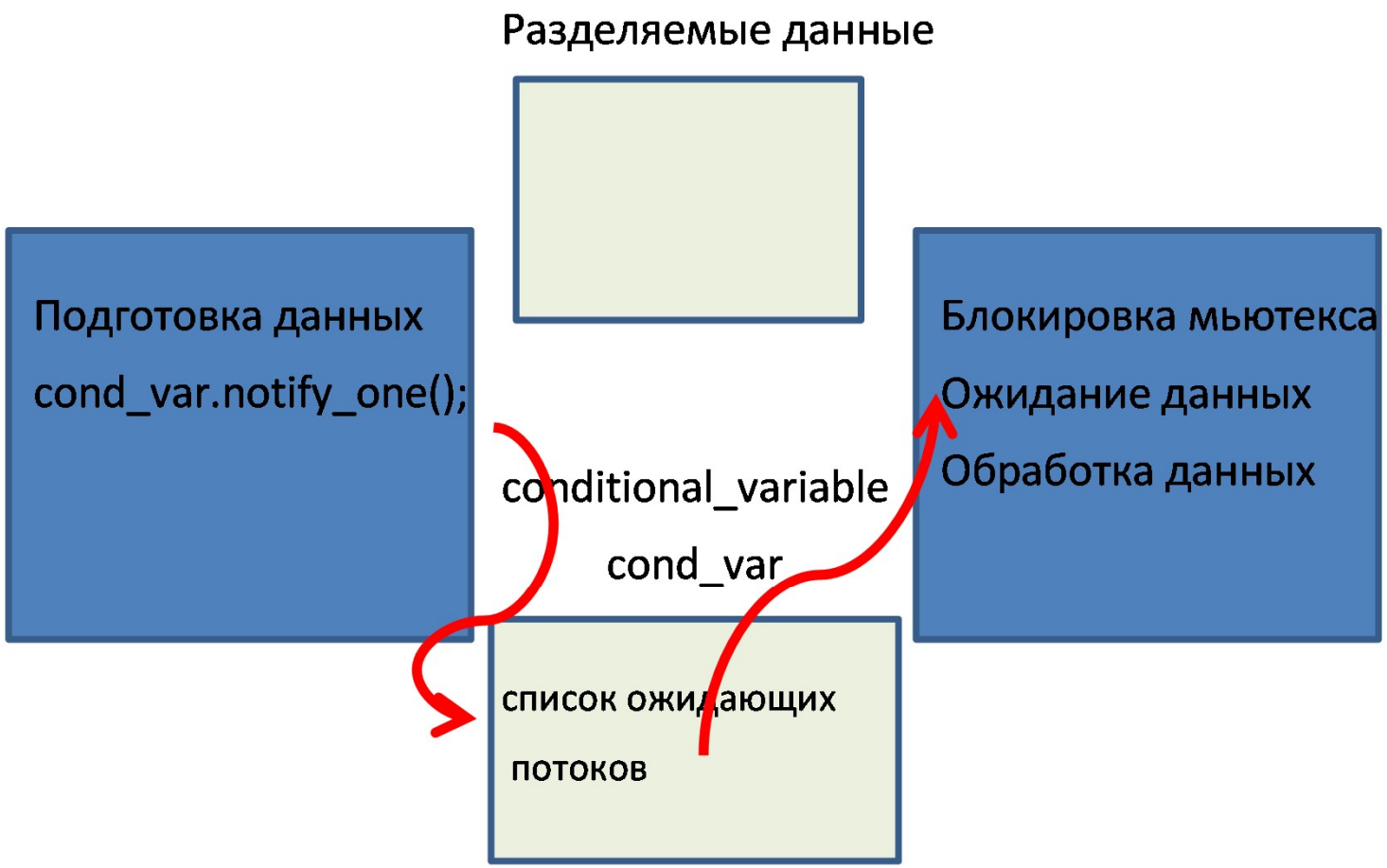
notify_one(), notify_all()

при вызове для условной переменной notify_…() анализируется список «зарегистрированных потоков» и пробуждается:

- один из ожидающих потоков
- или все ожидающие потоки

=> управление возвращается из соответствующей функции wait() + мьютекс блокируется

Иллюстрация



Данные «поставляет» только один поток и обрабатывает **только один** поток :

int shared = 0;
std::condition_variable cv;

```
void thread_Write() {
//подготовка данных
shared = 33;
//уведомление о готовности
cv.notify_one();

}
```

```
void thread_Read (){
std::mutex   local_m;

std::unique_lock <std::mutex > l(local_m);

 cv.wait(l);

//обработка данных
}
```

Проблемы:

- если notify будет вызвана раньше, чем wait?

???

Почему нельзя использовать lock_guard?

Данные «поставляет» только один поток и обрабатывает только один поток. Защита от ложных пробуждений + защита от «зависания» + экономия на отсутствии блокировки в случае, когда условие пробуждение уже выполнено

int shared = 0;
std::condition_variable cv;

```
void thread_Write() {
//подготовка данных
shared = 33;
//уведомление о готовности
cv.notify_one();

}
```

```
void thread_Read (){
std::mutex local_m;

std::unique_lock <std::mutex > l(local_m);

cv.wait(l, []{ return shared == 33; });

//обработка данных под защитой
}
```

Данные «поставляют» несколько потоков: ???

std::mutex m;
std::conditional_varible cv;
int shared = 0;

```
void thread_Write1() {
//подготовка данных
shared = 33; //гонка + неатомарность!
cv.notify_one();
}
void thread_Write2() {
//подготовка данных
shared = 44; //гонка + неатомарность!
cv.notify_one();
}
```

```
void thread_Read(){
 std::unique_lock <std::mutex >
                    l(m);
 cv.wait(l,
          [] { return shared !=0; });
  ...
}
```

Использование lock_guard:

std::mutex m;
std::conditional_varible cv;
int shared = 0;

```
void thread_Write() {
std::lock_guard<std::mutex>   l(m);
//подготовка данных
shared = 33;
//уведомление о готовности
cv.notify_all();

}
```

```
void thread_Read(){
std::unique_lock <std::mutex> l(m);
cv.wait(l,
            [] { return shared !=0; });
 …
}
```

А можно даже так, но тогда нужно обеспечить атомарность операций чтения/записи/проверки:

std::mutex mR,mW;
std::conditional_varible cv;
int shared = 0;

```
void thread_Write() {
std::lock_guard<std::mutex>
                l(mW);
//подготовка данных
shared = 33;
//уведомление о готовности
cv.notify_all();

}
```

```
void thread_Read(){
std::unique_lock <std::mutex>
l(mR);
cv.wait(l,
          [] { return shared != 0; });
 ...
}
```

Итог.
Безопаснее использовать:

- дополнительную проверку
- мьютексы и для wait-потока, и для notify-потока
- мьютекс лучше использовать один и тот же

Глобальная функция std::notify_all_at_thread_exit()

void **notify_all_at_thread_exit**(
    std::condition_variable& cond,
    std::unique_lock<std::mutex> lk); //по значению!!!

