

АНАТОМИЯ ПРОЕКТА СОЗДАНИЯ ПЕРВОГО ОБРАЗЦА ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ

Роберт Харни, Джеральд Браун, Мэтью Карлайл, Эрик Скروح, и Кевин Вуд

Мы описываем промышленный проект, который может осуществить «распространитель» для изготовления первой небольшой партии ядерного оружия. Мы выделяем работы проекта и их взаимодействие, от рафинирования урановой руды до окончательной сборки оружия. Распространитель может выбрать альтернативные технологии производства, которые предоставляют более быстрое завершение, но по более высокой цене, при условии ограниченных ресурсов. Распространитель может также ускорить проект, выделяя больше ресурсов на критические этапы. Из физики и химии мы определяем требования к сырьевым материалам. Из промышленного проектирования и материаловедения мы преобразуем эти требования в оценки времени, трудозатрат, и средств, необходимых для выполнения каждой работы в нормальных и экстренных условиях. Используя обобщенные средства анализа управления проектом, мы затем оцениваем минимально возможное время завершения проекта, предполагая два различных уровня доступности ресурсов. Мы также оцениваем время, необходимое для создания оружия в том случае, когда некоторые из этапов проекта могут быть пропущены; например, когда распространителю удастся украсть высокообогащенный металлический уран.

Статья получена 30 января 2006 г. и принята к публикации 15 марта 2006 г.

Роберт Харни работает ассистентом факультета системотехники Школы усовершенствования специалистов ВМФ, Монтерей, штат Калифорния, США; Джеральд Браун, Мэтью Карлайл, Эрик Скروح, и Кевин Вуд работают на факультете исследований операций того же учреждения.

За поддержку продолжающихся исследований авторы благодарят Управление научных исследований ВВС США и Управление исследований ВМФ США.

Посылать корреспонденцию по адресу: Robert C. Harney, Associate Professor, Department of Systems Engineering, Naval Postgraduate School, Monterey, CA 93943, USA.

Адрес электронной почты: harney@nps.edu

ВВЕДЕНИЕ

В этой статье документированы компоненты работ большого промышленного проекта, который должен завершить «распространитель», или который ему потребуется завершить для того, чтобы изготовить «первый ядерный боеприпас». В этой последней фразе мы подразумеваем первую небольшую партию ядерных боеприпасов грубой конструкции. Мы совмещаем подробности из физики, химии, промышленного проектирования, и материаловедения, для того, чтобы создать обобщенную сетевую модель критических путей проекта¹. Мы также получим оценки требований по сырьевым материалам, трудозатратам, энергии, и времени, для завершения работ в нормальных или экстренных условиях. Затем мы, исходя из этой информации и модели, покажем, как оценить самое раннее возможное время завершения такого проекта при различных предполагаемых уровнях ресурсов. Расширенная модель в последующей статье² показывает, как можно задержать общее выполнение проекта, нарушая выполнение определенных работ, например, вводя эмбарго на ключевые материалы. Данная статья должна предоставить политикам надежный качественный базис для вы-

¹ Глава 1 этой книги представляет хороший обзор этой темы: J. J. Moder, C.R. Phillips, and E. W. Davis, *Project Management with CPM, PERT and Precedence Diagramming*, 3rd ed. (Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York, 1983).

² G. Brown, M. Carlyle, R. Harney, E. Skroch, and K. Wood, 2006. "Interdicting a nuclear weapons project," Technical Report NPS-OR-06-003, Naval Postgraduate School, Monterey, CA.

работки технологически ориентированной политики в отношении нераспространения³.

Подробности программы ядерного оружия распространителя зависят от слишком многих факторов, чтобы можно было рассмотреть их в одной статье, так что мы в этом учебном примере сделаем следующие упрощающие предположения: а) программа является тайной; б) распространитель уже производит уран из руды для использования в гражданских реакторах или для продажи другим; в) он будет добываться простого оружия на делении; и г) он подписал договор о нераспространении (ДНЯО).

Программа ядерного оружия сложна, но основы проектирования ядерного оружия сейчас хорошо известны и доступны из открытой литературы⁴. Основным препятствием на пути распространителя к созданию ядерного оружия является не теоретическая физика, а получение урана или плутония оружейного качества. Но (а) ни уран, ни плутоний не доступны на открытом рынке, (б) инспекции по ДНЯО предотвращают переработку отработавшего ядерного топлива в плутоний оружейного качества, и (в) мы можем поначалу предположить, что украденные материалы не доступны. Следовательно, ключом к тайному созданию ядерного оружия будет разработка распространителем органической промышленной инфраструктуры для изготовления урана и (или) плутония оружейного качества. Оружие на основе плутония потребует тайного строительства ядерного реактора, и плутонием трудно обращаться, так что разумно предположить, что распространитель выберет более простое оружие на основе урана. Сырьевым материалом будет оксид урана из урановой руды, отведенный из гражданского производства (в этом контексте смотрите работу Спирса⁵, в которой прослеживается жизненный цикл ядерных материалов от сырой руды до утилизации отходов).

Техническая закись-окись урана (желтый кек) может быть отведена из гражданского применения даже тогда, когда распространитель не поддерживает ядерный топливный цикл. Например, будет достаточно контролировать урановый рудник, поскольку желтый кек может быть отведен с горно-перерабатывающих предприятий вблизи такого рудника. У более, чем 30 стран имеются подтвержденные запасы урана, и, очевидно, у многих имеются месторождения урановой руды, которые еще не были открыты, или, по крайней мере, о которых еще не сообщалось. Оксид урана может быть извлечен также из определенных руд, которые продаются на международном рынке из-за содержания в них скандия, ванадия, или других металлов. Это представляет другие возможности для получения желтого кека, или его замены, без поддерживания ядерного топливного цикла.

Распространителю потребуется потратить значительные материальные, трудовые, и технические ресурсы во всех частях его проекта ядерного оружия, от строительства производственной инфраструктуры для производства металлического урана, до приобретения средств доставки оружия, например, баллистических ракет. Управление таким сложным и дорогим проектом является затруднительным, если не использовать некоторый протокол управления проектом, в особенности, если проект остается тайным. С конца 1950-х г.г. правительство и промышленность широко использует методы исследования операций в планировании и координации сложных проектов. В частности, базовые методы ПЕРТ и критических путей с течением времени были расширены до такой степени, чтобы управлять сложностями, возникающими в проектах реального мира⁶.

³ Мы нашли много книг, статей, и докладов, которые продвигают политику нераспространения, основанную на технологии, но, как правило, анализ этой технологии ограничен. Например, смотрите: G. Perkovich, J. T. Mathews, J. Cirincione, R. Gottemoeller, and J. Wolfsthal, *Universal Compliance: A Strategy for Nuclear Security* (Carnegie Endowment for International Peace, 2005), J. Spector, "Strategic Planning for U.S. Nonproliferation Initiatives in Russia," in Occasional Paper No. 6, *WMD Threats 2001: Critical Choices for the Bush Administration*, M. Marletta, ed. (Monterey Institute of International Studies, 2001) 38-40; Counterproliferation Program Review Committee, 1997. "Report on Activities and Programs for Countering Proliferation and NBC Terrorism," Report Number A468823, U.S. Congress, Washington, DC, May.

⁴ На самом деле многие подробности ранних оружейных программ в Соединенных Штатах и других странах были рассекречены и появились в открытой литературе; смотрите U.S. Department of Energy, Office of Declassification, 2001. "Restricted Data Declassification Decisions 1946 to the Present," (RDD-7), January 1, 2001.

