

# Оглавление

---

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Предисловие.....                                                                            | 16 |
| Благодарности.....                                                                          | 18 |
| О книге.....                                                                                | 20 |
| Структура издания .....                                                                     | 20 |
| Для кого предназначена эта книга .....                                                      | 21 |
| Порядок чтения.....                                                                         | 21 |
| Условные обозначения и загрузка кода .....                                                  | 22 |
| Требования к программным средствам .....                                                    | 22 |
| Форум, посвященный книге .....                                                              | 22 |
| Об авторе.....                                                                              | 24 |
| Об иллюстрации на обложке .....                                                             | 25 |
| От издательства .....                                                                       | 26 |
| <b>Глава 1. Здравствуй, мир конкурентности в C++!</b> .....                                 | 27 |
| 1.1. Что такое конкурентность .....                                                         | 28 |
| 1.1.1. Конкурентность в компьютерных системах.....                                          | 28 |
| 1.1.2. Подходы к конкурентности.....                                                        | 31 |
| 1.1.3. Сравнение конкурентности и параллелизма.....                                         | 33 |
| 1.2. Зачем используется конкурентность .....                                                | 34 |
| 1.2.1. Конкурентность для разделения неотложных задач .....                                 | 34 |
| 1.2.2. Конкурентность для повышения производительности:<br>параллелизм задач и данных ..... | 35 |
| 1.2.3. Когда не нужна конкурентность .....                                                  | 36 |
| 1.3. Конкурентность и многопоточность в C++ .....                                           | 37 |
| 1.3.1. История поддержки многопоточности в C++.....                                         | 38 |
| 1.3.2. Поддержка конкурентности в стандарте C++11 .....                                     | 39 |

|                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.3.3. Расширение поддержки конкурентности и параллелизма в C++14 и C++17..... | 39        |
| 1.3.4. Эффективность, обеспеченная библиотекой потоков C++ .....               | 40        |
| 1.3.5. Средства, ориентированные на использование конкретной платформы .....   | 41        |
| 1.4. Приступаем к практической работе .....                                    | 41        |
| 1.4.1. Здравствуй, мир конкурентности.....                                     | 42        |
| Резюме .....                                                                   | 43        |
| <b>Глава 2. Управление потоками .....</b>                                      | <b>44</b> |
| 2.1. Основы управления потоками .....                                          | 45        |
| 2.1.1. Запуск потока .....                                                     | 45        |
| 2.1.2. Ожидание завершения потока .....                                        | 48        |
| 2.1.3. Ожидание в исключительных обстоятельствах.....                          | 49        |
| 2.1.4. Запуск потоков в фоновом режиме .....                                   | 51        |
| 2.2. Передача аргументов функции потока .....                                  | 53        |
| 2.3. Передача права владения потоком.....                                      | 55        |
| 2.4. Выбор количества потоков в ходе выполнения программы.....                 | 60        |
| 2.5. Идентификация потоков.....                                                | 63        |
| Резюме .....                                                                   | 64        |
| <b>Глава 3. Совместное использование данных несколькими потоками.....</b>      | <b>65</b> |
| 3.1. Проблемы совместного использования данных несколькими потоками.....       | 66        |
| 3.1.1. Состояние гонки .....                                                   | 68        |
| 3.1.2. Пути обхода проблемных состояний гонок .....                            | 69        |
| 3.2. Защита совместно используемых данных с применением мьютексов .....        | 70        |
| 3.2.1. Использование мьютексов в C++ .....                                     | 70        |
| 3.2.2. Структуризация кода для защиты совместно используемых данных .....      | 72        |
| 3.2.3. Обнаружение состояния гонки, присущего интерфейсам .....                | 74        |
| 3.2.4. Взаимная блокировка: проблема и решение .....                           | 81        |
| 3.2.5. Дополнительные рекомендации по обходу взаимных блокировок .....         | 84        |
| 3.2.6. Гибкая блокировка с применением <code>std::unique_lock</code> .....     | 91        |
| 3.2.7. Передача владения мьютексом между областями видимости .....             | 92        |
| 3.2.8. Блокировка с соответствующей степенью детализации.....                  | 94        |
| 3.3. Альтернативные средства защиты совместно используемых данных.....         | 97        |
| 3.3.1. Защита совместно используемых данных во время инициализации.....        | 97        |
| 3.3.2. Защита редко обновляемых структур данных.....                           | 101       |
| 3.3.3. Рекурсивная блокировка .....                                            | 103       |
| Резюме .....                                                                   | 104       |

