

Имплозия. Истоки

(О развитии принципа имплозии в Атомном проекте)

И. А. АНДРЮШИН, А. К. ЧЕРНЫШЕВ



Л. Гровс и Р. Оппенгеймер – руководители Манхеттенского проекта

Принцип имплозии («сфокусированный внутрь взрыв») явился исключительно плодотворной идеей, определившей основные особенности ядерного оружия. Исследования имплозии продолжают в течение десятков лет. В Атомном проекте СССР принцип имплозии появился в начале 1945 г. после анализа И. В. Курчатовым ряда сообщений разведки.

16 марта 1945 г. И. В. Курчатов подписал заключение, в котором отметил возможность того, что метод имплозии «следует предпочесть» методу «выстрела». «...Несомненно, метод "взрыва вовнутрь" представляет большой интерес, принципиально правилен и должен быть подвергнут серьезному теоретическому и опытному анализу». 7 апреля 1945 г. И. В. Курчатов писал: «В этом ... разделе материалов изложен

метод приведения бомбы в действие "взрывом вовнутрь" (implosionmethod), о котором мы узнали совсем недавно и работу над которым только еще начинаем. Однако, уже сейчас нам стали ясны все его преимущества перед методом встречного выстрела».

Реальные работы по изучению и использованию имплозии были начаты в СССР в 1946 г. после создания КБ-11. Первоначально на паритетных началах рассматривалось создание двух атомных бомб – урановой бомбы на принципе сближения и плутониевой бомбы на принципе имплозии. В результате был реализован плутониевый проект. 29 августа 1949 г. успешное испытание первой советской атомной бомбы РДС-1 определило ядерный статус нашей страны и, в частности, продемонстрировало успешное освоение принципа имплозии – принципа, заимствованного из США. Представляется интересным проанализировать, каким образом возник принцип имплозии. Приведем также ряд кратких биографических сведений ряда участников этих работ в США.

1. Первые шаги. На пути к имплозии. Первые идеи о возможности создания атомной бомбы появились вскоре после открытия в 1938 г.



Американская бомба «Толстяк», основанная на принципе имплозии



Схема имплозии

О. Ганом и Ф. Штрассманом деления ядер урана нейтронами. Для перевода первоначально подкритической конфигурации делящихся материалов в надкритическую был сформулирован принцип компактирования на основе быстрого сближения отдельных частей и объединения их в единую область – принцип сближения. Эта идея открыто обсуждалась научным сообществом в предвоенные годы и являлась «общим достоянием».

В США, начиная с 1941 г., первые исследования по конструкции и физике атомной бомбы проводились в Металлургической лаборатории в Чикаго, которой в 1942–1945 гг. руководил А. Комптон (в 1944 г. ему было 52 года). В начале 1942 г. проводился ряд экспериментальных исследований в Калифорнийском университете. Профессор Калифорнийского университета Р. Оппенгеймер собрал небольшую группу для теоретических исследований и координации экспериментальных работ. Официально эта группа также числилась при Металлургической лаборатории.

В июне 1942 г. Оппенгеймер провел первую конференцию по конструкции атомной бомбы в Чикаго, а уже в июле вторую – в Беркли. В результате обсуждений были выбраны проекты на сближении с использованием урана-235 и плутония-239.



Роберт Оппенгеймер (1904–1967). Окончил Гарвардский ун-т (1925). Стажировался в Кембриджском ун-те у Э. Резерфорда (1925–1926). Работал 1929–1947 гг. в Калифорнийском ун-те и Калифорнийском технологическом ин-те; с 1936 г. – профессор. В 1943–1945 гг. – директор ЛАНЛ, с 1946 г. – руководитель Комитета советников при КАЭ США. В 1953 г. снят с государственных постов за «нелояльность». В 1947–1966 гг. – директор Ин-та перспективных исследований (Принстон). Автор теоремы Эренфеста–Оппенгеймера, теории реакции срыва Оппенгеймера–Филиппса, каскадной теории (в соавторстве) космических ливней, первой модели (в соавторстве) нейтронной звезды, предсказал (в соавторстве) существование «черных дыр», объяснил «лэмбовский сдвиг». В 1944 г. ему было 40 лет.

Соответственно и в советском Атомном проекте с 1943 г. стали рассматриваться вопросы создания атомной бомбы на основе плутония-239 и урана-235 с использованием схемы сближения. Напомним, что в своем письме в 1942 г.

к И. В. Курчатову Г. Н. Флеров также рассматривал возможность создания атомной бомбы из урана-235 на принципе сближения.

К концу лета 1942 г. руководителем Атомного проекта США назначен Л. Гровс и было решено для работ по атомной бомбе создать отдельную лабораторию. К ноябрю 1942 г. выбрано место в Лос-Аламосе, в 50 км от города Санта-Фе. Лос-Аламосская лаборатория финансировалась по договору между Манхэттенским инженерным округом и Калифорнийским университетом. Директором лаборатории был назначен Оппенгеймер, который прибыл в Лос-Аламос в марте 1943 г. Уже в конце 1944 г. в лаборатории работали многие выдающиеся физики XX столетия (в августе 1945 г. население Лос-Аламоса составляло ~3000 человек).

В середине сентября 1943 г. Лос-Аламос принял первых ученых специалистов. Оппенгеймер и Гровс вскоре поняли, что 100 научных сотрудников мало, чтобы сделать «бомбу» к лету 1945 г.



Лесли Гровс (1896–1970). Военный. На армейской службе в 1918–1948 гг. С сентября 1942 г. – бригадный генерал и руководитель «Проекта Манхеттен». Организатор всех работ по созданию первых атомных бомб США и инфраструктуры в этих целях. Лично определил места строительства основных атомных объектов в Лос-Аламосе, Хэнфорде и Ок-Ридже. Лично настоял на назначении Р. Оппенгеймера научным руководителем Атомного проекта. После вывода «Проекта Манхеттен» из сферы ответственности армии под гражданскую юрисдикцию вышел в отставку. В 1944 г. ему было 48 лет.