Пробуждает все ожидающие потоки (cond.wait()) **при завершении** текущего потока. Эквивалентно:

lk.unlock();

cond.notify_all();

Важно! Действия выполняются гарантированно **после** вызова деструкторов всех потоко-локальных объектов (thread local storage duration)

Пример std::notify_all_at_thread_exit

std::mutex m;
std::conditional_varible cv;
int shared = 0;

```
void thread_Write() {
std::unique_lock<std::mutex>   l(m);

//использование thread_locals


//уведомление о готовности выдать только после завершения потока
std::notify_all_at_thread_exit(cv,
            std::move(l));
…
}//1. деструкторы для thread_locals, 2. unlock l, а там уже пусто!, 3. notify_all() 4. unlock mutex
```

```
void thread_Read(){
std::unique_lock <std::mutex>
                  l(m);
cv.wait(l,  <проверка усл.>);
...
}
```

Пример std::condition_variable

```
std::vector<int> data;
std::condition_variable cv;
std::mutex m;

void thread_writer() {
  std::lock_guard<std::mutex> lock(m);
  data.push_back(<вычисленное_значение>);
  cv.notify_one();
}
void thread_reader() {
  std::unique_lock<std::mutex> lock(m);
  cv.wait( lock, []() { return !data.empty(); } );
  std::cout << data.back() << std::endl;
}
```

std::condition_variable::native_handle()

native_handle_type native_handle();

В ОС Windows условные переменные на системном уровне поддерживаются синхронизирующим примитивом **CONDITION_VARIABLE**

Системные функции для работы с CONDITION_VARIABLE:

InitializeConditionVariable(), SleepConditionVariableSRW (), WakeConditionVariable()

#include <mutex>

STD::CALL_ONCE
STD::ONCE_FLAG

Защита разделяемых данных во время инициализации

Для «дорогостоящих» разделяемых данных (например, получение доступа к БД или установка сетевого соединения) актуальна проблема «отложенной инициализации» (сначала проверка: была ли произведена инициализация, и выполнение инициализирующих действий только при первом вызове).

В однопоточной программе – проблем нет.

В многопоточной программе – защита!

Совсем неэффективное решение:

```
std::shared_ptr<Resource> resource_ptr;
std::mutex resource_mutex;

void f()
{
  resource_mutex.lock();
  if(! resource_ptr)
  {
     resource_ptr.reset(new Resource);
  }
  resource_mutex.unlock();
  …
}
```

Решение – Double-Checked Locking

```
std::shared_ptr<Resource> resource_ptr;
std::mutex resource_mutex;

void f()
{
  if(! resource_ptr) //*1
  {
    std::lock_guard<std::mutex> lk(resource_mutex);
    if(! resource_ptr)
    {
        resource_ptr.reset(new Resource); //*2
    }
  }
…
}
```

Проблемы Double-Checked Locking

может привести к гонкам (data race), так как:

- чтение без мьютекса ***1** не синхронизировано
- с защищенной мьютексом записью в другом потоке ***2**

=> в C++11 включены

- std::call_once()
- std::once_flag

std::call_once()

- std::call_once создана для того, чтобы защищать общие данные во время инициализации
- это техника, позволяющая вызвать нечто callable один раз, независимо от количества потоков, которые пытаются выполнить этот участок кода

Специфика – variadic template:

```
template< class Callable, class... Args >
void call_once( std::once_flag& flag,
                Callable&& f, Args&&... args );
```

std::once_flag

- если один и тот же объект std::once_flag передается при разных вызовах std::call_once() – функции, гарантируется, что тело указанной функции будет выполнено **один раз**!

Эффективность

Утверждается, что издержки использования std::call_once() ниже, чем явное использование мьютекса

Модификация примера с использованием std::call_once()

```
std::shared_ptr<Resource>   resource_ptr;
std::once_flag    resource_flag;

void init_resource()
{    resource_ptr.reset(new Resource);    }

void f()
{
   std::call_once(resource_flag, init_resource);
   …
}
```

???

```
std::once_flag flag;

void do_once(char c){
   std::call_once(flag, [c](){ std::cout << c << std::endl; });
}

int main(){
   std::thread t1(do_once, ‘A’);
   std::thread t2(do_once, ‘B’);
   std::thread t3(do_once , ‘C’);

   t1.join();    t2.join();    t3.join();
}
```

Пример std::call_once() для методов класса

```
class A {
  std::once_flag fl;
  void open_connection();
public:
  void send(<парам>){
    std::call_once(fl, &A:: open_connection, this);
    //отправка данных
   }
 <возвр_знач> receive(){
    std::call_once(fl, &A:: open_connection, this);
    //прием данных
   }
...
};
```

singlton в однопоточном процессе:

```
A* A::get_instance() { //static метод
        static A instance;
        return &instance;
}
```

А в многопоточном процессе???

Пример:

```
class A {
        A();
public:
  static A* get_instance();
…
};
```

Демонстрация:

```
int main(){
        A a;  //???
        A* p1 = A::get_instance();
        A* p2 = A::get_instance();
        A* p3 = A::get_instance();
        …
}
```

ПРОГРАММИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ЗАДАЧ

М.Полубенцева

Скотт Мейерс:

«Предпочитайте программирование на основе задач программированию на основе потоков»

Проблемы подхода на основе потоков:

- Получение формируемого потоком **результата**?
- Обработка сгенерированного потоком **исключения**?
- **Количество запускаемых в системе потоков** – ограниченный ресурс => при превышении – std::system_error
- «**Превышение подписки**» - количество программных потоков (активных и в состоянии готовности) значительно превышает количество аппаратных потоков => частые переключения контекста => время на переключение + перезагрузка кэшей процессора => неэффективно

Большинство перечисленных проблем

- Решается посредством распараллеливания на основе задач =>
- Переложить проблемы программиста на средства, предоставляемые для этих целей стандартной библиотекой

Когда актуально программирование посредством потоков

(требуется управление «вручную»):

- Доступ к нижележащим средствам ОС (например, задание приоритетов)
- Выигрыш по эффективности в задачах с фиксированным (заранее известным числом потоков => можно соптимизировать)
- Реализация пулов потоков

Высокоуровневые средства запуска и взаимодействия потоков. Асинхронное программирование. Ожидание одноразовых результатов

#include <future>

STD::ASYNC()

STD::FUTURE

STD::SHARED_FUTURE

Проблема 1: результат работы потоковой функции посредством std::thread?

в качестве одного (нескольких) параметра в потоковую функцию можно отправить адрес, по которому функция «положит» сформированный ею результат

Проблемы:

- при ожидании завершения запущенного потока???
- если detach()???

Проблема 2: если дочерний поток сгенерировал исключение

А обработка требуется в родительском потоке?

Проблема 3: ограниченное количество потоков

- Для каждого процесса
- Для системы в целом

=> Требуется управление потоками вручную!