⁵ D. Spears, ed., "Technology R&D for arms control," *Arms Control and Nonproliferation Technologies* (Lawrence Livermore National Laboratory, Spring 2001).

⁶ D. G. Malcolm, J. H. Roseboom, C. E. Clark, and W. Fazar, "Application of a technique for research and development program evaluation," *Operations Research*, 7 (1959): 646-669.

Модер, Филлипс, и Дэвис определяют *проект* как «набор работ или видов деятельности, относящихся к достижению некоторой запланированной цели, обычно там, где цель является уникальной или не повторяющейся»⁷. Программа распространителя по разработке первого ядерного оружия хорошо согласуется с этим определением. Мы поэтому можем обоснованно ожидать от него использования стандартных средств управления проектами, такими, как «Microsoft Project», для эффективного планирования, организации, и построения плана графика работ⁸. В любом случае, мы будем использовать эти средства для оценки времени завершения проекта, и если распространитель выберет действия не с полной оптимальностью, не используя таких средств, то результирующие оценки все равно будут достаточно консервативными для наших целей. Следовательно, для завершения проекта может потребоваться больше времени, чем следует из наших оценок.

Модели управления проектами универсально представляются сетевыми графиками. В стандартной для настоящего времени версии сетевого графика проекта «*деятельность на узле*» узлы представляют важные задачи, которые должны быть выполнены для окончания проекта, в то время как дуги представляют отношения предшествования между задачами. В основной модели узел *i*-ой задачи соединен с узлом *j*-ой задачи направленной дугой (*i, j*), если *i*-ая задача должна быть закончена до того, как начнется *j*-ая задача. Каждому *i*-ому узлу приписывается «длина», которая представляет номинальную продолжительность *i*-ой задачи, дуги имеют нулевую длину. Общая продолжительность проекта, от искусственной «начальной задачи» до искусственной «конечной задачи», равна общей длине самого длинного направленного пути в сети, называемого также *критическим путем*.

Мы должны обобщить базовую модель проекта следующим образом:

1. Завершение любой задачи за «нормальный» промежуток времени потребляет фиксированное количество одного, или более, ресурсов, поставка которых ограничена⁹. В частности, мы моделируем потребление энергии, сырьевых материалов, и трех видов рабочей силы, и, через них, расход денежных средств.
2. Продолжительность отдельной работы может быть сокращена посредством выделения дополнительных количеств требуемых ресурсов^{10,11}. Мы предполагаем следующее отношение между количеством каждого предоставленного и продолжительностью работы: большее количество ресурсов ускоряет прогресс. однако, каждая работа требует для завершения некоторого минимального количества времени, ниже которого дополнительные ресурсы уже не будут оказывать влияния.
3. Когда одна, или более, работ будут ускорены для минимизации времени завершения проекта, проект также будет называться «ускоренным». Ускорение ограничено доступностью ресурсов, включая финансовый бюджет.
4. Стандартные отношения предшествования от финиша к старту (FS) между парами работ обобщаются включением отношений от старта к старту (SS), старта к финишу (SF), и финиша к финишу (FF). С учетом этого обобщения будет легко приспособлять времена задержки или опережения между парами работ¹².
5. Определенные ключевые события, наиболее важным из которых является накопление адекватных запасов высокообогащенного металлического урана (BOU), могут быть достигнуты альтернативными способами действий. Когда выбирается одна такая альтернатива, то работы по другой альтернативе можно будет не завершать. Альтернативные

⁷ Ссылка [1], 3.

⁸ Microsoft Corporation, 2004. "Microsoft Office." <http://office.microsoft.com/home/office.aspx?assetid=FX01085795>, 10 February, 2004.

⁹ Ссылка [6].

¹⁰ Смотрите эту статью и приведенные в ней ссылки: J. E. Kelley, Jr., "Critical path planning and scheduling: Mathematical basis," *Operations Research*, 9 (1961): 296–320.

¹¹ A. Charnes and W. W. Cooper, "A network interpretation and a directed subdual algorithm for critical path scheduling," *Journal of Industrial Engineering*, 13 (1961): 213–218.

¹² Ранние работы по сетевым проектам требовали, чтобы «работа-преемник» не начиналась до тех пор, пока не будут завершены все «работы-предшественники», см., например, ссылку [6]. Этот подход был впоследствии обобщен в модели «диаграмм предшествования», которая позволяет любые комбинации попарного частичного порядка, между началом и окончанием «работы-предшественника» и «работы-преемника»; см., например, ссылку [1], глава 4.

способы действия расходятся в узлах принятия решений¹³; см. рис. 1. В нашем учебном примере в узле принятия решения выбирается одна из трех технологий обогащения урана.

В пределах своих ресурсов распространитель будет стремиться минимизировать время завершения своего оружейного проекта, которое достигается при ускорении проекта ускорением критических работ (т.е. работ на «критическом пути») и работ, которые становятся критическими по мере того, как будут сокращаться продолжительности других работ.

ПРЕДПОЛОЖЕНИЯ

Учитывая то, что цель распространителя состоит в том, чтобы как можно быстрее сделать первое оружие, мы предположим, что он будет использовать конструкцию оружия деления ствольного типа, аналогичную той, которая использовалась в бомбе «Малыш», сброшенной на Хиросиму. Эта конструкция проста, но надежна: конструкция «Малыша» довольно груба, но конструкторы были настолько уверены в ней, что бомбардировка Хиросимы стала ее первым полномасштабным испытанием¹⁴. Для оружия ствольного типа требуется больше ВОУ, чем для его альтернативы, импловзивного оружия, но последняя конструкция требует заметных и мощных испытаний для обеспечения ее надежности, и кажется вероятным, что тайный распространитель предпочтет избежать таких испытаний.

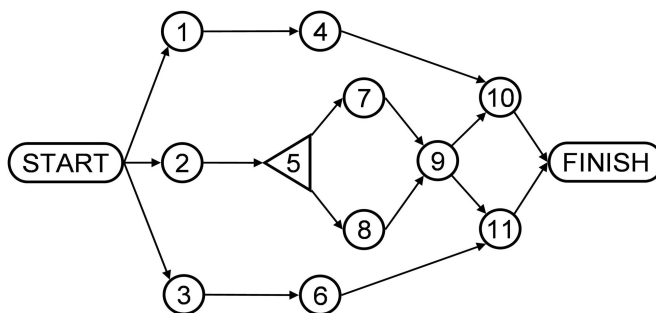


Рис. 1. Сетевой график проекта с «деятельностью на узле» с одним узлом принятия решений. Для завершения проекта необходимо закончить работы, представленные в узлах от 1 до 6, и от 9 до 11. Треугольный узел представляет «задачу принятия решения»¹⁵. После того, как будет завершена работа 5, должна быть закончена либо работа 7, либо работа 8. Дуги представляют соотношения предшествования. Слева указана первая воображаемая задача «СТАРТ», справа – последняя воображаемая задача «ФИНИШ».

«Первое ядерное оружие» на самом деле будет малой серией боеприпасов, максимальной, которая может быть изготовлена без излишнего риска обнаружения. Мы предполагаем изготовление шести боеприпасов в год, для чего, по нашей оценке, потребуется ежегодное поступление 300 кг ВОУ в год. В свою очередь, это потребует поступлений около 120 т технической закиси-окиси урана в год, как это было оценено из химических соображений в Приложениях А и Б.

Основными задачами проекта являются:

1. Скрытое отвлечение 120 т технической закиси-окиси урана в год (эта величина соответствует загрузке одного среднего грузовика в месяц, что, вероятно, пройдет незамеченным, и это является основной причиной для предположения производства по меньшей мере шести боеприпасов в год).
2. Производство исходного материала для завода обогащения (гексафторида урана UF_6) из технической закиси-окиси урана.