|                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Глава 4. Синхронизация конкурентных операций</b> .....                                                                                 | 105 |
| 4.1. Ожидание наступления события или создания другого условия .....                                                                      | 106 |
| 4.1.1. Ожидание выполнения условий с применением условных переменных .....                                                                | 107 |
| 4.1.2. Создание потокобезопасной очереди с условными переменными.....                                                                     | 110 |
| 4.2. Ожидание единичных событий с помощью фьючерсов .....                                                                                 | 115 |
| 4.2.1. Возвращение значений из фоновых задач.....                                                                                         | 116 |
| 4.2.2. Связывание задачи с фьючерсом .....                                                                                                | 119 |
| 4.2.3. Создание промисов <code>std::promise</code> .....                                                                                  | 121 |
| 4.2.4. Сохранение исключения на будущее.....                                                                                              | 124 |
| 4.2.5. Ожидание сразу в нескольких потоках.....                                                                                           | 125 |
| 4.3. Ожидание с ограничением по времени .....                                                                                             | 128 |
| 4.3.1. Часы .....                                                                                                                         | 128 |
| 4.3.2. Продолжительность .....                                                                                                            | 130 |
| 4.3.3. Моменты времени .....                                                                                                              | 131 |
| 4.3.4. Функции, принимающие сроки ожидания .....                                                                                          | 133 |
| 4.4. Применение синхронизации операций для упрощения кода .....                                                                           | 135 |
| 4.4.1. Функциональное программирование с применением фьючерсов.....                                                                       | 135 |
| 4.4.2. Синхронизация операций путем передачи сообщений.....                                                                               | 141 |
| 4.4.3. Конкурентность, организованная в стиле продолжений с применением Concurrency TS.....                                               | 146 |
| 4.4.4. Выстраиваем продолжения в цепочку .....                                                                                            | 148 |
| 4.4.5. Ожидание готовности более чем одного фьючерса .....                                                                                | 151 |
| 4.4.6. Ожидание первого фьючерса в наборе с <code>when_any</code> .....                                                                   | 153 |
| 4.4.7. Защелки и барьеры в Concurrency TS .....                                                                                           | 156 |
| 4.4.8. Базовый тип защелки <code>std::experimental::latch</code> .....                                                                    | 156 |
| 4.4.9. Основной барьер <code>std::experimental::barrier</code> .....                                                                      | 157 |
| 4.4.10. Барьер <code>std::experimental::flex_barrier</code> — более гибкий соратник барьера <code>std::experimental::barrier</code> ..... | 159 |
| Резюме .....                                                                                                                              | 161 |
| <b>Глава 5. Модель памяти C++ и операции над атомарными типами</b> .....                                                                  | 162 |
| 5.1. Основы модели памяти.....                                                                                                            | 163 |
| 5.1.1. Объекты и их размещение в памяти.....                                                                                              | 163 |
| 5.1.2. Объекты, области памяти и конкурентность.....                                                                                      | 165 |
| 5.1.3. Очередность внесения изменений.....                                                                                                | 166 |
| 5.2. Атомарные операции и типы в C++.....                                                                                                 | 166 |
| 5.2.1. Стандартные атомарные типы.....                                                                                                    | 167 |
| 5.2.2. Операции над <code>std::atomic_flag</code> .....                                                                                   | 171 |