При исчерпании потоков – std::system_error

Проблема 4 – «превышение подписки»

большое количество запущенных потоков вынуждает ОС все время осуществлять переключение потоков =>

ресурсы на переключение:

- Время на сохранение/восстановление контекста
- Перегрузка кэшей

Задача:

Требуется запуск длительной операции и получение результата. При этом результат понадобится позже (а может быть и вообще не понадобится…)

Варианты:

- вызвать синхронно =>
  ‘+’ - результат гарантированно сформирован после вызова
  ‘- ‘ – время, потраченное на вычисления, можно было бы потратить на выполнение какой-нибудь другой полезной работы, не требующей результата

Проблемы получения результата **detached** потока:

- как узнать о том, что результат сформирован?
- как обеспечить существование объекта, адрес которого передан в поток?

Асинхронное программирование

стиль программирования, при котором :

- «тяжеловесные» задачи исполняются в detached дочерних (фоновых) потоках,
- и результат выполнения которых может быть получен родительским потоком, когда он того пожелает (при условии, что результат доступен)

Основа асинхронного программирования

- - это **разделяемое состояние** (зависит от конкретной реализации – обычно класс с подсчетом ссылок) ,
  доступ к которому осуществляется посредством шаблонов std::future<> и std::promise<>
- и **условные переменные**

Разделяемое состояние (данные):

```
template<class _Ty> class _Associated_state{
  _Atomic_counter_t _Refs;
  …
 _Ty _Result;
  _XSTD exception_ptr _Exception;
  mutex _Mtx;
  condition_variable _Cond;
  bool _Retrieved;
  int _Ready;
  bool _Ready_at_thread_exit;
  bool _Has_stored_result;
  bool _Running;
  …
};
```

Связь <future> с разделяемым состоянием

```
template<class _Ty> class future<_Ty&>
: public _State_manager<_Ty *>
{ …};

template<class _Ty> class _State_manager{// class for managing possibly non-existent associated asynchronous state object
…
private:
_Associated_state<_Ty> *_Assoc_state;
bool _Get_only_once;
};

template<class _Ty> class _Associated_state{// class for managing associated synchronous state
    …//данные для хранения результата и манипуляций разделяемым состоянием
};
```

шаблон функции std::async()

- позволяет **синхронно** или **асинхронно** запустить задачу (потенциально в отдельном потоке)
- передать ей любое количество параметров (аналогично std::thread)
- и получить возвращаемое потоком значение или обработать сгенерированное задачей исключение с помощью шаблона std::future (когда оно понадобится и гарантированно будет сформировано)

Формы async():

```
template< class Function, class... Args>
std::future<std::result_of_t<std::decay_t<Function>(std::decay_t<Args>...)>>
    async( Function&& f, Args&&... args );

template< class Function, class... Args >
std::future<std::result_of_t<std::decay_t<Function>(std::decay_t<Args>...)>>
    async( std::launch policy, Function&& f,
        Args&&... args );
```

Специфика **std::launch** :

- По умолчанию std::launch::**deferred |** std::launch::**async** реализация решает сама: запускать новый поток или выполнять синхронно
- std::launch::**deferred** – отложить вызов функции до вызова методов wait() или get() объекта future (*lazy evaluation*)
- std::launch::**async** – запуск функции в отдельном потоке

Важно!

Использование политики

std::launch::**deferred |** std::launch::**async**

- и **thread_local** объектов

комбинируются ПЛОХО!

- а также если для синхронизации в caller и callee используется один и тот же **mutex ?**

Для асинхронного взаимодействия и обмена данными thread support library предоставляет:

- шаблон **future**, который предоставляет доступ к универсальному хранилищу (placeholder)
  - для значения любого типа, которое будет сформировано в будущем
  - или исключения любого типа, которое будет сгенерировано в будущем
- **future**s – средство для однократного
  - получения возвращаемого потоком значения
  - или обработки сгенерированного исключения

Будущие результаты (future)

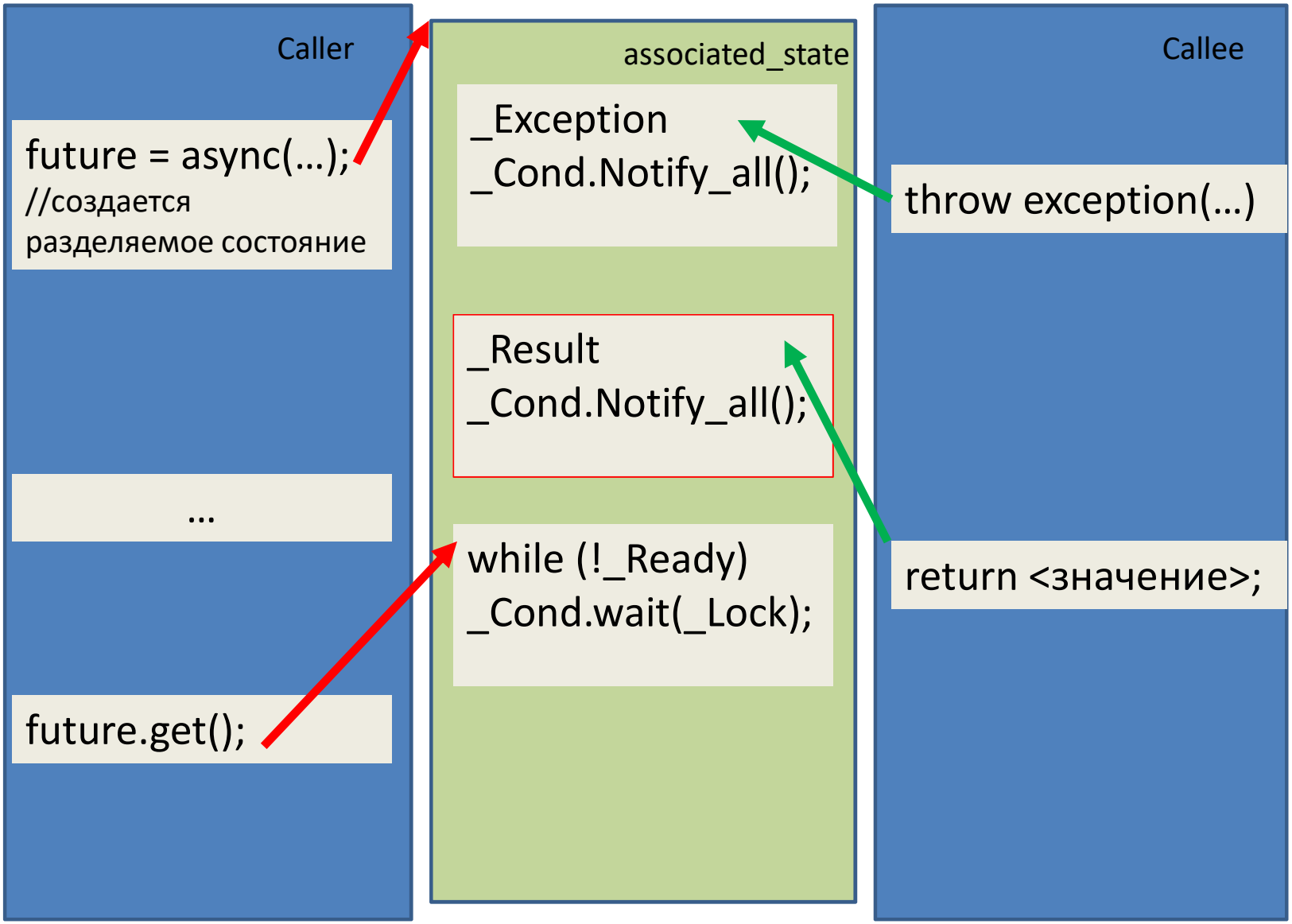
`std::future<> & std::shared_future<>`

Что такое future?