¹³ W. Crowston and G. L. Thompson, "Decision CPM: A method for simultaneous planning, scheduling, and control of projects," *Operations Research*, 15 (1967): 407-426.

¹⁴ См., например, R. Rhodes, *The Making of the Atomic Bomb* (Simon & Schuster Inc., New York, 1986) и R. Rhodes, *Dark Sun: The Making of the Hydrogen Bomb* (Simon & Schuster Inc., New York, 1995).

¹⁵ Ссылка [13].

3. Обогащение урана, включающее выбор используемого метода.
4. Преобразование высокообогащенного UF_6 в металлический уран.
5. Проектирование и изготовление реальных боеприпасов.

В приложении В перечислены работы, включенные в наш учебный пример, и график Ганта на рис. 2 показывает небольшую часть полного производственного плана из этого исследования.

Мы оцениваем требования к специальному оборудованию, исходя из химических процессов, описанных в Приложении А. Сетевой график проекта включает приблизительно 200 задач (узлов) и 600 соотношений предшествования (дуг). Распространитель должен управлять пятью ключевыми ресурсами в дополнение к денежным средствам: энергией, материалами, профессиональной рабочей силой (т.е. учеными и инженерами), квалифицированной рабочей силой (например, операторами оборудования), и неквалифицированной рабочей силой.

Если распространитель решит ускорить конкретную работу, то он должен будет потратить больше ресурсов, требуемых для этой работы. Количество потраченного ресурса r при заданной длительности работы T предполагается равным $b_r(1 + (a_r - 1)(T_{nom} - T)/(T_{nom} - T_{min}))$, где T_{nom} – номинальная продолжительность работы, T_{min} – минимальная продолжительность работы, T должно удовлетворять неравенству $T_{min} \leq T \leq T_{nom}$, b_r является номинальным потреблением этого ресурса (т.е. при продолжительности работы, равной T_{nom}), и a_r – это «фактор ускорения», который зависит только от ресурса. Значения T_{nom} и T_{min} , используемые в этом учебном примере, приведены в Приложении В; в табл. 2 перечислены факторы ускорения.

Табл. 1. Эффективность технологий обогащения урана.

Технология	А	Б	В	Г
Газовая диффузия	1,004-1,0045	3500-4000	2500	17120
Газовые центрифуги	1,2-1,5	40-90	100-200	685-1370
Аэродинамическая	1,015-1,03	540-1100	3600-4000	24660-27400

А – фактор разделения; Б – количество ступеней для 90% ВОУ; В – квт·час/ЕРР; Г – киловатт для 60 000 ЕРР в год.

Независимо от используемой технологии, производство ВОУ из природного урана требует многих ступеней оборудования, размещенных в каскаде прогрессивного обогащения. *Фактор разделения* – это отношение относительного обогащения (^{235}U к ^{238}U) концентрированного продукта к обедненным отвалам на выходе каждой отдельной ступени каскада. Количество ступеней, требующихся для производства ВОУ, предполагает, что в окончательных отвалах будет содержаться менее 0,3% ^{235}U . Мера «квт·час/ЕРР» означает энергию в квт·час, требующуюся для производства примерно 5 г ВОУ. В последнем столбце приводится среднее энергопотребление каскада обогащения, производящего примерно 300 кг ВОУ в год.

Источник: U.S. Congress, Office of Technology Assessment (OTA), 1993. "Technologies Underlying Weapons of Mass Destruction," OTA-BP-ISC-115, U.S. Government Printing Office, December, p. 143.

Распространитель может выбрать для реализации одну из любого количества технологий обогащения. В нашем учебном примере ими являются газовые центрифуги, газовая диффузия, и аэродинамическое обогащение. Существуют и другие технологии обогащения, но они дороги, и (или) технически сложны, и поэтому представляются маловероятными кандидатами¹⁶. Однако, нашими методами можно будет смоделировать любую доступную технологию обогащения. В табл. 1 показано, как оценить требуемое количество обогатительных машин и потребление энергии для каждой технологии. Единица разделительной работы (ЕРР) является мерой усилий, требуемых для разделения изотопов ^{235}U и ^{238}U во время обогащения. Производство 1 кг ВОУ требует приблизительно 200 ЕРР, и, следовательно, от 570

¹⁶ M. Benedict, T. H. Pigford, and H.W. Levi, *Nuclear Chemical Engineering*, 2nd ed. (McGraw Hill, Boston, MA, 1985) chapter 14.

до 23 000 киловатт энергии, в зависимости от используемой технологии¹⁷. В Приложении В приводятся данные по учебному примеру, включая номинальные затраты.

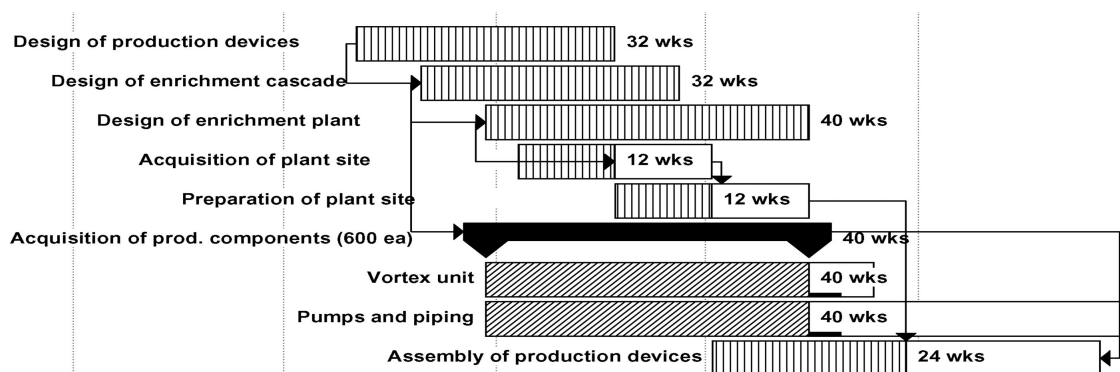


Рис. 2. График Ганта, построенный в программе «Microsoft Project», показывающий 9 из примерно 200 работ в проекте учебного примера. Сплошная горизонтальная полоса для «Приобретения производственных компонентов (600 штук)» указывает на суммарную работу («суммарная работа» - это особенность программы «Microsoft Project», а не фундаментальная компонента стандартного сетевого графика проекта). Эта суммарная работа состоит из двух работ, «Приобретение вихревых блоков» и «Приобретение насосов и трубопроводов». «Передняя» штриховка их соответствующих полос показывает, что они не лежат на критическом пути. Работа «Приобретение площадки для завода» представлена двумя прилегающими полосами. «Задняя штриховка» этой полосы показывает, что эта работа является критической, и ее левая и правая конечные точки представляют планируемые работы, и срочные даты начала и завершения, соответственно. Планируемая продолжительность работы в 12 недель указана справа от этой полосы. Вторая полоса с вертикальной штриховкой сигнализирует о том, что работа была ускорена на величину, пропорциональную длине полосы, которая также равна 12 неделям (номинальная, не срочная продолжительность этой работы равна 24 неделям). Стрелки на рисунке используются для указания отношений предшествования между работами. Например, здесь есть соотношение «SS» (от старта до старта), включающее задержку в 8 недель между «Проектированием промышленных устройств» и «Проектированием каскада обогащения». Ниже в таблице приводятся названия и продолжительности показанных на рисунке работ проекта (сверху вниз).