|                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.2.3. Операции над <code>std::atomic&lt;bool&gt;</code> .....                                                 | 173 |
| 5.2.4. Операции над <code>std::atomic&lt;T*&gt;</code> : арифметика указателей .....                           | 176 |
| 5.2.5. Операции над стандартными атомарными целочисленными типами.....                                         | 177 |
| 5.2.6. Шаблон первичного класса <code>std::atomic&lt;&gt;</code> .....                                         | 178 |
| 5.2.7. Свободные функции для атомарных операций .....                                                          | 180 |
| 5.3. Синхронизация операций и принудительное упорядочение.....                                                 | 183 |
| 5.3.1. Отношение «синхронизируется с».....                                                                     | 184 |
| 5.3.2. Отношение «происходит до» .....                                                                         | 185 |
| 5.3.3. Упорядочение доступа к памяти для атомарных операций.....                                               | 187 |
| 5.3.4. Последовательности освобождений и отношения<br>«синхронизируется с».....                                | 207 |
| 5.3.5. Барьеры.....                                                                                            | 209 |
| 5.3.6. Упорядочение неатомарных операций с помощью атомарных операций ....                                     | 211 |
| 5.3.7. Упорядочение неатомарных операций .....                                                                 | 212 |
| Резюме .....                                                                                                   | 216 |
| <b>Глава 6.</b> Разработка конкурентных структур данных с блокировками .....                                   | 217 |
| 6.1. Что означает разработка структур данных для конкурентного доступа.....                                    | 218 |
| 6.1.1. Рекомендации по разработке структур данных для конкурентного<br>доступа.....                            | 219 |
| 6.2. Конкурентные структуры данных с блокировками .....                                                        | 220 |
| 6.2.1. Потокбезопасный стек, использующий блокировки .....                                                     | 221 |
| 6.2.2. Потокбезопасная очередь с использованием блокировок<br>и условных переменных.....                       | 224 |
| 6.2.3. Потокбезопасная очередь с использованием подробной<br>детализации блокировок и условных переменных..... | 228 |
| 6.3. Разработка более сложных структур данных с использованием блокировок .....                                | 240 |
| 6.3.1. Создание потокбезопасной поисковой таблицы с использованием<br>блокировок .....                         | 240 |
| 6.3.2. Создание потокбезопасного списка с использованием блокировок.....                                       | 246 |
| Резюме .....                                                                                                   | 250 |
| <b>Глава 7.</b> Разработка конкурентных структур данных без блокировок.....                                    | 251 |
| 7.1. Определения и выводы .....                                                                                | 252 |
| 7.1.1. Типы структур данных, не подвергаемых блокировкам .....                                                 | 252 |
| 7.1.2. Структуры данных, свободные от блокировок .....                                                         | 254 |
| 7.1.3. Структуры данных, свободные от ожиданий.....                                                            | 254 |
| 7.1.4. Все за и против создания структур данных, свободных от блокировок ....                                  | 255 |
| 7.2. Примеры структур данных, свободных от блокировок .....                                                    | 256 |
| 7.2.1. Создание потокбезопасного стека без блокировок .....                                                    | 257 |

|                                                                                                  |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.2.2. Устранение утечек: управление памятью в структурах данных, свободных от блокировок .....  | 261        |
| 7.2.3. Определение узлов, не подлежащих утилизации, с помощью указателей опасности .....         | 266        |
| 7.2.4. Определение используемых узлов путем подсчета ссылок .....                                | 274        |
| 7.2.5. Применение модели памяти к свободному от блокировок стеку .....                           | 281        |
| 7.2.6. Создание потокобезопасной очереди без блокировок .....                                    | 285        |
| 7.3. Рекомендации по созданию структур данных без блокировок .....                               | 298        |
| 7.3.1. Для создания прототипа используйте <code>std::memory_order_seq_cst</code> .....           | 298        |
| 7.3.2. Воспользуйтесь схемой утилизации памяти, свободной от блокировок .....                    | 299        |
| 7.3.3. Остерегайтесь проблемы ABA .....                                                          | 299        |
| 7.3.4. Выявляйте циклы активного ожидания и организуйте помощь другому потоку .....              | 300        |
| Резюме .....                                                                                     | 301        |
| <b>Глава 8. Разработка конкурентного кода .....</b>                                              | <b>302</b> |
| 8.1. Способы распределения работы между потоками .....                                           | 303        |
| 8.1.1. Распределение данных между потоками до начала обработки .....                             | 304        |
| 8.1.2. Рекурсивное распределение данных .....                                                    | 305        |
| 8.1.3. Распределение работы по типам задач .....                                                 | 309        |
| 8.2. Факторы, влияющие на производительность конкурентного кода .....                            | 312        |
| 8.2.1. А сколько у нас процессоров? .....                                                        | 313        |
| 8.2.2. Конкуренция при обращении к данным и перебрасывание данных в кэш-памяти процессоров ..... | 314        |
| 8.2.3. Ложное совместное использование памяти .....                                              | 317        |
| 8.2.4. Насколько близко расположены по отношению друг к другу ваши данные? .....                 | 318        |
| 8.2.5. Переоценка вычислительных возможностей и чрезмерное количество переключений задач .....   | 319        |
| 8.3. Разработка структур данных для высокопроизводительных многопоточных приложений .....        | 320        |
| 8.3.1. Распределение элементов массива для сложных операций .....                                | 320        |
| 8.3.2. Схемы доступа к данным в других структурах данных .....                                   | 322        |
| 8.4. Дополнительные факторы, учитываемые при разработке конкурентных программ .....              | 324        |
| 8.4.1. Безопасность исключений в параллельных алгоритмах .....                                   | 325        |
| 8.4.2. Масштабируемость и закон Амдала .....                                                     | 332        |
| 8.4.3. Компенсация потерь на ожидание за счет применения нескольких потоков .....                | 333        |
| 8.4.4. Повышение отзывчивости за счет конкурентности .....                                       | 334        |