- средство **однократной** коммуникации двух потоков посредством «разделяемого состояния» == канал, соединяющий два потока (саморазрушается после приема данных)

Замечание:

- аналог std::unique_ptr, который уничтожается после «чтения»


Caller
associated_state
Callee
future = async(…);
//создается
разделяемое состояние
_Exception
_Cond.Notify_all();
throw exception(…)
_Result
_Cond.Notify_all();
…
while (!_Ready)
_Cond.wait(_Lock);
return <значение>;
future.get();

Важно!

- Будущие результаты сами по себе не обеспечивают синхронизацию доступа к разделяемым данным
- => если несколько потоков используют один и тот же объект future,
  - то они сами должны синхронизировать доступ с помощью future::valid(), мьютекса или других средств синхронизации
  - или нужно позволить нескольким потокам пользоваться одним и тем же объектом **std::shared_future** или каждому потоку работать со своей копией - **std::shared_future** без дополнительной синхронизации

Шаблон класса std::future:

- обеспечивает доступ к **обертке** для значения любого типа, вычисление или получение которого происходит отложено (то есть в неизвестном будущем)
- фактически поддерживает механизм однократного уведомления, является получателем будущего значения
- сам по себе future пассивен, он просто предоставляет доступ к некоторому **разделяемому состоянию**, которое состоит из 2-х частей: собственно интересующие **данные** + **флаг готовности** (как только значение вычислено, устанавливается флаг)

Взаимодействие потоков посредством std::future<>

предоставляет механизм для однократного получения результата асинхронной операции, инициированной: **std::async**(), std::packaged_task(), std::promise()

- готовность результата посредством методов std::future:
  - **wait()** - блокирует вызвавший поток до получения результата
  - **wait_for()** – ждет завершения или истечения timeout-а
  - **wait_until()** - ждет завершения или наступления момента
  - **get() –** для ожидания вызывает wait() и возвращает результат

Исключительно перемещаемый тип!

- future(const future& other) = delete;
- future operator=(const future& other) = delete;

std::future::**get()**

- **T get()**; //генеральный шаблон (возвращаемое значение формируется посредством **std::move**) =>
  повторный вызов == неопределенное поведение
- **T& get()**;//для специализации future<T&>
- **void get()**; // для специализации future<void>

Важно!

- Любой из вариантов дожидается завершения потока и получает результат
- Если было сохранено исключение, оно заново генерируется

std::future::**get()**

При вызове get() могут быть три ситуации:

- если выполнение функции происходило в отдельном потоке и уже закончилось (штатно или аварийно) – сразу получаем результат (родитель не блокируется)
- если выполнение функции происходит в отдельном потоке и еще не закончилось – поток-получатель блокируется до завершения дочернего
- если запуск был задан синхронно, то происходит просто вызов функции + формирование future

Важно: вторичный вызов get() – неопределенное поведение!

Пример std::async(). Поведение по умолчанию

```
int sum(const std::vector<int>& v){
    int res = 0;
    for (auto i:v) { res += i;}
    return res;
}

int main(){
    std::vector<int> v = { 1, 2, 3, 4 ,…};
    std::future<int> f = std::async(sum, std::cref(v));
    //…какие-то вычисления
    std::cout<<f.get(); //дожидаемся окончания,
        получаем результат
}
```

Пример std::async() Явное задание условий вызова - std::launch::async:

```
int sum(const std::vector<int>& v){
    int res = 0;
    for (auto i:v) { res += i;}
     return res;
}

int main(){
    std::vector<int> v = { 1, 2, 3, 4 };
    std::future<int> f = std::async(std::launch::async, sum,   std::cref(v));
    //…какие-то вычисления
    std::cout<<f.get(); //дожидаемся окончания,
          получаем результат
}
```

Пример std::async(). Явное задание условий вызова- std::launch::deferred

```
int sum(const std::vector<int>& v){
    int res = 0;
    for (auto i:v) { res += i;}
     return res;
}

int main(){
    std::vector<int> v = { 1, 2, 3, 4 };
    std::future<int> f = std::async( std::launch::deferred, sum, std::cref(v));
    //…какие-то вычисления
    if(<условие>) { std::cout<<f.get(); } //синхронный вызов + прием
          возвращаемого значения
}
```

std::launch::deferred и std::launch::async

```
void Consumer(std::future<int> f)
        { if(условие) {std::cout << f.get();} }
int Producer() { return rand() % 10; }
int HeavyProducer() { std::this_thread::sleep_for(1s); return 0; }

int main(){
  auto f1 = std::async(std::launch::deferred, Producer);
  std::thread th1(Consumer, std::move(f1));
  auto f2 = std::async(std::launch::async, HeavyProducer);
  std::thread th2(Consumer, std::move(f2));
 //полезная работа
  th1.join(); th2.join();
}
```

Специфика: если функция ничего не возвращает

```
void func(void);

int main(){
   std::future<void> f = std::async( func);
  //…какие-то вычисления
   f.get();  //эквивалентно f.wait(); }
```

Пример. Порядок вывода???

```
int main() {
 std::future<void> hello =    std::async(std::launch::async,
        [] { std::cout << "Hello, parallel world!“<<std::endl; });
 std::future<int> simple =    std::async(std::launch::async,
                                  [] { return 33; });
 hello.wait();
 std::cout << "My favorite number is " << simple.get();
```

std::future_status

- deferred - политика запуска потока была std::launch::deferred
- ready – разделяемое состояние сформировано
- timeout - таймаут истек, а разделяемое состояние **не** сформировано

Пример использования wait_for()

```
//Политику запуска определяет реализация!
using namespace std::chrono_literals;
auto f = std::async([]() { std::this_thread::sleep_for(3s);
                           std::cout <<  "Working hard!" << std::endl;});
while (f.wait_for(1s) == std::future_status::timeout) {//если политика запуска была
                    deferred, то выход из цикла
        std::cout << "in while" << std::endl; // выполняем другую работу, не требующую
                                                результата
}
std::cout << "main" << std::endl;
f.get();
```

Проблемы: отложенный вызов и future::wait_for() или future::wait_until()

Специфика: вызов future::wait_for() или future::wait_until() возвращает для отложенных задач std::**future_status::deferred =>**

```
int main(){
   using namespace std::chrono_literals;
   auto ft = std::async(std::launch::deferred,[](){…});
   while(ft.wait_for(100ms) !=
                  std:: future_status::ready){/*вечно!*/}
//а сюда мы не попадем НИКОГДА!!!
}
```

Как узнать – какая была политика запуска?

???