На конференции в Беркли (11–17 марта 1943 г.), посвященной исследованиям по урану и плутонию, Р. Оппенгеймер и Р. Сербер представили доклад генералу Л. Гровсу и Дж. Конэнту (председатель Национального комитета оборонных исследований – NDRC). Этот доклад основывался на последних лекциях, которые читались в Лос-Аламосе. В своих лекциях Сербер рассматривал три различных принципиальных возможности создания атомной бомбы: принцип сближения, принцип автокатализа и принцип имплозии. Речь шла об идее фрагментации оболочек взрывчатым веществом и их сжатии внутрь. Отмечается (последующие интервью Дж. Кистяковского), что сама идея имплозии о возможности использования ВВ в сферической

конфигурации содержалась в отчете Национальной академии наук президенту Рузвельту в 1941 или 1942 г. Автор этого предложения неизвестен.

В апреле 1943 г. в своих лекциях Сербер представил общие идеи атомной бомбы на сближении, однако в то время было мало ядерных данных для U^{235} и Pu^{239} , и даже физические свойства плутония не были известны в достаточной мере (весной 1944 г. свойства Pu были определены с большой неопределенностью – «плотность не менее 17 г/см^3 , а точка плавления выше $1800 \text{ }^\circ\text{C}$).



Роберт Сербер (1909–1997). Окончил Висконсинский ун-т, доктор философии (1934). Работал в 1934–1938 гг. в Калифорнийском ун-те с Р. Оппенгеймером. Участник Атомного проекта с 1942 г. В 1946–1951 гг. – профессор Калифорнийского ун-та, в 1951–1977 гг. – Колумбийского ун-та. Член Национальной академии наук (1952). Автор цикла лекций по основам и целям Атомного проекта. Разработал теорию газодинамики ядерного взрыва. Работы в области ядерной физики, физики космических лучей, физики ускорителей, теории ядерных реакторов. В 1944 г. ему было 35 лет.

Следует отметить, что ряд ученых – участников Манхэттенского проекта считали, что автором имплозии является Ричард Толмен, который на летней конференции 1942 г. в Беркли с участием Г. Бете, Э. Теллера, Ф. Блоха, Э. Конопинского, Р. Сербера впервые озвучил эту идею.

Ганс Бете – руководитель теоретического отдела ЛАНЛ в 1943–1946 гг.; в 1944 г. ему было 38 лет. Эдвард Теллер – член теоретического отдела в 1942–1946 гг.; в 1944 г. ему было 36 лет. Феликс Блох – член теоретического отдела в 1942–1945 гг.; в 1944 г. ему было 39 лет. Эмиль Конопинский – член теоретического отдела в 1943–1946 гг.; в 1944 г. ему было 33 года.

Отметим, что предложение Р. Толмена по «взрывам вовнутрь» по сути представляет собой компактирование (сведение вовнутрь) подкритических сегментов активного материала для получения надкритической массы.

Одним из авторов имплозии считается Сет Неддермайер. Хотя он не имел возможности использовать административные рычаги, его упор-



Ричард Толмен (1881–1948). Окончил в 1903 г. Массачусетский технологический ин-т, доктор философии (1910). Консультант Атомного проекта. Научный советник при генерале Л. Гровсе. Вице-председатель NRDC. В 1912 г. ввел понятие релятивистской массы $m_0/(1-\beta^2)^{1/2}$ «наиболее подходит для массы движущегося тела». В 1916 г. экспериментально доказал, что электричество представляет собой поток электронов, движущихся по металлическому проводнику, одновременно измерил массу электрона. Автор исследований по термодинамике релятивистских систем и космологии. В 1944 г. ему было 63 года.

ство и эксперименты определили рост доверия к этому принципу. «Неддермайер создал элементарную схему имплозии».

«Тихий неяркий физик (видимо, с тяжелым характером) из Национального бюро стандартов» и бывший студент Оппенгеймера Неддермайер посещал лекции, которые читал в 1943 г. в Лос-Аламосе профессор Роберт Сербер. «Идея имплозии захватила С. Неддермайера. Хотя ему было трудно выразить свои представления, он уверенно высказывался о реализуемости имплозивной бомбы. Не опасаясь негативных последствий, Неддермайер убедил Оппенгеймера в том, что идея имплозии заслуживает проведения специальных исследований».



Сет Неддермайер (1907–1988). Окончил Калифорнийский технологический ин-т. В 1941–1943 гг. – в Национальном бюро стандартов. В 1943–1946 гг. – участник работ в ЛАНЛ. С 1946 г. – в Вашингтонском ун-те. В 1938 г. открыл (совместно с К. Андерсеном) мюоны в экспериментах на Горной станции. Премия Э. Ферми (1982). В 1944 г. ему было 37 лет.

Как записано в технической истории Лос-Аламосской лаборатории, Неддермайер на лекции Сербера в апреле 1943 г. представил первый теоретический анализ обжатия: «Имплозия сферы детонацией окружающего слоя ВВ работоспособна, и этот метод превосходит пушечный метод и в более высокой скорости, и в более коротком расстоянии соединения». Однако, реакция участников и руководителей обсуждения была отрицательной: «Как Вы обеспечите сим-

метрию?». Никто не воспринял идею серьезно. Тем не менее, Оппенгеймер назначил Неддермайера начальником группы по экспериментальному исследованию имплозии.