|                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.5. Разработка конкурентного кода на практике .....                                    | 336 |
| 8.5.1. Параллельная реализация <code>std::for_each</code> .....                         | 337 |
| 8.5.2. Параллельная реализация <code>std::find</code> .....                             | 339 |
| 8.5.3. Параллельная реализация <code>std::partial_sum</code> .....                      | 345 |
| Резюме .....                                                                            | 354 |
| <b>Глава 9. Усовершенствованное управление потоками</b> .....                           | 355 |
| 9.1. Пулы потоков .....                                                                 | 356 |
| 9.1.1. Простейший пул потоков .....                                                     | 356 |
| 9.1.2. Ожидание завершения задач, переданных пулу потоков .....                         | 358 |
| 9.1.3. Задачи, ожидающие завершения других задач .....                                  | 362 |
| 9.1.4. Предотвращение конкуренции при обращении к очереди работ .....                   | 365 |
| 9.1.5. Перехват работы .....                                                            | 367 |
| 9.2. Прерывание потоков .....                                                           | 371 |
| 9.2.1. Запуск и прерывание другого потока .....                                         | 371 |
| 9.2.2. Обнаружение того, что поток был прерван .....                                    | 373 |
| 9.2.3. Прерывание ожидания на условной переменной .....                                 | 374 |
| 9.2.4. Прерывание ожидания на <code>std::condition_variable_any</code> .....            | 377 |
| 9.2.5. Прерывание других блокирующих вызовов .....                                      | 379 |
| 9.2.6. Обработка прерываний .....                                                       | 380 |
| 9.2.7. Прерывание фоновых задач при выходе из приложения .....                          | 381 |
| Резюме .....                                                                            | 382 |
| <b>Глава 10. Алгоритмы параллельных вычислений</b> .....                                | 383 |
| 10.1. Перевод стандартных библиотечных алгоритмов в режим параллельных вычислений ..... | 383 |
| 10.2. Политики выполнения .....                                                         | 384 |
| 10.2.1. Общие последствия от задания политики выполнения .....                          | 385 |
| 10.2.2. <code>std::execution::sequenced_policy</code> .....                             | 386 |
| 10.2.3. <code>std::execution::parallel_policy</code> .....                              | 387 |
| 10.2.4. <code>std::execution::parallel_unsequenced_policy</code> .....                  | 388 |
| 10.3. Параллельные алгоритмы из стандартной библиотеки C++ .....                        | 388 |
| 10.3.1. Примеры использования параллельных алгоритмов .....                             | 391 |
| 10.3.2. Подсчет посещений .....                                                         | 393 |
| Резюме .....                                                                            | 395 |
| <b>Глава 11. Тестирование и отладка многопоточных приложений</b> .....                  | 396 |
| 11.1. Типы ошибок, связанных с конкурентностью .....                                    | 397 |
| 11.1.1. Нежелательная блокировка .....                                                  | 397 |
| 11.1.2. Состояния гонки .....                                                           | 398 |

|                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 11.2. Приемы обнаружения ошибок, связанных с конкурентностью .....                   | 399 |
| 11.2.1. Просмотр кода с целью поиска возможных ошибок .....                          | 400 |
| 11.2.2. Обнаружение ошибок, связанных с конкурентностью,<br>путем тестирования ..... | 402 |
| 11.2.3. Разработка кода с прицелом на удобство тестирования .....                    | 404 |
| 11.2.4. Приемы тестирования многопоточного кода .....                                | 406 |
| 11.2.5. Структурирование многопоточного тестового кода .....                         | 408 |
| 11.2.6. Тестирование производительности многопоточного кода .....                    | 411 |
| Резюме .....                                                                         | 412 |