Как узнать – какая была политика запуска?

```
auto f = std::async(sum,1,2);
if (f.wait_for(0ms) != std::future_status::deferred)
{
   while (f.wait_for(100ms) != std::future_status::ready) {
   //полезная работа
   }
}
auto res = f.get();
```

std::future::valid()

```
int func(int);
int main(){
   int res=0;
   std::future<int> f1 = std::async( func, 5);
   bool b = f1.valid(); //true
   std::future<int> f2 = std::move( f1);
   b=f1.valid(); //false
   if(f2.valid()){  res = f2.get();} //true
   b=f2.valid(); //false
}
```

Сохранение исключения в объекте future

Если функция, вызванная посредством async(), генерирует исключение,

- это исключение сохраняется в разделяемом состоянии (в универсальной обертке для исключения любого типа)
- вызов get() повторно генерирует сохраненное исключение (при этом стандарт не оговаривает: в объекте future создается копия исключения или сохраняется ссылка на оригинал)

Сохранение исключения в объекте future. Пример:

```
double square_root(double x) {
if (x<0) { throw std::out_of_range("x<0"); }
return sqrt(x);
}
int main(){
   std::future<double> f = std::async(square_root, -1);
   double y=0;
   try {
         y = f.get();
    }
   catch (std::out_of_range& e){ std::cout << e.what(); }
}
```

Пример более жизненный:

```
int main() {
    std::vector<std::future<int>> futures;
    size_t N = <большое!!!>;
    futures.reserve(N);

     for(int i = 0; i < N; ++i) {
      futures.push_back (std::async([](int x){return x*x;},i));
  }
//… занимаемся полезной работой
//нужны ВСЕ результаты!
   for(auto &f : futures) {
    std::cout << f.get() << std::endl;
  }
…
}
```

Как и где происходит «самоуничтожение разделяемого состояния»

Вариант 1.

Caller	Calee

{
auto ft = std::async(callable);
//ref_count++ (2)
 	
int res=ft.get(); //результат «перемещается» из shared_state в res, ref_count– (0) => последний владелец => **уничтожение**!
 	
}//~ft – «пустой» => продолжение вып.
	int callable() //ref_count=1
	{
	…
	return 1; //установка флага готовности
	} ref_count– (1)

Замечание:

- Если деструктор future вызывается до вызова get() или wait(),
  деструктор блокирует поток до завершения задачи!

Как и где происходит «самоуничтожение разделяемого состояния»

Вариант 2.

Caller	Calee

{
auto ft = std::async(callable);
//ref_count++ (2)
 	
}//~ft – Calee еще выполняется!
ref_count– (1)
ref_count!=0 => **Caller блокируется**,
пока ref_count не станет =0
	int callable() //ref_count=1
	{
	…
	
	return 1; //установка флага готовности
	} ref_count– (0); => последний владелец => **уничтожение**!

Как и где происходит «самоуничтожение разделяемого состояния»

Вариант 3.

Caller	Calee

/*auto ft* = /??? std::async(callable);
//ref_count++ (2)
 	
//~возвр_знач – Calee еще выполняется! ref_count– (1)
ref_count!=0 => **Caller блокируется**, пока ref_count не станет =0
	int callable() //ref_count=1
	{
	…
	
	return 1; //установка флага готовности
	} ref_count– (0); => последний владелец => **уничтожение**!

Пример:

```
double sumN(int n){
double s = 0;
for (int i = n; i > 0; i--) { s += i; }
std::cout << "done";
return s;
}

int main(){
  {
        std::future<double> f = std::async(sumN, 0x7fffffff);
  } //~f заблокирует родительский поток до завершения дочернего
}
```

STD::SHARED_FUTURE

Если требуется в нескольких потоках ожидать получения одного и того же результата ???

```
int threadFunc(int x, int y){ return x + y; }

void thread1(std::future<int>& f){ int res = f.get(); }
void thread2(std::future<int>& f){ int res = f.get(); }

int main(){
   std::future<int> f = std::async(threadFunc, 1, 2);
   std::thread t1(thread1,std::ref(f));
   std::thread t2(thread2, std::ref(f));
   t1.join();    t2.join();
}
```

Шаблон класса std::shared_future

- позволяет получить результат асинхронной операции, но,
  - в отличие от future (вторичный вызов get() – неопределенное поведение)
  - **shared_future** допускает несколько вызовов get() и возвращает один и тот же результат или генерирует одно и то же исключение
- создать и проинициализировать можно:
  - посредством конструкторов shared_future
  - или методом future::share()

Формирование std::shared_future посредством std::future

```
std::future<int> f1 = …;
std::shared_future<int> sf1 ( std::move(f1));
bool b1 = f1.valid(); //???

std::future<int> f2 = …;
std::shared_future<int> sf2= f2.share();
bool b2 = f2.valid(); //???
```

Объекты shared_future можно:

- копировать
- присваивать
- перемещать

Модифицируем пример посредством std::shared_future

```
int threadFunc(int x, int y){ return x + y; }

void thread1(std::shared_future<int>& f){ int res = f.get(); …}
void thread2(std::shared_future<int>& f){ int res = f. get(); …}

int main(){
  std::future<int> f = std::async(threadFunc, 1, 2);
  std::shared_future<int> sf(std::move(f));
  std::thread t1(thread1, std::ref(sf));
  std::thread t2(thread2, std::ref(sf));
  t1.join();    t2.join();
}
```

Или по значению:

```
int threadFunc(int x, int y){ return x + y; }

void thread1(std::shared_future<int> f){ int res = f.get(); …}
void thread2(std::shared_future<int> f){ int res = f. get(); …}

int main(){
  std::future<int> f = std::async(threadFunc, 1, 2);
  std::shared_future<int> sf(std::move(f));
  std::thread t1(thread1, sf);
  std::thread t2(thread2, sf);
  t1.join();    t2.join();
}
```

#include <future>

STD::PROMISE

PROMISES, PROMISES…

М.Полубенцева

std::promise<>

- это средство «активного» формирования результата потока =>
- ни возвращаемое функцией значение, ни генерация исключения **не** влияют на разделяемое состояние
- если поток не вызовет метод, формирующий результат или исключение в разделяемом состоянии, то флаг готовности установлен не будет (до вызова деструктора promise)

Отличия механизмов async() и promise<>

- **async()** –разделяемое состояние и флаг готовности формируются только при корректном завершении (return <возвр_знач>) или при генерации исключения (throw)
  promise<> - при вызове методов promise::set_value() и promise::set_exception()
- **async()** – формирует принципиально только одну сущность (один результат или одно исключение)
  promise<> - обещаний в поток можно передать сколько угодно!

std::promise<>

- копирование и присваивание запрещены
- перемещение разрешено

Специфика std::promise:

- std::promise/std::future обеспечивает механизм (один из возможных), позволяющий передавать значения или исключения между потоками
- в отличие от async(), которая явно возвращает объект future, promise создает future по запросу – promise:: **get_future()**
- механизм формирования результата разный:
  - при вызове async() в разделяемом состоянии **неявно** формируется возвращаемое потоком значение или сгенерированное исключение (при завершении потока)
  - при использовании promise – значение нужно сформировать **явно** (set_value(), set_exception())