Проектирование промышленных устройств	32 недели
Проектирование каскада обогащения	32 недели
Проектирование завода обогащения	40 недель
Приобретение площадки для завода	12 недель
Подготовка площадки для завода	12 недель
Приобретение производственных компонентов (600 штук)	40 недель
Вихревые блоки	40 недель
Насосы и трубопроводы	40 недель
Сборка промышленных устройств	24 недели

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Используя количества энергии, материалов, и рабочей силы, приведенные в табл. 3, и бюджет в 190 млн.долл., распространитель использует аэродинамическое обогащение для того, чтобы завершить свой проект за 338 недель (шесть с половиной лет).

Если все доступные ресурсы удвоятся, в том числе и по бюджету в долларах, срочность позволит распространителю завершить проект за 260 недель (почти 5 лет).

¹⁷ Nonproliferation Policy Education Center (NPEC), "Iran: Breaking Out Without Quite Breaking the Rules?" <http://www.npec-web.org/projects/iranswu2.htm>, 30 April 2004.

Табл. 2. Факторы ускорения для пяти немонетарных ресурсов, отслеживаемых в нашем учебном примере.

Ресурс	Фактор ускорения
Энергия	2,0
Профессиональная рабочая сила	1,2
Квалифицированная рабочая сила	1,5
Неквалифицированная рабочая сила	2,0
Материалы	1,2

Каждая величина является мультипликативным фактором для полного потребления ресурса для самого быстрого возможного времени завершения любой работы. Например, если 10 профессиональных сотрудников требуются для того, чтобы завершить работу за ее номинальную продолжительность T_{nom} , то потребуется 12 профессиональных работников ($12 = 1,2 \times 10$), чтобы завершить эту работу за минимально возможное время T_{min} .

Табл. 3. Национальная стоимость и доступность ресурсов в нашем учебном примере. Проект далее ограничен бюджетом в 190 миллионов долларов.

Название	Единицы	Цена единицы	Доступные единицы
Энергия	МВт·час	100	3 100 000
Материалы	тыс. долл.	1 000	190 000
Проф. раб. сила	чел·мес	48 000	10 000
Квалиф. раб. сила	чел·мес	24 000	10 000
Неквалиф. раб. сила	чел·мес	6 000	6 000

Если мы смягчим наше начальное предположение о том, что украденный ВОУ недоступен, и предположим, что распространитель получил 300 кг украденного ВОУ непосредственно от третьей стороны, мы получим сценарий, который рассматривается некоторыми как почти эквивалентный получению доставляемого оружия¹⁸. Наша модель, модифицированная соответствующим образом, и использующая номинальные ресурсы, показывает, что распространителю все еще понадобится 208 недель (4 года) для завершения первой серии из 6 боеприпасов (без собственного источника ВОУ эта серия может оказаться последней, которую сможет изготовить распространитель). Если у распространителя имеется доступ к небогатому гексафториду урана, и он разработал также прототип процесса с газовыми центрифугами (как это сделал Иран), то модель предсказывает, что если распространитель будет придерживаться обогащения в газовых центрифугах, то ему потребуется еще 216 недель для окончания своего первого боеприпаса.

Даже имея 300 кг ВОУ, распространитель может задержаться в выполнении своего проекта из-за ограниченного доступа к некоторым промышленным компонентам. Работа 127 («Приобретение тиглей из окиси гафния») не является критической – мы оцениваем ее запас по времени в 24 недели – но если мы задержим эту работу больше, чем на 24 недели, то в любом случае мы задержим и изготовление боеприпаса. Кроме того, эта работа появляется во всех альтернативных технологиях обогащения, так что распространитель не сможет избежать этой задержки выбором технологий.

Международное агентство по атомной энергии¹⁹ недавно заявило, что более 40 стран не в полной мере выполняют обязательства по ДНЯО, и перечислили несколько стран, которые способны осуществить разработку ядерного оружия, или подозреваются в ее проведении. Эта статья показывает, как одна из этих стран сможет осуществить такую разработку.

¹⁸ См., например, C. D. Ferguson, 2004, "Can Bush or Kerry prevent nuclear terrorism," *Arms Control Today*, 34 (7): 13, 3 pgs.

¹⁹ International Atomic Energy Agency, 2004. Annual Report, <http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep-2003/index.html>, 6 October, 2004.

ПРИЛОЖЕНИЕ А ХИМИЯ ОБОГАЩЕНИЯ УРАНА

Мы исследуем эти химические процессы для того, чтобы выявить установки и оборудование, требующиеся для изготовления высокообогащенного металлического урана из технической закиси-оксида урана. Числа, приведенные под формулами химических реакций, представляют молекулярные веса.

Источник: см., например, M. Benedict, T. Pigford, and H. Levi, 1981. *Nuclear Chemical Engineering*, 2nd ed. (McGraw-Hill, New York), 129–160.

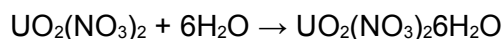
Подготовка исходного материала (от технической закиси-оксида до гексафторида урана)

Резервуар из нержавеющей стали (растворение технической закиси-оксида в азотной кислоте):



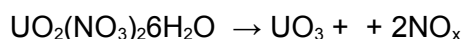
$$842 + 6 \times 63 = 3 \times 394 + 2 \times 18 + 2$$

Кипятильник из нержавеющей стали (выпаривание раствора нитрата):



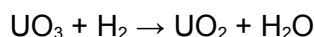
$$394 + 6 \times 18 = 502$$

Высокотемпературный кипятильник из нержавеющей стали (термическое разложение нитрата до трехоксида урана при 300 °C):



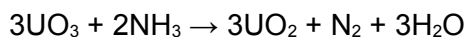
$$502 = 286 + 6 \times 18 + 108$$

Резервуар реактора газовой и твердой фазы (восстановление трехоксида урана до двуоксида урана при 650 °C - 800 °C):



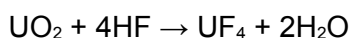
$$286 + 2 = 270 + 18$$

или



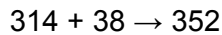
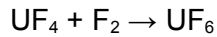
$$3 \times 286 + 2 \times 17 = 3 \times 270 + 28 + 3 \times 18$$

Резервуар реактора из нержавеющей стали (для преобразования двуоксида урана в тетрафторид урана при 300 °C - 500 °C используется фтористый водород):



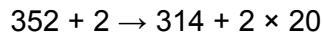
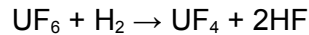
$$270 + 4 \times 20 = 314 + 2 \times 18$$

Резервуар реактора газовой и твердой фазы для сверхвысокой температуры (изготовление газообразного гексафторида урана при 1700 °C - 1800 °C):

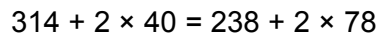
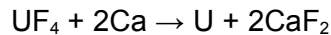


Преобразование гексафторида урана в металлический уран

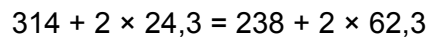
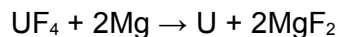
Газофазный реактор с отделением частиц (преобразование гексафторида урана в тетрафторид урана при 375 °С):



Высокотемпературная металлургическая печь (преобразование фторида урана в жидкий уран, который будет отливаться в компоненты оружия; первая реакция при малом нагреве, а вторая при 550 °С - 700 °С):



или



ПРИЛОЖЕНИЕ Б РАСЧЕТ ТРЕБОВАНИЙ ПО СЫРЬЕВЫМ МАТЕРИАЛАМ ДЛЯ ШЕСТИ БОЕПРИПАСОВ ДЕЛЕНИЯ СТВОЛЬНОГО ТИПА

В этом приложении оценивается количество ключевых сырьевых материалов, требующихся для производства шести боеприпасов деления, для каждого из которых требуется 50 кг ВОУ. Теоретические требования рассчитывались из химических реакций и молекулярных весов, указанных в Приложении А. мы показываем исходные количества, необходимые для создания каждого килограмма промежуточного материала, или одного килограмма окончательного металлического ВОУ. Читатель сможет легко рассчитать теоретические требования для производства всех 300 кг ВОУ. Тем не менее, в наших окончательных выражениях теоретические требования умножены на 1,5 для учета неидеального преобразования к промышленным процессам реального мира.

