

ЯДЕРНЫЕ «УБИЙЦЫ БУНКЕРОВ» СКОРЕЕ РАЗБРОСАЮТ, ЧЕМ УНИЧТОЖАТ ПОДЗЕМНЫЕ ЗАПАСЫ БИОЛОГИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ АГЕНТОВ

Роберт У. Нелсон

Использование проникающих в землю ядерных боеприпасов для атаки упрочненных бункеров для хранения химического или бактериологического оружия, по-видимому, не позволит уничтожить или нейтрализовать агенты. Более вероятно, что взрыв разбрасывает активные химические или бактериологические агенты в окружающую среду, потенциально увеличивая потери, уже ожидаемые от интенсивного выпадения радиоактивных осадков. Прямое ядерное излучение и тепло от ядерного взрыва на небольшой глубине сначала поглощается плотным скальным грунтом или землей вблизи боеголовки, испаряя и расплавляя грунт до радиуса $R \approx 5 W^{1/3}$ метров для взрыва с энергией W килотонн. Сильная сейсмическая волна разрушает скальный грунт до примерно в 10 раз больших расстояний, $R_s \approx 50 W^{1/3}$ метров. Горячие газы в расширяющейся полости, действующие как поршень, после выбрасывают этот разрушенный материал без заметного нагрева. Простые энергетические ограничения показывают, что только небольшая доля материала кратера, находящаяся вблизи взрыва, может достичь высоких температур и получить уровни радиации, необходимые для разрушения химических и биологических агентов. Боеприпасы с агентами, расположенные за пределами небольшой стерилизационной зоны, но внутри объема окончательной воронки, будут разрушены взрывной волной и выброшены вместе с радиоактивными осадками.

Более разумная стратегия должна использовать обычные средства для закрытия всех входов и выходов в хранилища и поддержания их закрытыми до тех пор, пока не будет захвачена территория и можно будет провести осторожную нейтрализацию.

Статья получена 1 марта 2003 г. и принята к опубликованию 12 июня 2003 г.

Автор хотел бы поблагодарить Грегга Мело, который внес вклад в первоначальную концепцию этого проекта, и Фрэнка фон Хиппеля за его вдумчивое руководство. Он выражает признательность за полезные обсуждения Сиднею Дреллу, Харолду Фейвесону, Ричарду Гарвину, Скотту Кемпу, Заку Халдеману, Майклу Леви, Майклу Мэю и Павлу Подвигу.

Автор – сотрудник совета по международным отношениям и участник программы по науке и всеобщей безопасности в Принстонском университете, Принстон, Нью Джерси, США.

Почтовый адрес: Robert W. Nelson, Princeton University, Program on Science and Global Security, H0213E-Quad, Princeton, NJ, USA. Электронный адрес: rnelson@princeton.edu

ВВЕДЕНИЕ

Военные США все более обеспокоены распространением глубоких подземных упрочненных бункеров, которые не могут быть уничтожены обычными вооружениями, в особенности тех, которые могут быть использованы для хранения химических и биологических агентов^{1,2}. В недавнем обзоре ядерной позиции отмечается, что в 1998 году «было известно или предполагалось о существовании примерно 1100 подземных сооружений для стратегических задач, оружия массового поражения, базирования баллистических ракет, командных пунктов, пунктов управления, и размещения руководства или главного командования»³.

¹ M. G. G. L. Curtin and G. W. Ullrich, 'The Threats Go Deep: Rogue Nations are Using Deeper and Stronger Bunkers, Mines, and Caves to Protect Their Nuclear, Chemical, and Biological Facilities.' *Air Force Magazine*, Oct. 1997, 47-49.

² Lt. Colonel Eric M. Sepp, *Deeply Buried Facilities: Implications for Military Operations* (Occasional Paper No. 14): Center for Strategy and Technology, Air War College. (2000). Доступно в сети Интернет по адресу https://research.au.af.mil/papers/special_collection/csat/csat14.pdf (1 April 2004).