Разделение ролей future и promise:

- **future:: get()** позволяет
  получить данные
  или повторно сгенерировать исключение
- promise позволяет
  передать данные - **set_value**()
  или исключение - **set_exception**()

Напоминание: разделяемое состояние (данные):

```
template<class _Ty> class _Associated_state{
  _Atomic_counter_t _Refs;
  …
_Ty _Result;
  _XSTD exception_ptr _Exception;
  mutex _Mtx;
  condition_variable _Cond;
  bool _Retrieved;
  int _Ready;
  bool _Ready_at_thread_exit;
  bool _Has_stored_result;
  bool _Running;
  …
};
```

Связь std::promise<> и разделяемого состояния:

```
template<class _Ty> class promise{// class that defines an asynchronous provider that holds a value
        _Promise<_Ty> _MyPromise;
}

template<class _Ty> class _Promise{// class that implements core of promise;
        _State_manager<_Ty> _State;
        bool _Future_retrieved;
};
template<class _Ty> class _State_manager{// class for managing possibly non-existent associated asynchronous state object
_Associated_state<_Ty> *_Assoc_state;
bool _Get_only_once;
};

template<class _Ty> class _Associated_state
{// class for managing associated synchronous state
_Atomic_counter_t _Refs;
};
```

Связь promise и разделяемого состояния (реализация):

```
template<class _Ty> class promise {// class that defines an asynchronous provider that holds a value
public: //основная функциональность
promise() : _MyPromise(new _Associated_state<_Ty>){}

void set_value(const _Ty& _Val)
{ _MyPromise._Get_state_for_set()._Set_value(_Val, false); }

void set_exception(_XSTD exception_ptr _Exc)
{ _MyPromise._Get_state_for_set()._Set_exception(_Exc, false); }

private:
_Promise<_Ty> _MyPromise;
};
```

Связь future и promise:

```
template<class _Ty> class promise {
…
public:
  future<_Ty> get_future(){ // return a future object that shares the associated
      return (future<_Ty>(_MyPromise._Get_state_for_future(),
                  _Nil()));
  }
…
}
```

Формирование/получение результата

- **std::promise** отвечает за установку значения:
  - std::promise::set_value() – сохраняет значение в разделяемом состоянии и выставляет флаг готовности
  - std::promise::set_value_at_thread_exit()- «-», но не выставляет флаг до завершения потока
  - std::promise::set_exception()
  - std::promise::set_exception_at_thread_exit ()
- а **std::future** - за его получение (блокирует поток до установки готовности в разделяемом состоянии):
  - std::future::wait()
  - std::future::get()

Пример promise:

```
int main(){
   std::promise<int> p;
   std::future<int> f = p.get_future(); //можем сразу же
                                        получить доступ к разделяемому состоянию
   std::thread th( [&p](){p.set_value(33);} );
   th.detach(); //можем подождать завершения – join(), но не интересно
   //делаем что-то полезное
   int res = f.get(); //получаем результат
}
```

Последовательность вывода???

```
int main(){
   std::promise<int> p;
   std::future<int> f = p.get_future();
    std::cout<<“a”;
   std::thread th( [&p](){std::cout<<“b”; p.set_value(33); std::cout<<“c”;});
   th.detach(); //можем подождать завершения – join(), но не интересно
  std::cout<<“d”;
   int res = f.get(); //получаем результат
    std::cout<<“e”;
}
```

Важно!

- Если для одного и того же объекта promise **повторно** вызвать set_value() или set_exception(), будет сгенерировано исключение!
- Если **на момент вызова деструктора promise** результат не сформирован, сохраняет в разделяемом состояние исключение std::future_error с кодом std::future_errc::broken_promise и устанавливает флаг готовности

Если результат не формируется и исключение не генерируется???

```
{
    std::promise<int> p;
    std::future<int> f = p.get_future();
    std::thread th([pl = std::move(p)]() {std::cout << "no result && no exception!";});
    th.detach();
    try {
       int res = f.get(); //пробуем получить результат
    }
    catch (std::future_error & er) { std::cout << er.what(); }
}
```

Отличие от предыдущего примера???

```
{
    std::promise<int> p;
    std::future<int> f = p.get_future();
    std::thread th([&p]() {std::cout << "no result && no exception!";});
    th.detach();
    try {
       int res = f.get(); //пробуем получить результат
    }
    catch (std::future_error & er) { std::cout << er.what(); }
}
```

Пример некорректного использования promise:

```
void fPromise(std::promise<int>& p){ p.set_value(1); }

int main(){
        std::future<int> fut;
    {
        std::promise<int> P;
        fut = P.get_future();
        std::thread th(fPromise, std::ref(P));
        th.detach();
    } //???
        int res1 = fut.get(); //???
}
```

Чиним:

```
void fPromise(std::promise<int> p){ p.set_value(1); }

int main(){
        std::future<int> fut;
    {
        std::promise<int> P;
        fut = P.get_future();
        std::thread th(fPromise, std::move(P));
        th.detach();
    } //???
        int res1 = fut.get();
}
```

Еще один пример некорректного использования promise:

```
void fPromise(std::promise<int> p){
        p.set_value(1);
        //…
        p.set_value(2); //или p.set_exception(std::exception_ptr());
}
int main(){
        std::promise<int> P;
        std::future<int> fut = P.get_future();
        std::thread th(fPromise, std::move(P));
        th.detach();
        std::this_thread::sleep_for(1s);
        int res1 = fut.get();
}
```

Еще один пример межпоточного обмена данными посредством promise

```
std::promise<int> promise;

void thread_func1(){    promise.set_value(33); }

void thread_func2(){  std::cout << promise.get_future().get(); }

int main(){
   std::thread th1(thread_func1);
   std::thread th2(thread_func2);

   th1.join();    th2.join();
}
```

Пример передачи исключения посредством promise

```
void sum_promise(const std::vector<int>& v,
                                    std::promise<int>& p){
        if (v.empty())
        {p.set_exception(std::make_exception_ptr(std::runtime_error("empty")); }
        else{
                int res = 0;
                for (const auto& i : v){ res += i; }
                p.set_value(res);
        }
        //может быть, еще что-то делаем…
}
```

Продолжение примера:

```
int main(){
        std::vector<int> v = { 1,2,3,4,5,6,7 };
        std::promise<int> p;
        std::thread th(sum_promise, std::cref(v),   std::ref(p) );
        th.detach();
        //...
        int sum;
        try {
                sum = p.get_future().get();
                }catch (std::exception& e){…}
}
```

Важно:

- f.get(); блокирует вызвавший поток до формирования результата (когда в другом потоке будет вызвана p.set_value(); или p.set_exception()), а не до завершения поставляющего результат потока!!!
- для ожидания завершения –
  p. **set_value_at_thread_exit**(…);
  или
  p. **set_exception_at_thread_exit**(…)

std::promise<void>

и соответственно std::future<void>

- можно использовать в задачах, не требующих возвращения результата (но, возможно, генерирующих исключение)
- только для ожидания
  - корректного завершения
  - или аварийного завершения при генерации исключения
- при этом используется специализация set_value();