## Приложения

|                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Приложение А.</b> Краткий справочник по некоторым функциям языка C++11 .....                     | 414 |
| А.1. Ссылки на r-значения .....                                                                     | 414 |
| А.1.1. Семантика перемещений .....                                                                  | 415 |
| А.1.2. Ссылки на r-значения и шаблоны функций .....                                                 | 418 |
| А.2. Удаленные функции .....                                                                        | 419 |
| А.3. Функции по умолчанию .....                                                                     | 420 |
| А.4. constexpr-функции .....                                                                        | 424 |
| А.4.1. constexpr и типы, определенные пользователем .....                                           | 425 |
| А.4.2. constexpr-объекты .....                                                                      | 428 |
| А.4.3. Требования к constexpr-функциям .....                                                        | 428 |
| А.4.4. constexpr и шаблоны .....                                                                    | 430 |
| А.5. Лямбда-функции .....                                                                           | 430 |
| А.5.1. Лямбда-функции, ссылающиеся на локальные переменные .....                                    | 432 |
| А.6. Вариативные шаблоны .....                                                                      | 436 |
| А.6.1. Расширение пакета параметров .....                                                           | 437 |
| А.7. Автоматическое выведение типа переменной .....                                                 | 440 |
| А.8. Локальные переменные потока .....                                                              | 441 |
| А.9. Выведение аргументов шаблона класса .....                                                      | 442 |
| Резюме .....                                                                                        | 443 |
| <b>Приложение Б.</b> Краткое сравнение библиотек для написания конкурентных программ .....          | 444 |
| <b>Приложение В.</b> Среда передачи сообщений и полный пример программы управления банкоматом ..... | 446 |
| <b>Приложение Г.</b> Справочник по C++ Thread Library .....                                         | 463 |
| Г.1. Заголовок <chrono> .....                                                                       | 463 |
| Г.1.1. Шаблон класса std::chrono::duration .....                                                    | 464 |
| Г.1.2. Шаблон класса std::chrono::time_point .....                                                  | 474 |

|                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| Г.1.3. Класс <code>std::chrono::system_clock</code> .....                   | 477 |
| Г.1.4. Класс <code>std::chrono::steady_clock</code> .....                   | 479 |
| Г.1.5. Псевдоним типа <code>std::chrono::high_resolution_clock</code> ..... | 481 |
| Г.2. Заголовок <code>&lt;condition_variable&gt;</code> .....                | 481 |
| Г.2.1. Класс <code>std::condition_variable</code> .....                     | 481 |
| Г.2.2. Класс <code>std::condition_variable_any</code> .....                 | 490 |
| Г.3. Заголовок <code>&lt;atomic&gt;</code> .....                            | 499 |
| Г.3.1. Псевдонимы типа <code>std::atomic_xxx</code> .....                   | 501 |
| Г.3.2. Макросы <code>ATOMIC_xxx_LOCK_FREE</code> .....                      | 501 |
| Г.3.3. Макрос <code>ATOMIC_VAR_INIT</code> .....                            | 502 |
| Г.3.4. Перечисление <code>std::memory_order</code> .....                    | 502 |
| Г.3.5. Функция <code>std::atomic_thread_fence</code> .....                  | 503 |
| Г.3.6. Функция <code>std::atomic_signal_fence</code> .....                  | 504 |
| Г.3.7. Класс <code>std::atomic_flag</code> .....                            | 504 |
| Г.3.8. Шаблон класса <code>std::atomic</code> .....                         | 508 |
| Г.3.9. Специализации шаблона <code>std::atomic</code> .....                 | 520 |
| Г.3.10. Специализации <code>std::atomic&lt;integral-type&gt;</code> .....   | 521 |
| Г.4. Заголовок <code>&lt;future&gt;</code> .....                            | 539 |
| Г.4.1. Шаблон класса <code>std::future</code> .....                         | 540 |
| Г.4.2. Шаблон класса <code>std::shared_future</code> .....                  | 546 |
| Г.4.3. Шаблон класса <code>std::packaged_task</code> .....                  | 552 |
| Г.4.4. Шаблон класса <code>std::promise</code> .....                        | 558 |
| Г.4.5. Шаблон функции <code>std::async</code> .....                         | 565 |
| Г.5. Заголовок <code>&lt;mutex&gt;</code> .....                             | 566 |
| Г.5.1. Класс <code>std::mutex</code> .....                                  | 567 |
| Г.5.2. Класс <code>std::recursive_mutex</code> .....                        | 570 |
| Г.5.3. Класс <code>std::timed_mutex</code> .....                            | 572 |
| Г.5.4. Класс <code>std::recursive_timed_mutex</code> .....                  | 577 |
| Г.5.5. Класс <code>std::shared_mutex</code> .....                           | 582 |
| Г.5.6. Класс <code>std::shared_timed_mutex</code> .....                     | 586 |
| Г.5.7. Шаблон класса <code>std::lock_guard</code> .....                     | 594 |
| Г.5.8. Шаблон класса <code>std::scoped_lock</code> .....                    | 596 |
| Г.5.9. Шаблон класса <code>std::unique_lock</code> .....                    | 598 |
| Г.5.10. Шаблон класса <code>std::shared_lock</code> .....                   | 608 |
| Г.5.11. Шаблон функции <code>std::lock</code> .....                         | 619 |
| Г.5.12. Шаблон функции <code>std::try_lock</code> .....                     | 620 |
| Г.5.13. Класс <code>std::once_flag</code> .....                             | 621 |
| Г.5.14. Шаблон функции <code>std::call_once</code> .....                    | 621 |