³ U.S. Department of Defense, *Nuclear Posture Review*. (2001). Доступно в сети Интернет по адресу <http://www.globalsecurity.org/wmd/library/policy/dod/npr.htm> (1 April 2004).

Подземные строения, защищенные более, чем 10 метрами железобетона, не могут быть разрушены обычными проникающими в грунт бетонобойными боеприпасами, такими, как GBU-28, впервые использованными в войне в Персидском заливе в 1991 г. Как показано в предыдущей статье, бетонобойный боеприпас, изготовленный из наиболее прочного материала, не может проникнуть в бетон или скальный грунт глубже, чем примерно на 10 – 20 метров, не разрушив себя из-за возникающих при ударе экстремальных напряжений⁴.

Даже если бункер расположен на относительно небольшой глубине, то может оказаться опасным атаковать подозреваемое хранилище химического и бактериологического оружия обычными боеприпасами. Хотя взрывная волна может оказаться достаточно сильной для раздробления железобетона, обрушения несущих конструкций, нарушения коммуникационных линий, внутренней трубопроводной сети и вентиляционных шахт, и разрушения тяжелого оборудования, химические или биологические агенты будут оставаться токсичными, если только они не были подвержены воздействию высоких температур или нейтрализующих химических веществ в течение достаточно продолжительного периода времени. Фактически, в этом процессе более вероятно не уничтожение, а распространение химических или биологических веществ. Хотя газообразные продукты химической детонации могут обладать температурой в несколько тысяч градусов Цельсия, температурный пик продолжается всего лишь несколько секунд, что слишком мало для стерилизации полных емкостей с химическими или биологическими агентами – факт, вполне понятный для тех, кто быстро проводил пальцами через пламя свечи⁵.

Имеется также опасность того, что взрыв бункера, заполненного химическим или бактериологическим материалом, выбросит активные агенты в окружающую среду и распространит их в ней, возможно, подвергнув их действию расположенных под ветром гражданских лиц или военный персонал. Опасения по поводу известных случаев «синдрома войны в Персидском заливе» заставили Министерство обороны рассмотреть возможность того, что эти заболевания были связаны с выбросом зарина вслед за разрушением складского бункера в Хамисии, Ирак, обычными бомбами⁶. Боеголовка с одной тонной взрывчатого вещества производит пиковое избыточное давление, превышающее 100 килобар, а скорости разлета могут превышать 8000 м/сек⁷. Импульс давления достаточен для того, чтобы создать воронку в скальном грунте с радиусом около пяти метров. Однако, такой взрыв может также распространить химические агенты в атмосфере. А именно, как отметил Стив Янгер, гражданский директор оборонного агентства по сокращению угрозы:

«В некоторых случаях вы можете не захотеть проведения взрыва, потому, что взрыв может привести к нежелательному эффекту разбрасывания материала по местности, что не только приведет к отрицательным последствиям побочного ущерба, но и также осложнит ситуацию последующего ввода наших наземных войск... Взорвать – это не так просто⁸.»

По этой причине ВМС США и оборонное агентство для предотвращения угрозы начали демонстрационную программу боеголовки для уничтожения агента для разработки кинетического проникающего боеприпаса, соединенного с зажигательной боеголовкой низкого давления⁹. Боеприпас должен проникнуть во внутреннее помещение и после этого будет подожжено «термически-коррозионное» наполнение, способное в течение нескольких минут поддерживать высокие температуры, превышающие 2000 °F (1170 °C) без выброса содержимого в окружающую среду. Состав HTI-J1000, например, комбинирует высокотемпературные взрывчатые вещества для поджигания химических агентов с дезинфицирующим хлором и кислотами для нейтрализации биологических

⁴ R. W. Nelson, Low-Yield Earth-Penetrating Nuclear Weapons. *Science & Global Security* 10, 1-20.