Пример использования std::promise<void> - создание потока в приостановленном состоянии

Важно! В тех ситуациях когда, перед тем, как поток начнет выполнение (вернее будет включен в диспетчирование) нужно произвести его «настройку», например:

- установить приоритет (системными средствами)
- получить для других системных действий дескриптор потока

Для этого можно использовать специализацию **std::promise<void>**

Пример создания потока в приостановленном состоянии

```
void SimpleThreadF() { std::cout << "Child" << std::endl; }
int main(){
   std::promise<void> suspendPromise;
   std::thread th([&suspendPromise] { suspendPromise.get_future().wait();
                                                    SimpleThreadF();});

     //"Настройка" потока:
  HANDLE h = th.native_handle();
  ::SetThreadPriority(h, THREAD_PRIORITY_ABOVE_NORMAL);
   std::cout << "Parent"<<std::endl;
   //Запуск:
   suspendPromise.set_value();
//Возможно еще какая-то полезная работа
   th.join();
}
```

Как получить несколько результатов?

```
void fMultiplePromises(std::promise<int>& p1, std::promise<int>& p2, std::promise<int>& p3) {
        p1.set_value(1);
        p2.set_value(2);
        p3.set_value(3);
}

int main(){
  std::promise<int> P1, P2, P3;
  std::future<int> fut1 = P1.get_future(), fut2 = P2.get_future(), fut3 = P3.get_future();
  std::thread th(fMultiplePromises, std::ref(Promise1), std::ref(Promise2),
                                    std::ref(Promise3));
  th.detach();
  int res1 = fut1.get();    int res2 = fut2.get();    int res3 = fut3.get();
}
```

Передача исключения посредством promise

- Для передачи исключения - метод std::promise::**set_exception** (который принимает объект типа std::exception_ptr) или std::promise::**set_exception_at_thread_exit**()
- Напоминание: получить объект std::exception_ptr можно:
  - вызовом std::current_exception() из блока catch
  - либо создать объект этого типа напрямую посредством std::make_exception_ptr()

Пример обработки исключения

```
std::promise<int> promise;

void thread_func1(){
        promise.set_exception(std::make_exception_ptr(std::runtime_error("error")));
}

void thread_func2(){
  try   {
    std::cout << promise.get_future().get() << std::endl;
  } catch (const std::exception& e) {  std::cout << e.what() << std::endl;  }
}

int main(){
  std::thread th1(thread_func1);    std::thread th2(thread_func2);
   th1.join();    th2.join();
        …
}
```

#include <future>

STD::PACKAGED_TASK<>

Зачем нужен **packaged_task<>**

Проблема: есть обычная callable, которую хочется выполнить в отдельном потоке и получить **результат** (возможно даже в другом потоке)!

Варианты:

1. Изменить сигнатуру функции, чтобы она принимала параметр типа promise – не хочется/невозможно
2. Изменить сигнатуру функции, чтобы она принимала адрес, по которому сформирует результат – тоже не хочется /невозможно
3. Использовать async() + future – происходит немедленный запуск потока (launch::async), а хочется только подготовить все к запуску (пул)
4. => «Завернуть» callable в обертку packaged_task

Назначение std::packaged_task:

- реализует понятие «задачи» - является хранилищем для пары callable + promise => удобно использовать при асинхронном программировании
- расширяет возможности async()
- реализован как функтор (перегружен operator() – возвращаемое значение или исключение запаковывается в «разделяемое состояние» => доступны посредством future<>)

Специфика packaged_task<>

- Параметром шаблона является сигнатура callable
- Параметром конструктора является callable(callable должна принимать параметры требуемого типа и возвращать значение требуемого типа – при этом точного совпадения типов не требуется => можно разрешить компилятору осуществлять неявные преобразования типа)
- operator() принимает параметры, предназначенные callable, и сохраняет возвращаемое значение в разделяемом состоянии. Сам оператор ничего не возвращает (**void**) => результат можно получить только посредством future из разделяемого состояния!

std::packaged_task<>

```
template<class _Ret, class... _ArgTypes>
class packaged_task<_Ret(_ArgTypes...)>{
        future<_Ret> get_future(){
                return (future<_Ret>(_MyPromise._Get_state_for_future(), _Nil()));
        }
void operator()(_ArgTypes... _Args) {
        …
        _MyStateType *_Ptr = static_cast<_MyStateType *>(_State._Ptr());
        _Ptr->_Call_immediate(_STD forward<_ArgTypes>(_Args)...);
}

private:
_MyPromiseType _MyPromise; //здесь хранится callable + promise
};
```

Пояснение:

int sum(int, int);

При создании объекта типа packaged_task:

std::packaged_task<int(int, int)> task1(sum); //это НЕ вызов sum,
и тем более НЕ запуск потока

компилятор генерирует анонимный функтор типа:

```
template<> class packaged_task<int(int, int)> {
public:
  template<typename Callable> explicit packaged_task(Callable&& f);
   std::future<int> get_future();
   void operator()(int, int);
...
};
```

Специфика std::packaged_task

- исключительно перемещаемый класс
- перегружен operator() таким образом, что он:
  - вызывает сохраненное в объекте packaged_task callable с указанными параметрами
  - сохраняет возвращаемое значение или исключение в разделяемом состоянии и устанавливает в разделяемом состоянии признак готовности
- попытка повторного использования объекта packaged_task
  - исключение std::future_error

Попытка повторного использования объекта packaged_task:

```
int sum(int, int);
int main(){
std::packaged_task<int(int, int)> task1(sum);
//или
std::packaged_task<decltype(sum)> task2(sum);

task1(1000);
try{
        task1(2000);
}
catch (std::future_error&){ … }
```

Для получения future из packaged_task

```
std::future<R>
        std::packaged_task::get_future();
```

Важно! Можно вызвать только один раз, так как происходит **перемещение**, а не копирование ассоциированного с packaged_task объекта future

Разница в использовании packaged_task:

```
int sum(int x, int y) { return x + y; }

int main(){
   std::packaged_task<int(int, int)> task(sum); //это просто
         подготовка к запуску
   std::future<int> f = task.get_future(); //получаем доступ к
         разделяемому состоянию
   task(1, 2); //!!! но! вызов функции в текущем потоке!!!
 //делаем что-то полезное
   int res = f.get(); //получаем результат
}
```

Разница в использовании packaged_task:

```
int sum(int x, int y) { return x + y; }

int main(){
  std::packaged_task<int(int, int)> task(sum); //это просто
        подготовка к запуску
  std::future<int> f = task.get_future(); //получаем доступ к
        разделяемому состоянию
  std::thread th(std::move(task),1, 2); //!!! запуск потока!!!
   th.detach();
 //делаем что-то полезное
  int res = f.get(); //получаем результат
}
```

Важно! «Заготовить» future необходимо до move(task) !!!

```
std::packaged_task<int(int, int)> task(sum);
bool b1 = task.valid(); //???
std::thread th(std::move(task),1, 2); // запуск потока

bool b2 = task.valid(); //???

//task стал «недействительным»! Его разделяемое состояние и callable перемещены в другой поток
std::future<int> f = task.get_future();

//до «полезного» дело не дойдет, так как будет сгенерировано исключение
                                                    std::future_error
```