В первых опытах его группа, используя ограниченное количество ВВ, показала, что можно сжать металлические трубы в сплошной стержень, однако симметрия сжатия удручала: трубы были скручены и деформированы. Летом 1943 г. он начал в Лос-Аламосе эксперименты по проверке идеи имплозии. Этот вариант до середины 1944 г. считался запасным. 4 июля 1943 г. Неддермайер и сотрудники его группы на площадке Anchor Ranch начали эксперименты с тротилом. В попытках достигнуть однородного сжатия он искусно размещал коробки с тротилом вокруг полых стальных цилиндров и затем подрывал их. В результате имплозии трубы трансформировались в блоки твердого металла. Применительно к проблеме атомной бомбы Неддермайер был уверен, что части плутония могут быть собраны в небольшой шар при их нагружении сферически-симметричным давлением, причем этот шар будет создан имплозией за несколько микросекунд.

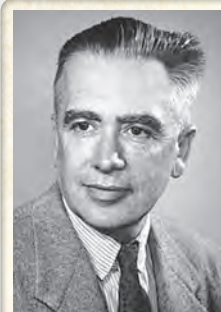
Начальник Неддермайера – глава артиллерийского дивизиона Лос-Аламоса Вильям Парсонс был сторонником принципа сближения и полагал, что с имплозией связано слишком много проблем и велик риск, что она не будет реализована. Тем не менее, в сентябре 1943 г. после доклада в Комитете начальников штабов метод Неддермайера стал серьезно рассматриваться и ему было поручено ускорить работы. Группа Неддермайера была увеличена с 5 до 50 человек (в октябре 1943 г. Кистяковский был привлечен к работам в качестве консультанта). Результаты опытов в начале 1944 г. из-

за высокой асимметрии сжатия и неустойчивостей порождали пессимизм.

Р. Оппенгеймер пригласил в 1943 г. Джона фон Неймана (консультанта Манхэттенского проекта) проанализировать результаты экспериментов по имплозии, который показал, что для эффективно-го сжатия плутония необходима высокая степень симметрии сходящейся ударной волны.

Следующим важным результатом Дж. фон Неймана стало то, что он осенью 1943 г. показал, что при детонации ВВ может происходить сжатие материала, т. е. повышение его плотности. Это открытие приводило к значительно меньшим затратам плутония. Дж. фон Нейман изучал конструкцию, в которой эффективно «работало» его меньшее количество.

2. Плутоний-240. Дорога для имплозии открыта. Эмилио Сегре весной 1943 г. начал изменение фона спонтанного деления плутония еще в Беркли на микроскопических образцах плутония, получаемого на циклотроне. В июне 1943 г. Сегре сделал предварительное заключение, что плутоний, в принципе, может сработать в бомбе на сближении (при характерных скоростях сближения).



Эмилио Сегре (1905–1989). Окончил Римский ун-т (1928), где работал в 1928–1935 гг. В 1938–1972 гг. работал в Калифорнийском ун-те, в 1942–1946 гг. – в ЛАНЛ. С 1974 г. – профессор Римского ун-та. Соавтор открытий технеция, астатина, плутония-239. Открыл антипротон (Нобелевская премия, 1959). В 1944 г. ему было 39 лет.



Джон (Янош) фон Нейман (1903–1957). Окончил Будапештский ун-т (1926). В 1927–1929 гг. работал в Берлинском ун-те, 1930–1933 гг. – в Принстонском ун-те. С 1933 г. – профессор Принстонского ин-та перспективных исследований, в 1945–1955 гг. – директор ВЦ Принстонского ин-та. В 1951–1953 гг. – президент Американского математического общества. Автор фундаментальных исследований по математической логике, теории групп, алгебре операторов, квантовой механике, статистической физике, теории игр, теории автоматов. Создатель Принстонской ЭВМ и ее модификаций. В 1944 г. ему был 41 год.

Как только началось реакторное производство плутония, Э. Сегре продолжил опыты в Лос-Аламосе по мере поступления все большего количества металлического плутония. Г. Сиборг и Э. Ферми еще в 1942 г. предупреждали, что четно-четный изотоп плутоний-240 может иметь большую скорость спонтанного деления. В марте 1944 г. Сегре получил в экспериментах существенно большую скорость спонтанного деления, что повышало вероятность неполного взрыва. В апреле после анализа результатов образцов плутония, полученных с завода в Ок-Ридже, Сегре приходит к заключению, что плутоний не годится для «пушечного» варианта. 4 июля этого же года Оппенгеймер сообщил эту информацию сотрудникам Лос-Аламоса.

Опыты Сегре с большими количествами урана-235 показали, что фон спонтанного деления урана-235 очень незначителен и поэтому можно иметь меньшую начальную скорость заряда в пушке и уменьшить длину заряда на пушечном сближении с 5 до 1,8 м.

21 апреля 1944 г. на заседании Управляющего комитета Парсонс отметил ряд ключевых проблем, без решения которых невозможно сделать конструкцию атомной бомбы на сближении: ядерно-физические свойства плутония, критичность в реальной конфигурации орудия, фон от активных материалов и стойкость к динамическим нагрузкам. В начале июля 1944 г. Парсонс окончательно понял, что атомная бомба с плутонием на сближении не будет «работать» из-за высокой вероятности «преддетонации», которая реализуется из-за наличия большого фона спонтанного деления плутония-240.

17 июля 1944 г. на совещании в Чикаго было принято решение об изменении приоритетов в программе создания атомной бомбы и использовании в этих целях принципа имплозии. В августе 1944 г. генерал Л. Гровс в докладе председателю Комитета начальников штабов генералу Дж. Маршаллу отметил, что он надеется к июню 1945 г. получить несколько атомных бомб на принципе имплозии, а к августу 1945 г. будет готова атомная бомба на принципе сближения (на основе урана-235).

После установления факта невозможности создания плутониевой бомбы на принципе сближения программа работ по имплозии стала важнейшей. Опенгеймер пригласил сотрудников теоретического отдела Бете для анализа вопросов физики имплозии; на этом этапе Теллер сделал ряд новых расчетов и в январе 1944 г. он стал руководителем группы по теории имплозии. Однако, Теллер постоянно «уклонялся» от этих работ, считая приоритетными работы по водородной бомбе.