|                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------|-----|
| Г.6. Заголовок <code>&lt;ratio&gt;</code> .....                   | 622 |
| Г.6.1. Шаблон класса <code>std::ratio</code> .....                | 623 |
| Г.6.2. Псевдоним шаблона <code>std::ratio_add</code> .....        | 624 |
| Г.6.3. Псевдоним шаблона <code>std::ratio_subtract</code> .....   | 624 |
| Г.6.4. Псевдоним шаблона <code>std::ratio_multiply</code> .....   | 625 |
| Г.6.5. Псевдоним шаблона <code>std::ratio_divide</code> .....     | 626 |
| Г.6.6. Шаблон класса <code>std::ratio_equal</code> .....          | 626 |
| Г.6.7. Шаблон класса <code>std::ratio_not_equal</code> .....      | 627 |
| Г.6.8. Шаблон класса <code>std::ratio_less</code> .....           | 627 |
| Г.6.9. Шаблон класса <code>std::ratio_greater</code> .....        | 628 |
| Г.6.10. Шаблон класса <code>std::ratio_less_equal</code> .....    | 628 |
| Г.6.11. Шаблон класса <code>std::ratio_greater_equal</code> ..... | 628 |
| Г.7. Заголовок <code>&lt;thread&gt;</code> .....                  | 628 |
| Г.7.1. Класс <code>std::thread</code> .....                       | 629 |
| Г.7.2. Пространство имен <code>this_thread</code> .....           | 639 |

## 4.2.2. Связывание задачи с фьючерсом

Шаблон класса `std::packaged_task<>` привязывает фьючерс к функции или вызываемому объекту. Когда вызывается объект `std::packaged_task<>`, он вызывает связанную функцию или объект и приводит фьючерс в состояние *готовности* с возвращаемым значением, сохраненным в качестве связанных данных. Этим можно воспользоваться как строительным блоком для пула потоков (см. главу 9) или других схем управления задачами, например для запуска каждой задачи в собственном потоке или последовательного запуска всех задач в специально выделенном потоке, работающем в фоновом режиме. Если крупную операцию возможно разбить на автономные подзадачи, каждую из подзадач можно заключить в экземпляр `std::packaged_task<>`, который затем будет передан диспетчеру задач или пулу потоков. Тем самым удастся абстрагироваться от подробностей задач — диспетчер имеет дело только с экземплярами `std::packaged_task<>`, а не с отдельно взятыми функциями.

Параметром шаблона для шаблона класса `std::packaged_task<>` является сигнатура функции, например `void()` для функции, не получающей параметры и не имеющей возвращаемых значений, или `int(std::string&, double*)` для функции, получающей не-const-ссылку на `std::string` и указатель на `double` и возвращающей значение типа `int`. При создании экземпляра `std::packaged_task` ему следует передать функцию или вызываемый объект, принимающий указанные параметры, а затем возвращающий тип, который можно преобразовать в указанный тип возвращаемого значения. Точного совпадения типов не требуется, можно сконструировать объект `std::packaged_task<double(double)>` из функции, принимающей значение типа `int` и возвращающей значение типа `float`, поскольку типы способны проходить подразумеваемое преобразование.

Тип возвращаемого значения, указанный в сигнатуре функции, определяет тип объекта `std::future<>`, возвращаемого из компонентной функции `get_future()`, а заданный в сигнатуре список аргументов используется для определения сигнатуры оператора вызова в классе упакованной задачи. Например, в листинге 4.8 приведено частичное определение класса для `std::packaged_task<std::string(std::vector<char>*, int)>`.

**Листинг 4.8.** Частичное определение класса для специализации `std::packaged_task<>`

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

Объект `std::packaged_task` является вызываемым, значит, его можно обернуть объектом `std::function`, передать `std::thread` в качестве функции потока, передать другой функции, требующей вызываемого объекта, или даже вызвать напрямую.

Когда `std::packaged_task` вызывается в качестве функционального объекта, аргументы, предоставленные оператору вызова функции, передаются содержащейся в этом объекте функции, а возвращаемое значение сохраняется в качестве асинхронного результата в объекте `std::future`, полученном от `get_future()`.

Таким образом, задачу можно заключить в объект `std::packaged_task` и извлечь фьючерс перед передачей объекта `std::packaged_task` в то место, где он надлежащим образом будет вызван. Когда понадобится результат, можно будет дождаться готовности фьючерса. Практическое применение рассмотренного алгоритма показано в следующем примере.