Специфика future и packaged_task:

деструктор future, полученного из packaged_task НЕ блокирует родительский поток до завершения дочернего

```
{
        std::packaged_task<int(int, int)> task(sum);
        std::future<int> f = task.get_future();
        std::thread th(std::move(task), 1, 2);
        th.detach();
} //
```

Специфика packaged_task

так как перегружен operator(), объект std::packaged_task в свою очередь можно использовать везде, где требуется callable:

- в частности «завернуть» в std::function
- объекты такого типа можно хранить в контейнерах

Храним задачи в контейнере:

```
double sumN(int n) {  double s = 0; for (int i = n; i > 0; i--) {s += i;}  return s; }
int main(){
  std::vector<std::packaged_task<double(int)> > tasks;
  tasks.reserve(10);
  std::vector<std::future<double>> futures;
  futures.reserve(10);

  for (int i = 0; i < 10; i++) {
        tasks.emplace_back(sumN);
        futures.push_back(tasks[i].get_future());
  }

  int n = 10;
  for(auto& t:tasks){ std::thread th(std::move(t),n); th.detach(); n *= 2; }
  for (auto& f : futures) { std::cout<< f.get()<<" "; }
}
```

Тип callable в шаблоне packaged_task и неявное приведение типа:

```
double sumN(int n);

int main(){
  std::packaged_task<double(int)> task1(sumN); //ок

   std::packaged_task<int(int)> task2(sumN); //ОК,  но! при этом std::future<int>
                => потеряем точность при формировании результата в разделяемом состоянии

   std::packaged_task<double(double)>
        task3(sumN); //ок
…
}
```

Пример packaged_task:

```
std::vector<double> v(100000, 1.1);
typedef  decltype(v)::iterator IT;
std::packaged_task<double(IT, IT, double)> pt1{ std::accumulate<IT,double> };
std::packaged_task<double(IT, IT, double)> pt2{ std::accumulate<IT,double> };

auto f0 = pt1.get_future();
auto f1 = pt2.get_future();

std::thread t1(std::move(pt1), v.begin(), v.begin() + v.size() / 2, 0);
std::thread t2(std::move(pt2), v.begin() + v.size() / 2, v.end(), 0);
t1.detach(); t2.detach();
//Полезная работа
double res =  f0.get() + f1.get();// получаем результаты
```

Пример межпоточного использования packaged_task

```
int f(){   return 1;}

std::packaged_task<int()> task(f);

void thread_func1(){   task();}

void thread_func2(){
  std::cout << task.get_future().get() << std::endl;
}

int main(){
  std::thread th1(thread_func1);
  std::thread th2(thread_func2);
  th1.join();    th2.join();
}
```

void std::packaged_task::
make_ready_at_thread_exit(ArgTypes... args);

- принимает параметры для вызова *callable*
- выполняет код callable, сохраненной в *packaged_task*, результат (возвращаемое значение или исключение) сохраняется в разделяемом состоянии (future), НО флаг готовности будет выставлен только после того, как все деструкторы локальных (для данного потока) объектов будут выполнены (т.е. прямо перед завершением потока)

Пример make_ready_at_thread_exit()

```
int callable() { /*долго работает…*/ return 33; }

void calc(std::packaged_task<int(void)>& task)
{ task.make_ready_at_thread_exit(); /*долго работает…*/ }

int main(){
  std::packaged_task<int(void)> task(callable);
  std::future<int> f = task.get_future();

  std::thread t(calc, std::ref(task)); //запускаю фоновый поток, чтобы в нем выполнилась callable
  t.detach();
 //делаем полезную работу
  // а результат callable нужен здесь:
  int result = f.get();
}
```

std::packaged_task::reset()

Позволяет повторно использовать один и тот же объект std::packaged_task для выполнения

того же callable

с новым разделяемым состоянием!

Пример packaged_task::reset() :

```
std::packaged_task<decltype(sum)> task(sum);
std::future<int> f = task.get_future();
task(1, 2);
int res1 = f.get();
try {
        task(2, 3); //исключение!
    }
        catch (std::future_error&) {}
//но!
task.reset();
f = task.get_future(); //доступ к новому разделяемому состоянию!
task(5, 6);
int res2 = f.get();
```

СРАВНЕНИЕ НИЗКОУРОВНЕВЫХ И ВЫСОКОУРОВНЕВЫХ СРЕДСТВ СОЗДАНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ

М.Полубенцева

Когда и что удобнее использовать: std::thread

std::thread – программирование на уровне потоков:

- «+»
  - для получения доступа к системным средствам
  - для организации пула потоков
  - для гарантированного задания thread local – данных
  - для гарантированного использования средств синхронизации
- «-»
  - трудно/небезопасно получать результат работы потока
  - только два варианта взаимодействия

condition_variable + mutex

- Для многократного уведомления
- в задачах, где есть субъект, гарантированно/постоянно ожидающий наступления некоторого события

Использование разделяемого состояния посредством future<>

- **std::async()**
- **std::packaged_task<>** - по сравнению с async() позволяет отделить создание future<> (get_future()) от собственно выполнения (но! результат формируется только при завершении)
- **std::promise<>** - по сравнению с async() и std::packaged_task<> позволяет получать результат/исключение по «готовности», а не после завершения функции

Когда и что удобнее использовать: std::async и std::future

std::async – программирование на уровне задач (однократное получение результата):

- «+»
  - взаимодействие посредством разделяемого состояния (данные + флаг готовности)
  - возможность синхронного/асинхронного запуска
- «-»
  - по умолчанию неизвестно, как (синхронно/асинхронно) выполняется задача (=> проблемы thread_local переменных и мьютексов)
  - нет отложенного запуска (если запуск асинхронный, сразу включается в диспетчирование!)
  - std::future::get() (wait()) блокирует родительский поток до завершения дочернего (return <значение> или throw <исключение>)
  - ~future() может блокировать родительский поток

Когда и что удобнее использовать: std::shared_future

для многократного получения одного и того же результата (в разных потоках)

Когда и что удобнее использовать: std::promise

std::promise – хранилище для результата (который можно получить посредством std::future):

- позволяет подготовить/настроить пару callable + future
- явная установка результата (или генерация исключения) – set_value() / set_exception()
- родительский поток блокируется не до завершения дочернего, а до формирования результата или генерации исключения

Когда и что удобнее использовать: std::packaged_task

std::packaged_task – «упаковывает» callable + promise

- можно «вызвать» напрямую (перегружен operator()) в текущем потоке
- можно в свою очередь «завернуть» в объект function
- можно передать в качестве параметра в потоковую функцию (и в любую другую функцию)
- объединить в коллекцию

Пример:

```
std::future<bool> SomeFunc(const std::string& str)
{
   auto callable = [](const std::string& s){return s<“abc”;};
   std::packaged_task<bool(const std::string&)>
                                                    task(callable);
   auto fut = task.get_future();
   std::thread thread(std::move(task), str);
   thread.detach();
   return std::move(fut);
}
```