⁵ В самой горячей области пламени свечи горение происходит при температуре около 1300 градусов Цельсия, что достаточно для стерилизации любого биологического материала. Однако, кратковременное воздействие пламени на кожу не сопровождается ее повреждением или появлением боли из-за того, что перед нагревом ткани сначала должен испариться тонкий слой влаги.

⁶ C. Fulco, C. T Liverman, H. C. Sox, and Institute of Medicine (U.S.). Committee on Health Effects Associated with Exposures During the Gulf War. *Gulf War and Health* (National Academy Press, Washington, D.C., 2000).

⁷ P. D. Smith and J. G. Hetherington, *Blast and Ballistic Loading of Structures* (Butterworth-Heinemann, Oxford: Boston, 1994).

⁸ R. Burns, "Pentagon Considers Weapons Sites," *Washington Post*, 17 July 2002.

⁹ GlobalSecurity.org., *Agent Defeat Weapon*. Доступно в сети Интернет по адресу <http://www.globalsecurity.org/military/systems/munitions/adw.htm> (1 April 2004).

агентов¹⁰.

Недавно республиканское большинство в Конгрессе, Министерство обороны и руководители американских лабораторий ядерного оружия заявили, что США разрабатывают новое поколение проникающих в грунт ядерных боеприпасов – ядерных «убийц бункеров» - которые могут быть использованы для укрепленных глубоких подземных сооружений, в особенности тех, в которых могут находиться арсеналы биологического и химического оружия. В редакционных статьях проникающие в грунт ядерные боеприпасы представлялись как «идеальные средства дезинфекции» и в них утверждалось, что теплота от взрыва может раздробить агенты на атомы¹¹. Более формально такой взгляд был представлен в докладе конгрессу по уничтожению укрепленных глубоких подземных сооружений:

«Ядерное оружие обладает уникальной способностью уничтожать как емкости с агентами, так и сами химические и биологические агенты. Поражающая способность будет оптимальной, если светящаяся область будет приближена к цели. Это требует высокой точности; для подземных целей может потребоваться также система оружия с проникновением в грунт. Использование повышенной точности и способность проникновения покрывающих цель слоев вещества, для достижения необходимой нейтрализации можно будет использовать оружие намного меньшей мощности¹².» [курсив автора]

Как было показано в предыдущей статье, проникающий в землю боеприпас не способен проникнуть достаточно глубоко, чтобы ядерный взрыв стал камуфлетным. Взрыв выбросит из кратера радиоактивный грунт в количестве, достаточном для заражения окружающей области смертельно опасным уровнем радиоактивности (для взрыва в одну килотонну в радиусе нескольких километров)¹³.

Однако, менее хорошо известно, что даже проникающий в грунт ядерный боеприпас вряд ли сможет уничтожить подземные запасы химических или биологических агентов. Несмотря на исключительно высокие температуры и уровни радиации, достигаемые в непосредственной близости к ядерному взрыву, уничтожение находящихся под землей биологических или химических агентов может быть обеспечено только если боеприпас будет взорван в непосредственной близости к реальным емкостям.

Весьма важно, чтобы боеприпас проник внутрь бункера и взорвался рядом с тем самым подземным помещением, в котором хранятся емкости с биологическими и химическими агентами, что очень маловероятно, учитывая, что геометрия бункера не будет известна с какой бы то ни было точностью. В любом случае будет маловероятно, что все химические или биологические агенты в подземном комплексе будут храниться только в одном помещении. Размеры образовавшейся воронки будут намного больше, но это приведет к выбросу и распространению к атмосфере любого не уничтоженного химического или биологического материала внутри зоны кратера.

Простой взрыв бункера, заполненного химическими или биологическими агентами, даже с использованием ядерного оружия, может поэтому сопровождаться нежелательным эффектом распространения агентов, вместо их уничтожения. Если опасные материалы уже хранятся глубоко под землей, то наиболее разумная стратегия будет заключаться в том, чтобы обеспечить то, чтобы они оставались там, закрыт все входы и выходы в сооружение при помощи обычных средств, поддерживая их закрытыми до тех пор, пока территория не будет захвачена и агенты не будут осторожно нейтрализованы.