Дж. фон Нейман попросил С. Улама участвовать в разработке вопросов гидродинамической имплозии. Улам уже в апреле 1944 г. провел численные расчеты, которые позволили определить характеристики имплозивной бомбы. Следует отметить, что в начале 1944 г. к работам по атомной бомбе в Лос-Аламосе приступили британские ученые (Р. Пайерлс, К. Фукс и др.).

3. Расширение работ по имплозии. Одновременно с теоретическими был расширен фронт экспериментальных работ. В апреле 1944 г. английский физик Дж. Так предложил конструк-

цию взрывных линз, которые подрывались синхронно с помощью электродетонаторов. Теоретические расчеты проводил Дж. фон Нейман. Всего было взорвано около 20 тыс. линз для отработки. В конце декабря 1944 г. испытание линз успешно завершилось.

На начальном этапе программы имплозии (первые 1,5 года) из-за большого разброса времени электрических детонаторов рассматривался и исследовался подрыв ВВ с использованием единственного электрического детонатора, который через детонационный шнур подрывал ВВ через промежуточные таблетки чувствительного ВВ (система Primacord).

Эволюция системы инициирования шла от использования детонаторов на основе азидов свинца, который подрывался электрическим импульсом (разработка британских специалистов (апрель 1944 г.)). Кистьяковский и Парсонс организовали масштабные исследования (более 1000 испытаний детонаторов), и спустя месяц Альварес с сотрудниками решил принципиальный вопрос о безопасном детонаторе, используя мощный разряд конденсатора для подрыва ВВ через возбуждение детонации ударной волной от взрыва «проволочки» (мостиковая схема). Система инициирования Альвареса обеспечивала разновременность 1 мкс.



Луис Альварес (1911–1988). Окончил Чикагский ун-т (1932). С 1936 г. – в Калифорнийском ун-те, с 1945 г. – профессор. В 1937 г. открыл К-захват электронов, в 1939 г. обнаружил гелий-3, в 1940 г. (в соавторстве) измерил магнитный момент нейтрона, предложил метод измерения скоростей по «времени пролета», создал первый протонный линейный ускоритель (1946). Открыл (1960) и исследовал новый вид элементарных частиц – резонансов (Нобелевская премия, 1968). В 1969 г. – президент Американского физического общества. В 1944 г. ему было 33 года.

По мнению Кистьяковского отработка и производство системы инициирования (детонаторы и автоматика подрыва) были сдерживающими факторами, едва не приведшими к срыву сроков испытания атомной бомбы. Технические обзоры, которые делались ведущими специалистами Лос-Аламоса, показывают, что летом 1944 г. были большие опасения в реализуемости имплозивного варианта. Кистьяковский и Парсонс

отразили в своих отчетах весь спектр проблем имплозии: плохая симметрия, неотработанность металлургии получения «больших» масс плутония, неотработанность системы инициирования и т. д.

В теоретическом отделе, возглавляемом Г. Бете, в эти годы работали блестящие физики: В. Вайскопф, Р. Сербер, Э. Теллер, Р. Маршак, С. Улам и с 1944 г. – британская группа – Р. Пайерлс, К. Фукс, Р. Кристи.

Виктор Вайскопф – член теоретического отдела в 1943–1946 гг.; в 1944 г. ему было 36 лет. Ричард Фейнман – член теоретического отдела в 1943–1945 гг.; в 1944 г. ему было 26 лет. Роберт Маршак – член теоретического отдела в 1944–1946 гг.; в 1944 г. ему было 28 лет. Станислав Улам – математик, в ЛАНЛ с 1943 г.; в 1944 г. ему было 35 лет. Рудольф Пайерлс – член теоретического отдела в 1944–1946 гг.; в 1944 г. ему было 37 лет.

Именно этими физиками были заложены основы нейтронной физики, включая решение уравнения Больцмана, теории эффективности бомбы (Бете, Фейнман, Нейман).

Большой объем пионерских работ выполнило отделение экспериментальной ядерной физики (Р. Division) под руководством Р. Бечера, которое помимо ядерно-физических исследований занималось разработкой диагностического оборудования.



Роберт Бечер (1905–2004). Окончил Мичиганский ун-т (1926). В 1935–1949 гг. – в Корнеллском ун-те. В 1943–1945 гг. возглавлял отдел экспериментальной физики в ЛАНЛ. В 1949–1976 гг. – профессор Калифорнийского технологического ин-та. Президент Американского физического общества (1964). Председатель Международного союза чистой и прикладной физики (1969–1972). Работы в области ядерной и нейтронной физики. В 1944 г. ему было 39 лет.

В первой половине 1944 г. развивались диагностические методы для измерения симметрии и степени сжатия (рентгеновские, оптические, магнитные методы, гамма-съемка). Широко стал использоваться бетатрон для «просвечивания» блоков. Эта группа имела постоянный контакт с Э. Ферми (Чикаго), который проводил ряд параллельных измерений, например, числа вторичных нейтронов при делении.

В Лос-Аламосе в начале 1943 г. для работ с плутонием была организована небольшая группа химиков и металлургов. С расширением этих групп началось научное соревнование между разными лабораториями. В целом соревновательный дух был свойствен организации работ в Атомном проекте США (кстати, больших зарплат и наград участники проекта не получали). Одновременно регулярно собирались межлабораторные семинары по обсуждению результатов.

Важное предложение было сделано по имплозивной бомбе канадским физиком Робертом Кристи, который предложил использовать сплошное ядро из плутония. Это был важный шаг, поскольку вопросы реализации компактирования при сжатии оболочки требовали обеспечения газодинамической устойчивости этого процесса, что представлялось серьезной проблемой.