Источник: авторы.

- 1 кг UNH (гексагидрата уранилнитрата) требует 0,559 кг технической закиси-окиси урана и 0,251 кг азотной кислоты.
- 1 кг UO₃ требует 1,755 кг UNH.
- 1 кг UO₂ требует 1,059 кг UO₃ и 0,0074 кг H₂ (водород применяется везде, поэтому мы не рассчитывали его конечное потребление).
- 1 кг UF₄ требует 0,860 кг UO₂ и 0,255 кг HF.
- 1 кг UF₆ требует 0,892 кг UF₄ и 0,108 кг F₂.
- 1 кг высокообогащенного UF₆ требует 232 кг UF₆.
- 1 кг высокообогащенного UF₄ требует 1,122 кг высокообогащенного UF₆ и 0,0064 кг H₂.
- 1 кг металлического ВОУ требует 1 кг высокообогащенного UF₄ и 0,336 кг Ca или 0,204 кг Mg.

Для каждого боеприпаса требуется 50 кг металлического ВОУ, так что для шести боеприпасов потребуется 300 кг металлического ВОУ.

Используя перечисленные выше теоретические преобразования, и умножая на 1,5 для учета неидеальности производственных процессов, мы оцениваем, что для производства 300 кг ВОУ требуется:

- 120 000 кг технической закиси-оксида урана.
- 54 000 кг азотной кислоты.
- 35 000 кг плавиковой кислоты.
- 16 500 кг фтора.
- 150 кг Са или 90 кг Mg.

Эти количества брались в расчет при проведении оценок в Приложении В.

ПРИЛОЖЕНИЕ В РАБОТЫ, ВКЛЮЧЕННЫЕ В ПРОГРАММУ ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ

Представленные здесь данные отражают стандартный инженерный анализ, и они основаны на опыте одного из авторов в разработке и производстве систем оружия. Однако, мы не делали попыток получать реальные цены от поставщиков или извлекать подробные данные о разработке и изготовлении из специальных программ; такие данные почти определенно будут секретными или будут составлять чью-нибудь собственность. Следовательно, индивидуальные оценки стоимости могут быть точными только в пределах фактора двух, в верхнюю или в нижнюю сторону.

Работа с названием, выделенным жирным шрифтом, указывает на суммарную работу, которая является особенностью программы «Microsoft Project», а не стандартным компонентом сетевого графика проекта (замечание: по техническим причинам суммарные работы разделяются на «начало суммарной работы» и «конец суммарной работы»). «Работа» 28 является узлом принятия решения: в этой точке может быть выбран только один способ действий. Название компонента само по себе, например «Кипятильник из нержавеющей стали» подразумевает, что соответствующей работой является «приобретение этого компонента». В столбце 1 приведен идентификатор работы, или ее номер; в столбце 2 дается название работы; столбец 3 является кодом, не используемым в данной работе; в столбце 4 приводится номинальная продолжительность работы в неделях; в столбце 5 дается минимальная продолжительность работы при выделении дополнительных ресурсов; в столбце 6 приводятся непосредственные предшественники работы, которые должны быть завершены до тех пор, когда будет начата работа (FS, FF, и SS обозначают отношения предшествования «конец-начало», «конец-конец», и «начало-начало», соответственно). У каждого такого отношения может иметься связанное с ним опережение (-), или задержка (+), измеряемая в неделях. Например, «7SS+24» в строке 9 означает, что работа 8 не может быть начата, пока не пройдет 24 недели после начала работы 7); в столбце 7 указывается энергия (в МВт·час), необходимая для завершения работы; в столбце 8 указываются затраты на завершение работы (в млн.долл.); в столбце 9 указаны трудозатраты профессиональной рабочей силы (в человеко-месяцах), необходимые для завершения проекта; столбцы 10 и 11 аналогичны, но они предназначены соответственно для квалифицированной и неквалифицированной рабочей силы.

Работы, включенные в программу ядерного оружия

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1 _s	Программа ядерного оружия [начало] (работы 2 _s – 177 _f).	–	–	–	Не имеется	–	–	–	–	–
2 _s	Отвлечение коммерческого желтого кека [начало] (работы 3 – 5)	–	–	–	1 _s	–	–	–	–	–
3	Проектирование модификации завода желтого кека	Pb	48	24	2 _s	2,4	0,01	6	6	–
4	Модификация завода желтого кека	Fc	48	24	3	–	0,1	6	6	12
5	Отвод желтого кека	Lc	120	60	4	–	45	48	48	–
2 _f	Отвлечение коммерческого желтого кека [конец]	–	–	–	5	–	–	–	–	–
6 _s	Изготовление исходного материала для завода обогащения [начало] (гексафторид урана, UF ₆ , работы 7 – 10, 25, 26)	–	–	–	1 _s	–	–	–	–	–
7	Проектирование завода фторирования (ЗФ)	Ib	80	40	6 _s	20	0,13	50	50	–
8	Приобретение площадки для ЗФ	Ca	24	12	7SS + 24	0,6	0,15	3	–	–
9	Подготовка площадки для ЗФ (внутренние модификации)	Cc	24	12	8	6,6	0,07	3	15	15
6 _s	Изготовление исходного материала для завода обогащения [конец]	–	–	–	1 _s	–	–	–	–	–
10 _s	Приобретение компонентов ЗФ [начало] (работы 11 – 24)	–	–	–	7SS + 12	–	–	–	–	–
11	Резервуар для смешивания из нержавеющей стали	Ha	72	36	10 _s	1,8	0,03	–	9	–
12	Система для дистиллированной воды	Ha	72	36	10 _s	1,8	0,03	–	9	–
13	Резервуар для хранения азотной кислоты	Ha	72	36	10 _s	1,8	0,1	–	9	–
14	Кипятильник из нержавеющей стали	Ha	72	36	10 _s	1,8	0,1	–	9	–
15	Резервуар для термического разложения	Ha	72	36	10 _s	1,8	0,25	–	9	–
16	Печь для сушки	Ha	72	36	10 _s	1,8	0,05	–	9	–
17	Резервуар для высокотемпературной реакции газовой и твердой фаз	Ha	72	36	10 _s	1,8	0,5	–	9	–
18	Резервуар для хранения водорода (или аммиака)	Ha	72	36	10 _s	1,8	0,01	–	9	–
19	Резервуар реактора из нержавеющей стали	Ha	72	36	10 _s	1,8	0,5	–	9	–
20	Резервуар для хранения фтористого водорода	Ha	72	36	10 _s	1,8	0,2	–	9	–
21	Резервуар для сверхвысокотемпературной реакции газовой и твердой фаз	Ha	72	36	10 _s	1,8	0,5	–	9	–
22	Резервуар для хранения фтора	Ha	72	36	10 _s	1,8	0,15	–	9	–
23	Резервуар для конденсации гексафторида	Ha	72	36	10 _s	1,8	0,1	–	9	–
24	Насосы и трубопроводы	Ha	72	36	10 _s	1,8	0,1	–	9	–
10 _f	Приобретение компонентов ЗФ [конец]	–	–	–	11 – 24	–	–	–	–	–
25	Сборка и интеграция ЗФ	Pb	48	24	9, 10FF + 12	27,6	–	18	30	90
26	Эксплуатация ЗФ	Lc	120	60	5SS + 0, 25	590	40	42	240	–
6 _f	Изготовление исходного материала для завода обогащения [конец]	–	–	–	10 _f , 26	–	–	–	–	–
27 _s	Обогащение урана [начало] (некоторая часть работ 28 – 89)	–	–	–	1 _s	–	–	–	–	–
28	<i>Выбор процесса обогащения (узел решения)</i>	–	0	0	27 _s	–	–	–	–	–
29 _s	Процесс обогащения на газовых центрифугах (ЦП) [начало] (работы 30 – 53)	–	–	–	28	–	–	–	–	–
30	Конструирование базовой газовой центрифуги	Pb	48	24	29 _s	13,2	0,2	36	30	–
31 _s	Приобретение исследовательских компонентов для ЦП [начало] (5 штук, работы 32 – 37)	–	–	–	30SS + 12	–	–	–	–	–
32	Трубки ротора	Fa	48	24	31	2,4	0,08	6	6	–
33	Системы воздушных подшипников	Ea	40	20	31	1	0,08	–	5	–
34	Двигатели	Ca	40	20	31	1	0,03	–	5	–
35	Концевые заглушки	Ca	24	12	31	0,6	0,03	–	3	–
36	Корпуса центрифуг	Ca	24	12	31	0,6	0,05	–	3	–
37	Насосы и трубопроводы	Ca	24	12	31	0,6	0,05	–	3	–
31 _f	Приобретение исследовательских компонентов для ЦП [конец]	–	–	–	32 - 37	–	–	–	–	–
38	Сборка исследовательских центрифуг	Cb	24	12	29 _s SS, 31 _f	9,6	0,1	18	30	–
39	Испытания и оценка исследовательских центрифуг	Cb	24	12	38	9,6	0,1	18	30	–
40	Проектирование промышленных центрифуг	Db	32	16	29 _s SS, 39FS – 4	8,8	0,07	24	20	–
41	Проектирование обогатительных каскадов	Db	32	16	40SS + 8	12,8	0,07	24	20	–
42	Проектирование обогатительного завода (ОЗ)	Eb	40	20	41SS + 8	16	0,08	24	40	–
43	Приобретение площадки для ОЗ	Ca	24	12	42SS + 4	0,6	2,5	3	–	–
44	Подготовка площадки для ОЗ	Cc	24	12	43	13,2	0,3	3	30	30
45 _s	Приобретение промышленных компонентов для ЦП [начало] (1000 штук, работы 46 – 51)	–	–	–	41SS + 8	–	–	–	–	–
46	Трубки ротора	Ja	96	48	45 _s	4,8	4,8	12	12	–