НЕКОТОРЫЕ ПРОСТЫЕ ОЦЕНКИ

¹⁰ GlobalSecurity.org., *HTI-J-1000 High Temperature Incendiary J-1000*. Доступно в сети Интернет по адресу <http://www.globalsecurity.org/military/systems/munitions/hti.html> (1 April 2004).

¹¹ J. E. Gover and P. G. Huray, "Not So Unthinkable: The World Today is Rife with Scenarios That Lead to the Use of a Nuclear Weapon." *IEEE Spectrum Online*, 28 February 2003. Доступно в сети Интернет по адресу <http://www.spectrum.ieee.org/WEBONLY/resource/mar03/speak.html>

¹² Department of Defense and Department of Energy. *Report to Congress on the Defeat of Hard and Deeply Buried Targets*: Submitted by the Secretary of Defense in Conjunction with the Secretary of Energy in response to Section 1044 of the Floyd D. Spence National Defense Authorization Act for the Year 2001, PL 106-398, July 2001. (2001). Доступно в сети Интернет по адресу http://www.nukewatch.org/nwd/HiRes_Report_to_Congress_on_the_Defeat.pdf (1 April 2004).

¹³ R. W. Nelson, Low-Yield Earth-Penetrating Nuclear Weapons. *Science & Global Security* 10, 1-20 (2002).

Ниже физика подземных ядерных взрывов рассматривается более подробно, но основной вывод легко понять на основе простых оценок «на обратной стороне конверта». Энергия, высвобождаемая в ядерном взрыве с энерговыделением W килотонн (в тротиловом эквиваленте) равна:

$$E = 10^{12} W \text{ калорий} = 4,2 \cdot 10^{12} W \text{ Дж} \quad (1)$$

Поскольку массовая плотность почвы или скального грунта в несколько тысяч раз больше, чем у воздуха,

$$\frac{\rho_s}{\rho_{air}} \approx 2000 \quad (2)$$

высокие температуры и мгновенные излучения, обычно ассоциируемые с ядерными взрывами, для подземного взрыва ограничиваются гораздо меньшими расстояниями. Действительно, даже если устройство взрывается под водой, и вся его энергия используется только для образования пара с температурой в 100°C , взрыв сможет испарить воду в полости, равной всего лишь

$$R_w = \left(\frac{3E}{4\pi\rho Q_v} \right)^{1/3} = 7,3W^{1/3} \text{ метра} \quad (3)$$

где $Q_v = 2,6 \cdot 10^6$ Дж/кг – теплота испарения воды и $\rho = 1000$ кг/м³ – плотность воды. Очевидно, что при подземном взрыве испарится еще меньшее количество грунта. Пример с испарением воды не является чисто гипотетическим, поскольку в большинстве типов грунта содержатся заметные количества воды. Поскольку испарившийся грунт конденсируется повторно, большая часть оставшегося газа прорывается из кратера в виде перегретого пара.

Размер воронки зависит от глубины взрыва и содержания воды в почве или скальном грунте. Как можно видеть из рис. 1, объем воронки обычно составляет $V \approx 10^5 W \text{ м}^3$, что соответствует радиусу видимой воронки приблизительно в $R \approx 50 W^{1/3}$ м и массе выброса примерно $M \approx 2 \cdot 10^{11} W \text{ г}^{14,15}$. Если вся высвободившаяся энергия пошла бы на нагрев выброшенного вещества, то средняя энергия в расчете на единицу массы составляла бы примерно:

$$\left\langle \frac{E}{M} \right\rangle \approx 21 \text{ кДж / кг} \quad (4)$$

Этого было бы достаточно для увеличения температуры выброса только на $5 - 20$ градусов, в зависимости от типа грунта и содержания воды.