Роберт Кристи (1916–2012). Окончил ун-т Британской Колумбии (Канада). Аспирант Р. Оппенгеймера в Калифорнийском ун-те, доктор философии (1941). Работал в Чикагском ун-те у Э. Ферми по проекту первого ядерного реактора. Член теоретической группы ЛАНЛ. Работал в Калифорнийском ун-те, президент Калифорнийского технологического ин-та (1977–1978). Работы в области астрофизики. В 1944 г. ему было 28 лет.

В конце февраля 1945 г. было проведено совещание руководителей Атомного проекта США для выбора наилучшего варианта конструкции плутониевой бомбы. Хотя к этому времени экспериментально еще не доказали эффективность сжатия сплошного ядра, было принято решение двигаться по этому основному пути, и установлен срок готовности бомбы (Дж. Кистяковский только в марте экспериментально доказал эффективность сжатия ядра).

Для концентрации работ в марте 1945 г. Оппенгеймер разделил работы в Лос-Аламосе на два проекта: «Тринити» (имплозивная плутониевая бомба) и «Алберта» (урановая бомба). Следует отметить, что в процессе работ проводилась тщательное документирование результатов исследований с выпуском соответствующих отчетов. Об интенсивности работ по имплозии свидетельствует выпуск пятитомной серии отчетов по теории имплозии (К. Фукс был одним из авторов этого труда).



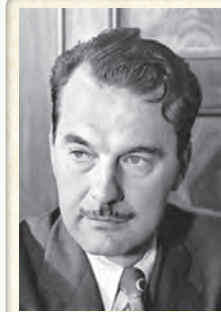
Джордж (Георгий Богданович) Кистьяковский (1900–1982). Родился в Киеве. Окончил Берлинский ун-т. В 1925 г. защитил докторскую диссертацию по проблеме разложения светом оксида хлора. Автор книги «Фотохимические процессы» (1928). С 1930 г. преподавал в Гарвардском ун-те. С 1940 г. – консультант отдела по разработке ВВ NRDC, с 1941 г. – член Комитета по атомной энергии Национальной академии наук. С 1943 г. – консультант ЛАНЛ, в 1944–1946 гг. – начальник отдела по разработке ВВ для атомной бомбы. Разработал бортол и отработал метод имплозии. С 1946 г. – в Гарвардском ун-те, в 1953–1958 гг. – член Комитета МО по баллистическим ракетам. В 1959–1961 гг. – советник Президента США по науке и технике. В 1968 г. оставил должность в правительственных учреждениях в знак протеста против войны во Вьетнаме. Занился общественной деятельностью (Совет за создание в мире достойных условий жизни для человека). В 1944 г. ему было 44 года.

С осени 1943 г. до лета 1944 г. была организована хорошо скоординированная работа теоретиков, экспериментаторов, конструкторов. Дж. Кистьяковский окончательно перебрался в Лос-Аламос в начале 1944 г. в качестве заместителя Парсонса по имплозии. Он незамедлительно организовал диагностику экспериментов, которых проводилось множество, особенно на моделях.



Вернер фон Браун (второй справа) в США

В начале января 1944 г. теоретическая группа Э. Теллера наметила детальную программу экспериментов по имплозии (цилиндрической и сферической) и достаточно быстро построила уравнения состояния (Р. Фейнман, Н. Метрополис, Э. Теллер), которые использовались во всех гидродинамических вычислениях.



Николас Метрополис (1915–1999). Окончил Чикагский ун-т (1937), с 1941 г. – доктор философии. 1943–1948 гг. работал в ЛАНЛ. Один из создателей метода Монте-Карло. Руководитель проектов по созданию первых электронных компьютеров MANIAC в ЛАНЛ. В Чикагском ун-те в 1957–1965 гг. руководил институтом компьютерных исследований. В 1965–1980 гг. работал в ЛАНЛ. ВЦ ЛАНЛ присвоено имя Николаса Метрополиса. В 1944 г. ему было 29 лет.

Пайерлс впервые появился в Лос-Аламосе в самом начале 1944 г. для координации работ британской группы. Было решено, что британской команде необходимо продолжить работы по линзам для имплозии, которые предложил английский физик Дж. Так. В дальнейшем Дж. фон Нейман разработал конкретную конструкцию линз. Английские ученые также разрабатывали методики расчета распространения ударной волны от взрыва атомной бомбы.

Были начаты численные расчеты, технологию которых Пайерлс представил американским теоретикам (пошаговое решение дифференциальных уравнений). Г. Бете и Р. Оппенгеймер немедленно стали реализовывать эту технологию. В июне 1944 г. Г. Бете вывел Э. Теллера из состава теоретического отдела (ответственного за имплозию) и поручил заниматься теорией имплозивной бомбы английской команде во главе Р. Пайерлсом (там же работал К. Фукс). Э. Теллер сосредоточился на исследованиях проблемы создания водородной бомбы (Super). Первые детальные расчеты гидродинамического взрыва были обобщены Г. Бете в июне 1945 г. (в том числе с применением внутреннего нейтронного источника).

Расчеты энерговыделения бомбы были существенным образом ускорены после прихода Р. Фейнмана к руководству расчетами и установления тесного контакта с теоретиками группы Вайскопфа. В июне 1945 г. теоретики оценивали мощность первой атомной бомбы в диапа-

зоне 4000–13000 тонн ТЭ. В последний момент в конструкцию атомной бомбы были внесены изменения, уменьшающие вероятность «преддетонации». Американские исследователи считают выдающимся достижением решение многопараметрической нелинейной задачи вычисления мощности бомбы, которое было получено Бете и Фейнманом.