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
47	Системы воздушных подшипников	Ja	96	48	45 _s	2,4	1,6	–	12	–
48	Двигатели	Ja	96	48	45 _s	2,4	1,6	–	12	–
49	Концевые заглушки	la	80	40	45 _s	2,4	1,6	–	12	–
50	Корпуса центрифуг	la	80	40	45 _s	2,4	3,2	–	12	–
51	Насосы и трубопроводы	la	80	40	45 _s	2,4	3,2	–	12	–
45 _r	Приобретение промышленных компонентов для ЦП [конец]	–	–	–	46 – 51	–	–	–	–	–
52	Сборка промышленных центрифуг	Pb	48	24	29 _s SS,44,45 _r F F+8	315	–	42	1536	–
53	Интеграция центрифуг	Db	32	16	52SS + 8	44	–	20	200	–
54	Загрузка каскада	Kb	112	56	26SS +8, 52, 53	65	–	54	288	–
55	Изготовление обогащенного и обедненного материала	Cc	24	12	54	45 000	–	54	432	–
29 _r	Процесс обогащения на газовых центрифугах (ЦП) [конец]	–	–	–	55, 45 _r , 44, 42, 41, 40, 31 _r	–	–	–	–	–
56 _s	Газодиффузионный процесс обогащения (ДП) [начало] (этапы 57 – 76)	–	0	0	28	–	–	–	–	–
57	Проектирование базовой системы ДП	Fb	48	24	56 _s	13,2	0,2	36	30	–
58 _s	Приобретение исследовательских компонентов для ДП [начало] (5 штук, этапы 59 – 61)	–	–	–	57SS + 12	–	–	–	–	–
59	Диффузионные барьеры	Fa	48	24	58 _s	2,4	0,05	6	6	–
60	Теплообменники	Ea	40	20	58 _s	1	0,03	–	5	–
61	Насосы и трубопроводы	Ca	24	12	58 _s	0,6	0,07	–	3	–
58 _r	Приобретение исследовательских компонентов для ДП [конец]	–	–	–	59 - 61	–	–	–	–	–
62	Сборка исследовательских устройств	Cb	24	12	58 _r FF, 56 _s	9,6	0,1	18	30	–
63	Испытания и оценка исследовательских устройств	Cb	24	12	62	9,6	0,1	18	30	–
64	Проектирование промышленных газодиффузионных устройств	Db	32	16	63FS-4	8,8	0,07	24	20	–
65	Проектирование обогатительного каскада	Db	32	16	64SS+8	12,8	0,07	24	40	–
66	Проектирование обогатительного завода (ОЗ)	Vb	40	20	65SS+8	16	0,08	30	50	–
67	Приобретение площадки для ОЗ	Ca	24	12	66SS+4	0,6	5	3	–	–
68	Подготовка площадки для ОЗ	Cc	24	12	67	13,2	0,55	3	30	30
69 _s	Приобретение промышленных компонентов для ДП [начало] (4000 штук, этапы 70 – 72)	–	–	–	65SS+8	–	–	–	–	–
70	Диффузионные барьеры	Fa	48	24	69	2,4	40	6	6	–
71	Теплообменники	Ea	40	20	69	1	20	–	5	–
72	Насосы и трубопроводы	Ca	24	12	69	0,8	60	–	4	–
69 _r	Приобретение промышленных компонентов для ДП [конец]	–	–	–	70-72	–	–	–	–	–
73	Сборка промышленных устройств для ДП	Fb	48	24	68, 69 _r FF + 8	126	–	30	600	–
74	Интеграция обогатительного каскада	Db	32	16	73SS + 8	84	–	20	400	–
75	Загрузка каскада	Kb	112	56	26SS + 8, 73, 74	65	–	36	288	–
76	Производство обогащенного и обедненного материала	Cc	24	12	75	600 000	–	54	432	–
56 _r	Газодиффузионный процесс обогащения (ДП) [конец]	–	–	–	76, 64-66, 58 _r , 57	–	–	–	–	–
77 _s	Аэродинамический процесс обогащения (АП) [начало] (этапы 78 – 95)	–	0	0	28	–	–	–	–	–
78	Проектирование базовой системы АП	Rb	48	24	77 _s	13,2	0,2	36	30	0
79 _s	Приобретение исследовательских компонентов для АП [начало] (5 штук, этапы 80 – 81)	–	–	–	78SS + 12	–	–	–	–	–
80	Вихревые устройства	Fa	48	24	79 _s	2,4	0,25	6	6	–
81	Насосы и трубопроводы	Ca	24	12	79 _s	0,6	0,08	–	3	–
79 _r	Приобретение исследовательских компонентов для АП [конец]	–	–	–	80, 81	–	–	–	–	–
82	Сборка исследовательских устройств	Cb	24	12	79 _r	9,6	0,1	18	30	–
83	Испытание и оценка исследовательских устройств	Cb	24	12	82	9,6	0,1	18	30	–
84	Проектирование промышленных устройств	Db	32	16	83FS-4	8,8	0,07	24	20	–
85	Проектирование обогатительного каскада	Db	32	16	84SS+8	12,8	0,07	24	40	–
86	Проектирование завода обогащения (ОЗ)	Eb	40	20	85SS+8	16	0,08	30	50	–
87	Приобретение площадки для ОЗ	Ca	24	12	86SS+8	0,6	2	3	–	–
88	Подготовка площадки для ОЗ	Cc	24	12	87	12,6	0,25	3	30	30
89 _s	Приобретение промышленных компонентов для АП [начало] (600 штук, этапы 90 – 91)	–	–	–	85SS+8	–	–	–	–	–
90	Вихревые устройства	Fa	48	24	89 _s	2,4	30	6	6	–
91	Насосы и трубопроводы	la	80	40	89 _s	1,2	9	–	6	–