## Передача задач между потоками

Многие среды графических пользовательских интерфейсов (GUI) требуют, чтобы обновления GUI выполнялись из строго определенных потоков, поэтому, если какому-то потоку требуется обновить GUI, он должен отправить сообщение потоку, определенному для выполнения таких обновлений. В листинге 4.9 показано, что один из способов решения данной задачи, не требующий специальных сообщений для каких-либо действий, связанных с GUI-интерфейсом, обеспечивается шаблоном `std::packaged_task`.

**Листинг 4.9.** Запуск кода в GUI-потоке с помощью `std::packaged_task`

```
#include <deque>
#include <mutex>
#include <future>
#include <thread>
#include <utility>
std::mutex m;
std::deque<std::packaged_task<void()>> > tasks;
bool gui_shutdown_message_received();
void get_and_process_gui_message();
void gui_thread() ← ❶
{
    while(!gui_shutdown_message_received()) ← ❷
    {
        get_and_process_gui_message(); ← ❸
        std::packaged_task<void()> task;
        {
            std::lock_guard<std::mutex> lk(m);
            if(tasks.empty()) ← ❹
                continue;
            task=std::move(tasks.front()); ← ❺
            tasks.pop_front();
        }
        task(); ← ❻
    }
}
std::thread gui_bg_thread(gui_thread);
template<typename Func>
std::future<void> post_task_for_gui_thread(Func f)
```

```

{
    std::packaged_task<void()> task(f); ← 7
    std::future<void> res=task.get_future(); ← 8
    std::lock_guard<std::mutex> lk(m);
    tasks.push_back(std::move(task)); ← 9
    return res; ← 10
}

```

Код не отличается особой сложностью: поток GUI ❶ выполняет цикл, пока не будет получено сообщение, предписывающее GUI прекратить работу ❷, многократно проводя опрос на наличие GUI-сообщений на обработку ❸, например, щелчков кнопкой мыши, и на наличие задач в очереди. Если в очереди нет задач ❹, цикл повторяется, в противном случае задача извлекается из очереди ❺, с очереди снимается блокировка, после чего запускается задача ❻. Когда задача будет выполнена, фьючерс, связанный с ней, перейдет в состояние готовности.

Так же просто происходит и помещение задачи в очередь: предоставленная функция создает новую упакованную задачу 7, вызовом компонентной функции `get_future()` из этой задачи получается фьючерс 8 и задача помещается в список 9 перед тем, как фьючерс возвращается вызывающему коду 10. Затем код, отправивший сообщение потоку GUI, может ожидать фьючерс, если ему требуется узнать о завершении задачи, или же проигнорировать фьючерс, если эта информация не нужна.

В данном примере для задач используется экземпляр класса `std::packaged_task<void()>`, в который заключается функция или другой вызываемый объект, не принимающий параметров и возвращающий значение `void` (если он возвращает что-то иное, это значение игнорируется). Это самая простая из возможных задач, но из ранее увиденного легко сделать вывод, что `std::packaged_task` применяется и в более сложных ситуациях — указав в качестве параметра шаблона другую сигнатуру функции, можно изменить тип возвращаемого значения (и, стало быть, тип данных, хранящихся в состоянии, связанном с фьючерсом), а также типы аргументов в операторе вызова функции. Этот пример легко можно распространить на задачи, предназначенные для запуска в потоке GUI, чтобы получить аргументы и вернуть значение в `std::future`, а не просто воспользоваться им в качестве индикатора завершения задачи.

А как быть с такими задачами, которые нельзя выразить в виде простого вызова функции, или с теми, где результат может приходить из более чем одного места? В таких случаях приходится обращаться к третьему способу создания фьючерса — к использованию `std::promise` для явного задания значения.

### 4.2.3. Создание промисов `std::promise`

Когда есть приложение, нуждающееся в обработке большого количества сетевых подключений, оно зачастую пытается обработать каждое подключение в отдельном потоке, так как это позволяет легче воспринимать сетевое подключение и упрощает программирование. При небольшом количестве подключений и, соответственно,

небольшом количестве потоков проблем не возникает. К сожалению, по мере роста числа подключений такой подход утрачивает привлекательность: большое количество потоков потребляет немалый объем ресурсов операционной системы и потенциально становится причиной множества переключений контекста (когда количество потоков превышает доступный объем ресурсов оборудования для конкурентности), что ухудшает производительность. В экстремальных случаях операционная система может исчерпать свои ресурсы по запуску новых потоков до того, как будут растрачены ее объемы для сетевых подключений. Поэтому в приложениях с большим количеством сетевых подключений для их обработки принято обходиться небольшим количеством потоков (возможно, только одним потоком), каждый из которых имеет дело с несколькими подключениями.