Для подтверждения «работоспособности» имплозивной бомбы (в отличие от бомбы на сближении с U-235) в начале 1944 г. было принято решение провести ее полномасштабное испытание. Осенью 1944 г. выбрали место для испытания – Аламогордо в штате Нью-Мехико. Идея предварительного испытания имплозивной бомбы была высказана еще в конце 1943 г. Дж. фон Нейманом и поддержана в Лос-Аламосе в январе следующего года несмотря на то, что это испытание могло привести к масштабному радиоактивному загрязнению территории США. Л. Гровс поставил условие, что взрыв должен быть произведен в контейнере Jumbo с целью возможного последующего извлечения плутония (он предложил сделать взрыв неполномасштабным).

В программе, принятой в феврале 1945 г., планировалось провести ядерное испытание в Аламогордо не позднее 4 июля 1945 г. (ко Дню независимости США). Задержка произошла из-за проблем получения стабильных характеристик дельта-фазы плутония, которую решил С. Смит – руководитель металлургической лаборатории, предложивший использовать легирующие добавки.

4. Производство делящихся оружейных материалов определяет сроки испытания атомной бомбы. На конференции в Чикаго под руководством А. Комптона было определено, что Чикагская исследовательская группа (Г. Сиборг) совместно с группой из Беркли будут ответственными за металлургию и получение металлического плутония (Чикагская металлургическая лаборатория). Ключевым событием стала разработка под руководством Э. Ферми и пуск 2 декабря 1942 г. первого ядерного реактора CP-1.

В начале 1942 г. все работы по плутонию координировались металлургической лабораторией Чикагского университета под руководством А. Комптона. Сирил Смит руководил работами по металлургии плутония (является автором предложения стабилизации δ -фазы плутония легирующими добавками).



Сирил Смит (1903–1992). Британский металлург и историк физики. Окончил Бирмингемский ун-т и Массачусетский технологический ин-т. В 1942 г. работал в Металлургическом военном комитете США. Участник работ в ЛАНЛ. После работы в Чикагском ун-те. В 1944 г. ему был 41 год.

Английские физики детально рассматривали диффузионные методы обогащения урана в 1940–1941 гг. и познакомили специалистов США с этими методами во время их визита в Англию в 1941 г. На начальном этапе Атомного проекта рассматривались четыре возможных варианта разделения изотопов урана: газовая диффузия через пористые перегородки, разделение изотопов в газовых центрифугах, термическая диффузия в жидкости, электромагнитное разделение.

В 1942 г. были намечены только принципиальные пути для получения делящихся материалов, но не было очевидным, какой путь приведет к успеху до окончания войны. Поэтому было принято решение одновременно создавать крупномасштабное производство для получения плутония-239 и урана-235. Работа велась на малых моделях и одновременно строились реакторы и разделительные производства. Фактически с сентября 1942 г. началось строительство трех заводов по производству высокообогащенного урана (г. Ок-Ридж, штат Теннесси).

Завод Y-12 использовал для сепарации электромагнитный процесс, завод K-25 для этой же цели использовал процесс газовой диффузии. Позднее к этим двум заводам был добавлен третий – термодиффузионный S-50 (производство низкообогащенного урана), поскольку завод K-25 никак не мог выйти на проектные показатели вплоть до августа 1945 г. До своего полного ввода в строй завод K-25 поставлял на завод Y-12 низкообогащенный уран, который использовался на этом заводе в качестве стартового материала для повышения степени обогащения до оружейных кондиций. Весь высокообогащенный уран, использованный для создания первой атомной бомбы, сброшенной на Хиросиму, был получен на заводе Y-12.

В марте 1944 г. в Лос-Аламос отправлена первая партия урана-235 (несколько десятков граммов) из Ок-Риджа, полученная Э. Лоурен-

сом на ускорителях альфа-калютронах. После пуска бета-калютронов Э. Лоуренс считал, что к середине 1945 г. необходимое количество урана-235 будет получено. К сентябрю 1944 г. завод Y-12 поставил в Лос-Аламос примерно 1 кг высокообогащенного урана-235 со степенью обогащения ~63 %, а к июлю 1945 г. поставлены ~50 кг ВОУ со степенью обогащения ~89 %. Из этого урана и была изготовлена атомная бомба Little Boy, сброшенная на Хиросиму 6 августа 1945 г.

К осени 1944 г. ясно обозначились проблемы с получением оружейного урана – было произведено всего несколько фунтов обогащенного урана вместо ожидаемой тонны. Первый промышленный реактор по наработке плутония был запущен в Хэнфорде 26 сентября 1944 г., но только 17 декабря 1944 г. началось полномасштабное производство плутония. В 1944 г. американские исследователи «работали» с миллиграммовыми и граммовыми количествами плутония (с ними было произведено более 2500 экспериментов). Килограммовые количества плутония начали поступать в Лос-Аламос лишь с мая 1945 г. Следует отметить очень большой объем работ с плутонием химиков и металлургов Лос-Аламоса для того, чтобы в июле 1945 г. изготовить из него 2 полушария, необходимых для первой атомной бомбы.

В Хэнфорде до 1950 г. было построено пять реакторов-наработчиков оружейного плутония. Реактор В был запущен в сентябре 1944 г., D – в декабре 1944 г., F – в феврале 1945 г., H – в октябре 1949 г., DR – в октябре 1950 г. Тепловая мощность реакторов составляла 250 МВт для реакторов В, D, F, DR; для реактора H – 650 МВт. В 1950 г. в Хэнфорде были внесены конструктивные изменения с целью увеличения мощности реакторов (всего в Хэнфорде сооружено 9 реакторов, которые были остановлены в 1987 г.). Таким образом, именно получение кондиционных оружейных материалов определило сроки испытания и применения ядерного оружия.

5. Заключительные этапы работы по имплозии. Ядерное испытание в Аламогордо. В Лос-Аламосе на заключительном этапе был разработан жесткий график завершения работ с целью испытания и применения атомных бомб еще до окончания Второй мировой войны.