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
89 _f	Приобретение промышленных компонентов для АП [конец]	–	–	–	90, 91	–	–	–	–	–
92	Сборка промышленных устройств	Fb	48	24	88, 89, FF + 8	126	–	30	600	–
93	Интеграция обогатительного каскада	Db	32	16	92SS + 8	84	–	20	400	–
94	Загрузка каскада	Kb	112	56	26SS + 8, 92, 93	65	–	36	288	–
95	Производство обогащенного и обедненного материала	Cc	24	12	94	900 000	–	54	432	–
77 _f	Аэродинамический процесс обогащения (АП) [конец]	–	–	–	93, 92, 84 - 86, 79 _f , 78	–	–	–	–	–
27 _f	Обогащение урана [конец]	–	–	–	28, 95	–	–	–	–	–
96 _s	Подготовка металлического урана [начало] (этапы 97 - 112)	–	–	–	1 _s	–	–	–	–	–
97	Проектирование металлургического завода (МЗ)	Gb	56	28	96 _s	19,6	0,12	6	3	–
98	Приобретение площадки для МЗ	Ca	24	12	97SS + 12	0,6	0,1	3	–	–
99	Подготовка площадки для МЗ	Cc	24	12	98	6,6	0,06	3	15	15
100 _s	Приобретение компонентов металлургического завода [начало], обогащенный металл (этапы 101 – 104)	–	–	–	96 _s	–	–	–	–	–
101	Газофазный реактор со сбором частиц	Fa	48	24	96 _s	1,8	0,25	6	3	–
102	Бак для хранения водорода	Fa	48	24	96 _s	0,6	0,001	–	3	–
103	Металлургическая печь	Fa	48	24	96 _s	0,6	0,1	–	3	–
104	Тигли из окиси гафния	Fa	48	24	96 _s	0,6	0,03	–	3	–
100 _f	Приобретение компонентов металлургического завода [конец]	–	–	–	101 – 104	–	–	–	–	–
105 _s	Приобретение компонентов металлургического завода [начало], обедненный металл (этапы 106 – 109)	–	–	–	96 _s	–	–	–	–	–
106	Газофазный реактор со сбором частиц	Fa	48	24	105 _s	0,6	0,25	–	3	–
107	Бак для хранения водорода	Fa	48	24	105 _s	0,6	0,001	–	3	–
108	Металлургическая печь	Fa	48	24	105 _s	0,6	0,1	–	3	–
109	Тигли из окиси гафния	Fa	48	24	105 _s	0,6	0,03	–	3	–
105 _f	Приобретение компонентов металлургического завода [конец]	–	–	–	106 – 108	–	–	–	–	–
110	Интеграция компонентов	Db	32	16	99, 100FF+12, 105FF+12	20,8	–	24	40	40
111	Производство металлического природного урана	Fc	48	24	110	80	0,01	6	18	–
112	Производство металлического обедненного и обогащенного урана	Cc	24	12	27, FF	160	0,02	12	36	–
96 _f	Подготовка металлического урана [конец]	–	–	–	97, 112	–	–	–	–	–
113 _s	Подготовка ядерных взрывных устройств [начало] (этапы 114s - 196)	–	–	–	1 _s	–	–	–	–	–
114 _s	Проектирование компонентов ствольного устройства [начало] (этапы 115 - 123)	–	–	–	113 _s	–	–	–	–	–
115	Пушка	Fb	48	24	114 _s	9,6	0,2	18	30	–
116	Метательный заряд	Fb	48	24	114 _s	3,6	0,03	6	12	–
117 _s	Критическая сердцевина [начало] (этапы 118 - 121)	–	–	–	114 _s	–	–	–	–	–
118	Приемник из делящегося материала	Fb	48	24	117 _s	9,6	0,07	18	30	–
119	Снаряд из делящегося материала	Fb	48	24	117 _s	9,6	0,05	18	30	–
120	Отражающая оболочка	Fb	48	24	117 _s	9,6	0,05	18	30	–
121	Инициатор	Fb	48	24	117 _s	1,2	0,01	6	–	–
117 _f	Критическая сердцевина [конец]	–	–	–	118 - 121	–	–	–	–	–
122	Устройства безопасности и боевого снаряжения	Fb	48	24	114 _s	2,4	0,01	6	6	–
123	Взрыватель	Fb	48	24	114 _s	2,4	0,01	6	6	–
114 _f	Проектирование компонентов ствольного устройства [конец]	–	–	–	115, 116, 117 _f , 122, 123	–	–	–	–	–
124	Проектирование сборочного завода оружия (СЗ)	Cb	24	12	114 _f	12	0,07	30	30	–
125	Приобретение площадки СЗ	Va	16	8	124	0,6	0,8	3	–	–
126	Подготовка площадки СЗ	Cc	24	12	125	6,6	0,15	3	15	15
127 _s	Приобретение производственного оборудования [начало] (работы 128 – 132)	–	–	–	114 _f	–	–	–	–	–
128	Прецизионный токарный станок большого диаметра	Fa	48	24	126FF + 12	2,4	0,1	6	6	–
129	Прецизионный фрезерный станок с атмосферой инертного газа	Fa	48	24	126FF + 12	1,2	0,25	–	6	–
130	Металлургическая печь	Fa	48	24	126FF + 12	1,2	0,25	–	6	–
131	Тигли из окиси гафния	Fa	48	24	126FF + 12	1,2	0,05	–	6	–
132	Система для литья в атмосфере инертного газа	Fa	48	24	126FF + 12	1,2	0,05	–	6	–