Рассмотрим один из таких потоков, обрабатывающих подключения. Пакеты данных будут поступать из разных подключений и обрабатываться, по сути, в произвольном порядке, и точно так же в произвольном порядке пакеты данных будут помещаться в очередь на отправку. Во многих случаях другим частям приложения придется ждать либо успешной отправки данных, либо успешного получения новых пакетов данных через конкретные сетевые подключения.

Шаблон `std::promise<T>` позволяет устанавливать значение (типа `T`), которое позже можно прочитать через связанный объект `std::future<T>`. Один из возможных механизмов такого рода будет реализован парой `std::promise` — `std::future`, ожидающий поток может заблокироваться на фьючерсе, а поток, предоставляющий данные, — воспользоваться другой половиной пары, промисом (`promise`, иногда называют обещанием), для установки связанного значения и приведения фьючерса в состояние готовности.

Получить объект фьючерса `std::future`, связанный с заданным промисом `std::promise`, можно вызовом компонентной функции `get_future()`, как это было с `std::packaged_task`. Когда значение промиса установлено (с помощью компонентной функции `set_value()`), фьючерс приводится в состояние готовности и может использоваться для извлечения сохраненного значения. Если объект `std::promise` уничтожить без установки значения, вместо него будет сохранено исключение. Передача исключений между потоками рассматривается в подразделе 4.2.4.

В листинге 4.10 показан пример кода для потока, обрабатывающего подключения в соответствии с приведенным ранее описанием. В данном примере пара `std::promise<bool>` — `std::future<bool>` используется для идентификации успешной передачи блока исходящих данных: значение, связанное с фьючерсом, представляет собой простой флаг успеха/сбоя. Для входящих пакетов данными, связанными с фьючерсом, становится полезная нагрузка пакета.

**Листинг 4.10.** Обработка с помощью промисов сразу нескольких подключений в одном потоке

```
#include <future>
void process_connections(connection_set& connections)
{
    while(!done(connections)) ← ❶
    {
        for(connection_iterator ← ❷
```

```

        connection=connections.begin(),end=connections.end());
connection!=end;
++connection)
{
    if(connection->has_incoming_data()) ←❸
    {
        data_packet data=connection->incoming();
        std::promise<payload_type>& p=
            connection->get_promise(data.id); ←❹
        p.set_value(data.payload);
    }
    if(connection->has_outgoing_data()) ←❺
    {
        outgoing_packet data=
            connection->top_of_outgoing_queue();
        connection->send(data.payload);
        data.promise.set_value(true); ←❻
    }
}
}
}
}

```

Функция `process_connections()` выполняет цикл, пока функция `done()` не возвратит значение `true` ❶. При каждом проходе цикла поочередно проверяется каждое подключения ❷, извлекаются входящие данные, если они есть ❸, или отправляются любые стоящие в очереди исходящие данные ❺. Предполагается, что у пакета входящих данных есть идентификатор, а у него — полезная нагрузка. Идентификатор отображается на объект `std::promise` (возможно, поиском в ассоциативном контейнере) ❹, а в качестве значения устанавливается информационная нагрузка пакета. Исходящий пакет извлекается из очереди исходящих данных и отправляется по подключению в сеть. Когда отправка завершится, промис, связанный с исходящими данными, устанавливается равным `true`, что говорит об успешной передаче ❻. Насколько хорошо все это будет перенесено на сетевой протокол, зависит от самого протокола: такой стиль структуры «промис — фьючерс» для конкретного сценария может и не сработать, хотя данная структура похожа на структуру поддержки асинхронного ввода-вывода некоторых операционных систем.

В приводимом до сих пор коде проигнорированы возможности выдачи исключений. Приятно, конечно, представлять себе мир, в котором все всегда работает идеально, но так не бывает. Иногда возникает дефицит дискового пространства, или еще нет искомых данных, или сбоят сеть, или пропадает доступ к базе данных. Если бы операция выполнялась в том потоке, которому нужен результат, код мог бы просто отпарковать об ошибке путем выдачи исключения, но было бы неразумно ограничиваться требованием, чтобы все шло как надо, только потому, что возникла потребность использовать `std::packaged_task` или `std::promise`. Поэтому стандартная библиотека C++ задает четкий путь решения проблем с выдачей исключений при таком сценарии развития событий, позволяя сохранять эти исключения в качестве части связанного результата.