15 марта – 15 апреля – доработать детонаторы и провести подготовку к их массовому производству.

2 апреля – завершить изготовление литейных форм для линз и провести подготовку к отливке линз из взрывчатых веществ, признанных наилучшими.

15 апреля – изготовить достаточно линз для многоточечного инициирования детонации.

25 апреля – начать испытания полусфер и измерить параметры сходящихся ударных волн.

15 мая – полномасштабная опытная проверка метода имплозии для доказательства обжатия сплошного металлического ядра.

15 мая – 15 июня – подготовить достаточное количество плутония, изготовить полномасштабные сферические детали и провести испытания на критичность.

4 июня – начать подготовку к полигонным испытаниям бомбы – завершить отливку линз и установить детонаторы.

4 июля – полигонное испытание бомбы с плутониевым ядром в местечке Аламогордо (испытание Trinity).

Напомним, что фактически испытание было проведено 16 июля 1945 г. Окончательно конструкция плутониевой бомбы была определена после успешного экспериментального подтверждения сжатия сферы в марте-апреле 1945 г. Задержка с испытанием не допускалась, поскольку на 16 июля была назначена встреча Трумэна, Сталина и Черчилля в Потсдаме. Взрывные линзы были готовы только 7 июля; их разместили в заряде и через 8 часов доставили сборку на место испытания.

В апреле Р. Бечер назначил двух инженеров ответственными за заключительные операции по сборке центральной части на испытательном поле (до этого они выполнили тренировочную сборку в Лос-Аламосе). В мае Кистяковский предложил ряд усовершенствований для упрощения сборки заряда («люк»). Особенно это было существенно в условиях боевого применения атомной бомбы. В Лос-Аламосе 11–12 июля была произведена сборка заряда без плутониевого ядра, которое предполагалось вставить через люк уже на месте испытания. 13 июля вечером атомная бомба была установлена на башне.

В конце 1944 г. – первой половине 1945 г. Г. Бете поставил ряд задач по прогнозированию эффектов воздействия ядерного взрыва, развития огненного шара, а также выяснения влияния на них погодных условий (дождя, тумана). Эта работа велась совместно с британскими физиками. Результаты исследований использовались при постановке измерений и обеспечении

безопасности персонала при первом испытании. При атомных бомбардировках Хиросимы и Нагасаки по этой методике выбиралась высота подрыва для обеспечения максимального поражения и минимизации радиоактивного загрязнения местности.

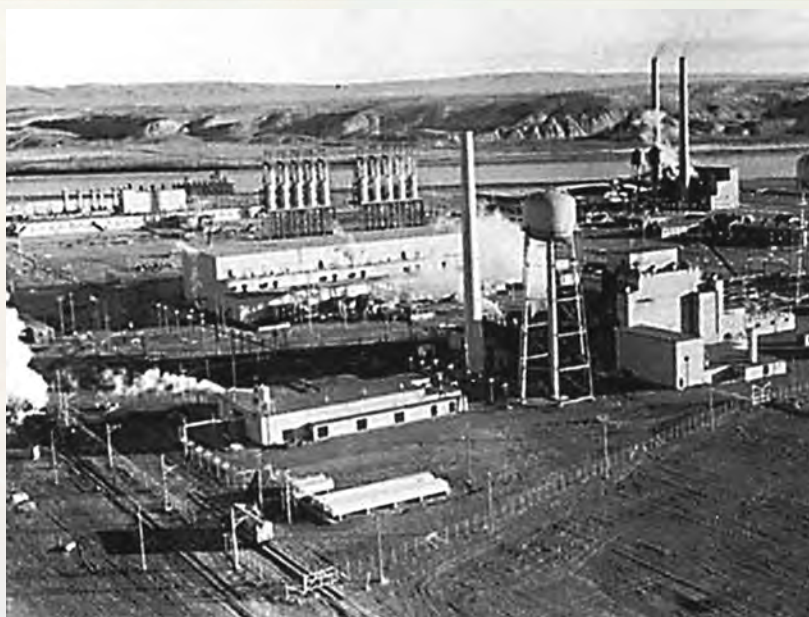
28 февраля 1945 г. Р. Оппенгеймер, Л. Гровс, Дж. Конэнт, Дж. Кистяковский принимают решение о выборе конструкции плутониевой бомбы, которая должна быть испытана в Аламогордо на основе предложения Кристи (Cristy design). В апреле 1945 г. Эрик Джет с сотрудниками установил, что 3 % галлия (по атомам) могут стабилизировать δ фазу плутония. Для военного применения плутониевые полусферы были поставлены 26 июля (после испытания в Аламогордо). Завершенная в середине апреля 1945 г. К. Фуксом, Г. Бете теория работы нейтронного инициатора позволила надеяться на успешный результат изделия.

В 13 часов 13 июля началась окончательная сборка, Н. Бредбери руководил сборкой. 16 июля 1945 г. в 5 часов 30 минут начался отсчет ядерному веку.

19 июля 1945 г. Р. Оппенгеймер в телеграмме Л. Гровсу предложил использовать уран-235 из Little Boy, чтобы сделать составное ядро из урана и плутония в имплозивной бомбе.

Как видно из представленных материалов, США не могли по временным ограничениям реальных сроков применить плутониевую бомбу против Германии. Проблемы конструирования урановой бомбы на сближении были успешно решены в Лос-Аламосе до начала 1945 г., но США не смогли наработать необходимое количество урана. Следует отметить, что первоначально по планам 1943 г. урановый и плутониевый варианты зарядов на сближении должны были готовы летом 1945 г.