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
127 _f	Приобретение производственного оборудования [конец]	–	–	–	128 – 132	–	–	–	–	–
133 _s	Приобретение компонентов исследовательского устройства, прототип из природного урана [начало] (этапы 134 – 138)	–	–	–	114	–	–	–	–	–
134	Высокопрочный стальной цилиндр	Ca	24	12	133 _s	0,6	0,01	–	3	–
135	Двухкомпонентный метательный порох	Ca	24	12	133 _s	0,6	0,01	–	3	–
136	Полоний	Ca	24	12	133 _s	0,6	0,05	–	3	–
137	Бериллиевый порошок	Ca	24	12	133 _s	0,6	0,01	–	3	–
138	Детонатор и компоненты подрывного тракта	Ca	24	12	133 _s	0,6	0,01	–	3	–
133 _f	Приобретение компонентов исследовательского устройства, прототип из природного урана [конец]	–	–	–	134 – 138	–	–	–	–	–
139 _s	Изготовление компонентов исследовательского устройства, прототип из природного урана [начало] (этапы 140 – 149)	–	–	–	133 _f	–	–	–	–	–
140	Пушечный ствол	Fc	48	24	128, 139 _s	3,6	–	9	9	–
141	Механизм казенной части	Fc	48	24	128, 139 _s	1,8	–	–	9	–
142	Отливка урановых компонентов	Dc	32	16	111, 139 _s	16	–	–	6	–
143	Отливка урановой оболочки	Dc	32	16	111, 139 _s	16	–	–	6	–
144	Обработка уранового приемника	Dc	32	16	129, 142FF+8, 139 _s	1,2	–	–	6	–
145	Обработка уранового снаряда	Dc	32	16	129, 142FF+8, 139 _s	1,2	–	–	6	–
146	Обработка урановой оболочки	Dc	32	16	129, 142FF+8, 139 _s	1,2	–	–	6	–
147	Инициатор	Dc	32	16	131, 136, 137, 139 _s	2,4	–	–	6	–
148	Метательный заряд	Dc	32	16	132, 135, 139 _s	1,2	–	6	6	–
149	Детонатор и подрывной тракт	Db	32	16	138, 139 _s	1,2	–	–	6	–
139 _f	Изготовление компонентов исследовательского устройства, прототип из природного урана [конец]	–	–	–	140 – 149	–	–	–	–	–
150	Сборка исследовательских устройств (прототипа с природным ураном)	Dc	32	16	133, FF+4, 139, FF+4,	3,6	–	6	12	–
151 _s	Приобретение компонентов исследовательского устройства, прототип из обогащенного урана [начало] (этапы 152 – 157)	–	0	0	172	–	–	–	–	–
152	Высокопрочный стальной цилиндр	Ca	24	12	151 _s	0,6	0,01	–	3	–
153	Двухкомпонентный метательный порох	Ca	24	12	151 _s	0,6	0,01	–	3	–
154	Полоний	Ca	24	12	151 _s	0,6	0,05	–	3	–
155	Бериллиевый порошок	Ca	24	12	151 _s	0,6	0,01	–	3	–
156	Детонатор и компоненты подрывного тракта	Ca	24	12	151 _s	0,6	0,01	–	3	–
151 _f	Приобретение компонентов исследовательского устройства, прототип из обогащенного урана [конец]	–	–	–	152 – 156	–	–	–	–	–
139 _s	Изготовление компонентов исследовательского устройства, прототип из природного урана [начало] (этапы 140 – 149)	–	–	–	133 _f	–	–	–	–	–
157 _s	Изготовление компонентов исследовательского устройства, прототип из обогащенного урана [начало] (этапы 158 – 167)	–	0	0	172	–	–	–	–	–
158	Пушечный ствол	Cc	24	12	128, 157 _s	3,6	–	9	9	–
159	Механизм казенной части	Cc	24	12	128, 157 _s	1,8	–	–	9	–
160	Отливка компонентов из обогащенного урана	Ac	8	4	112, 157 _s	16	–	–	6	–
161	Отливка оболочки из обедненного урана	Ac	8	4	112, 157 _s	16	–	–	6	–
162	Обработка приемника из обогащенного урана	Vc	16	8	129, 157 _s	1,2	–	–	6	–
163	Обработка снаряда из обогащенного урана	Vc	16	8	129, 157 _s	1,2	–	–	6	–
164	Обработка оболочки из обедненного урана	Vc	16	8	129, 161, 157 _s	1,2	–	–	6	–
165	Инициатор	Ac	8	4	131, 154, 155, 157 _s	2,4	–	–	6	–
166	Метательный заряд	Ac	8	4	132, 153, 157 _s	1,2	–	6	6	–
167	Детонатор и подрывной тракт	Ac	8	4	156, 157 _s	1,2	–	–	6	–

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
157 _f	Изготовление компонентов исследовательского устройства, прототип из обогащенного урана [конец]	–	–	–	159 – 167	–	–	–	–	–
168	Сборка исследовательских устройств (прототипа с обогащенным ураном)	Ab	16	8	151FF+4,	3,6	–	6	12	–
169 _s	Подкритические испытания исследовательских устройств [начало] (этапы 170 - 174)	–	–	–	170 - 172	–	–	–	–	–
170	Подтверждение критической массы	Cb	24	12	170FF + 4	2,4	–	6	6	–
171	Подтверждение скорости пушки	Cb	24	12	160	3,6	0,1	6	12	–
172	Макетирование совместимости со средством доставки	Cb	24	12	171	3,6	0,1	6	12	–
169 _f	Подкритические испытания исследовательских устройств [конец]	–	–	–	170, 172	–	–	–	–	–
173	Испытание полномасштабного устройства (не требуется)	Fb	48	24	170	80	1	36	360	–
174	Завершение проектирования изготавливаемого оружия	Eb	40	20	170FF + 12	18	0.1	30	60	–
175	Приобретение компонентов оружия [начало] (6 боеприпасов; этапы 172 - 176)	–	–	–	174SS + 8	–	–	–	–	–
176	Высокопрочный стальной цилиндр	Ca	24	12	175 _s	1,2	0,06	–	6	–
177	Двухкомпонентный метательный порох	Ca	24	12	175 _s	1,2	0,06	–	6	–
178	Полоний	Ca	24	12	175 _s	1,2	0,3	–	6	–
179	Бериллиевый порошок	Ca	24	12	175 _s	1,2	0,06	–	6	–
180	Детонатор и компоненты подрывного тракта	Ca	24	12	175 _s	1,2	0,06	–	6	–
175 _f	Приобретение компонентов оружия [конец]	–	–	–	176 – 180	–	–	–	–	–
181 _s	Изготовление компонентов оружия [начало] (6 боеприпасов; этапы 182 - 194)	–	–	–	174	–	–	–	–	–
182	Пушечный ствол	Cc	24	12	128, 176, 181 _s	4,8	–	12	12	–
183	Механизм казенной части	Cc	24	12	128, 129, 181 _s	2,4	–	–	12	–
184	Отливка компонентов из обогащенного урана	Cc	24	12	112, 130, 181 _s	93	–	–	12	–
185	Отливка оболочки из обедненного урана	Cc	24	12	112, 130, 181 _s	93	–	–	12	–
186	Обработка приемника из обогащенного урана	Cc	24	12	D	2,4	–	–	12	–
187	Обработка снаряда из обогащенного урана	Cc	24	12	125, 180	2,4	–	–	12	–
188	Обработка оболочки из обедненного урана	Cc	24	12	129, 185	2,4	–	–	12	–
189	Инициатор	Cc	24	12	131, 178, 179, 181 _s	4,8	–	12	12	–
190	Метательный заряд	Cc	24	12	132, 177, 181 _s	2,4	–	–	12	–
191	Детонатор и подрывной тракт	Cc	24	12	180, 181 _s	2,4	–	–	12	–
192	Взрыватель	Cc	24	12	181 _s	2,4	–	–	12	–
193	Устройства безопасности и боевого снаряжения	Cc	24	12	181 _s	2,4	–	–	12	–
194	Корпус и конструкция боеприпаса	Cc	24	12	172, 181 _s	2,4	–	–	12	–
181 _f	Изготовление компонентов оружия [конец]	–	–	–	182-183, 186-194	–	–	–	–	–
195	Сборка компонентов оружия	Cc	24	12	181 _f	7,2	0,1	12	24	–
196	Поставки изготовленных боеприпасов	–	0	0	195	–	–	–	–	–
113 _f	Подготовка ядерных взрывных устройств [конец]	–	–	–	196	–	–	–	–	–
1 _f	ПРОГРАММА ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ [конец]	–	0	0	113 _f	–	–	–	–	–

Источник: авторы.