Как признавали сами руководители Атомного проекта США, плутониевый вариант бомбы представлялся единственно реальным проектом, позволяющим изготовить атомную бомбу до окончания Второй мировой войны. Разработчики Лос-Аламоса понимали, что для достижения этой цели необходимо разработать достаточно простой и надежный вариант имплозивной бомбы. Варианты с левитацией, тритиевым усилением, составными ядрами и т. д., которые они



Плутониевый реактор. Хэнфорд

рассматривали, были оставлены «на потом» (1946–1950 гг.).

Ученые Лос-Аламоса уже в начале 1946 г. вернулись к конструкциям атомных бомб имплозивного типа, физические схемы которых, по их мнению, более эффективны (они рассматривались в течение 1943–1945 гг.).

В мае 1945 г. была создана группа в Лос-Аламосе для исследования возможности создания имплозивного варианта на основе композитного сердечника, «чтобы более эффективно использовать ораллой (уран-235) с плутонием». К весне 1946 г. была разработана конструкция и к началу 1947 г. композитные «подвешенные» сердечники (схема «левитации») были введены в арсенал США (до их проверки в натуральных испытаниях) в составе бомбы МК-III, которая стояла на вооружении до 1950 г. Первые полномасштабные испытания составных сердечников и «подвешенных» центральных частей были выполнены во время операции Sandstone, которые проводились с 14 апреля по 14 мая 1948 г. Прямой эффект этих испытаний заключался в том, что стало возможно на 63 % увеличение количества бомб в арсенале и на 75 % мощности этих бомб.

Одновременно развивалась идея полых сердечников. Эксперименты в Лос-Аламосе показали их эффективность с одной стороны, а с другой стороны – сложность обеспечения гидродинамической устойчивости, поэтому их детальная обработка была отложена до окончания войны.

6. Новый стиль научно-технических работ.

Следует отметить, что Оппенгеймер и Гровс сумели организовать работу лаборатории, создав мультидисциплинарные группы специалистов, тесно увязав решение научных, инженерно-конструкторских, экспериментальных и технологических работ в единую систему, нацеленную на создание нового плутониевого варианта атомной бомбы до окончания войны.

Безусловно, основой проекта были блестящие ученые XX века: Г. Бете, Р. Фейнман, Р. Пайерлс, Э. Теллер, Дж. фон Нейман, Л. Альварес, Дж. Кистяковский, а также другие выдающиеся специалисты. С 1933 по 1941 г. более 100 физиков перебрались из Европы в США. Такие выдающиеся ученые, как А. Эйнштейн, Э. Ферми, Г. Бете, Дж. фон Нейман, Э. Теллер, Ю. Вигнер, Л. Сцилард, Н. Бор, Э. Сегре внесли выдающийся вклад не только в Атомный проект, но и в развитие науки в США. Только из Великобритании в Лос-Аламосе работало 19 первоклассных специалистов.

Ученым необходимо было изменить свой традиционный методологический научный подход «познания» на подход создания в заданное время надежного в военном смысле «изделия» (даже вопреки существенно более эффективным конструкциям). Одновременно с созданием бомбы решались вопросы ее боевого применения, а также создавались новая экспериментальная ядерная физика и вычислительная математика.

Впечатляет масштаб перехода от результатов фундаментальных исследований на «микроуровне» к проектированию и строительству новых гигантских заводов. Например, масштабы лабораторных (циклотронных) исследований плутония отличались от масштаба завода в Хенфорде в 10^{10} раз. Прошло всего 27 месяцев от начала Манхэттенского проекта до боевого применения атомных бомб, что позволило США во многом влиять на конфигурацию мира вот уже 70 лет.

По мнению американских исследователей, лаборатория в Лос-Аламосе, вероятно, была одной из наиболее эффективных исследовательских организаций за все время существования науки. Для нашего времени удивительным был стиль работы в Лос-Аламосе: большинство персонала лабораторий составляли молодые люди 25–35 лет, к работам привлекались дипломники университетов (под началом Э. Сегре в работах по определению фона спонтанного деления участвовало несколько таких выпускников).

Сплав молодых ученых с учителями мирового класса, ясное понимание целей проекта, уме-

ние администрации сконцентрировать ресурсы на нужных направлениях, отказ от второстепенных проектов, а также от тех, которые не могли быть выполнены до окончания войны, привели к таким выдающимся результатам за столь короткое время.

Следует отметить приоритет ученых над менеджерами в работе над Атомной бомбой. Именно ученые (руководители направлений) формировали программы, планы, сроки. Решения принимались на Управляющем комитете. Важным представляется также непрерывная связь теоретиков и экспериментаторов.

Выделение значительных ресурсов во многих случаях позволяло методом проб и ошибок компенсировать неполное знание о явлениях и процессах.

Подводя итоги, можно сказать, что принцип имплозии явился результатом творчества целого ряда специалистов. Автор исходной идеи возможности использования имплозии для создания атомной бомбы неизвестен. Сам процесс имплозии при взрывных работах, по-видимому, был достаточно известен. Идея компактирования при имплозии отмечалась Р. Толменом.

Экспериментальные доказательства компактирования материала при имплозии были получены С. Неддермайером. Эти исследования на первом этапе проводил Дж. фон Нейман. Р. Кристи предложил сжатие сплошного ядра при имплозии и установил его влияние на надкритичность. Дж. Так изобрел линзовую систему для управления формированием детонационной волны. Дж. Кистяковский поставил газодинамические исследования имплозии на твердую научную основу.

Принцип имплозии появился исключительно вовремя, т. к. без него плутониевой проект атомной бомбы «завис» бы как в США, так и в СССР.

АНДРЮШИН Игорь Алексеевич –
главный научный сотрудник ИТМФ РФЯЦ-
ВНИИЭФ, доктор техн. наук,
лауреат Государственной премии

ЧЕРНЫШЕВ Александр Константинович –
член-корреспондент РАН, зам. научного
руководителя РФЯЦ-ВНИИЭФ, начальник отдела
ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ, лауреат Государственной
премии