Конечно, теплота от взрыва распределяется неоднородно и она в основном сосредотачивается в небольшой полости испаренного грунта и пара, которая расширяется и прорывается в атмосферу. Уравнение (4) показывает, что большая часть выбрасываемого материала никогда не достигает высоких температур – включая любые химические и биологические агенты, которые располагались за пределами первоначально испаренного объема материала. Отметим, что этот вывод не зависит от мощности боеприпаса, так что применение более мощной боеголовки не увеличит среднего нагрева, а только радиус полости.

Ядерное излучение

Прямое ядерное излучение от ядерного взрыва также будет недостаточным для уничтожения подземных запасов химических и биологических агентов, защищенных более, чем несколькими метрами почвы или скального грунта. Около 5 процентов от полной энергии, вы-

¹⁴ J. A. Northrop (ed.), *Handbook of Nuclear Weapon Effects: Calculational Tools Abstracted from DSWA's Effects Manual One (EM-1)* (Defense Weapons Special Agency, [Washington], 1977).

¹⁵ S. Glasstone, P. J. Dolan, U.S. Dept. of Defense, U.S. Dept. of Energy, and U.S. Defense Atomic Support Agency, *The Effects of Nuclear Weapons* (U.S. Dept. of Defense, [Washington], 1977).

свобожденной в ядерном взрыве, приходится на мгновенное нейтронное и гамма-излучение¹⁶. Для достаточно высокой дозы – порядка одного миллиона рад (1 Мрад) или больше¹⁷ – это излучение может уничтожить хранящиеся химические агенты, такие, как нервно-паралитические газы или бактерии сибирской язвы. Доза мгновенных нейтронов (в рад), полученная любым незащищенным агентом при точечном взрыве, приблизительно равна¹⁸:

$$D = 5 \cdot 10^{11} W \frac{e^{-k\rho R}}{R^2} \quad (5)$$

где R – расстояние в метрах, k – массовый коэффициент поглощения, и ρ – плотность. Для воздуха k = 0,037 см²/г и ρ = 1,12·10⁻³ г/см³, так что kρ ~ (240 м)⁻¹. Н kρ = (240 м)⁻¹. Таким образом, нейтронный поток в воздухе остается существенным для биологических материалов на расстояниях в сотни метров до источника. Не удивительно, что прямое нейтронное излучение от ядерного взрыва может уничтожить биологические агенты, если они хранятся на поверхности земли¹⁹.

Напротив, плотность скального грунта на три порядка величины больше, чем у воздуха. Для проникающей в грунт боеголовки, которая не взрывается внутри реального помещения хранения, или совсем рядом с ней, проникающее излучение будет поглощено почвой, скальным грунтом, или бетонными стенами (см. табл. 1). Данные по камуфлетным подземным ядерным взрывам показывают, что почти вся радиоактивность сосредоточена в стеклообразном материале толщиной 25 см, покрывающем полость²⁰. Следовательно, прямое ядерное излучение само по себе не сможет уничтожить химические и биологические агенты, хранящиеся на расстояниях, превышающих несколько приведенных метров от точки взрыва.

¹⁶ S. Glasstone, P. J. Dolan, U.S. Dept. of Defense, U.S. Dept. of Energy, and U. S. Defense Atomic Support Agency, *The Effects of Nuclear Weapons* (U.S. Dept. of Defense, Washington, 1977).

¹⁷ H. Kruger, *Radiation-Neutralization of Stored Biological Warfare Agents with Low-Yield Nuclear Warheads* (No. UCRL-ID-140193): Lawrence Livermore National Laboratory. (2000). Доступно в сети Интернет по адресу <http://www.llnl.gov/tid/lof/documents/pdf/238391.pdf>.

¹⁸ H. L. Brode, in *Annual Review of Nuclear Science* 153 (1968).

¹⁹ См. ссылку [17].

²⁰ G. W. Johnson, G. T. Pelsor, R. G. Preston, and C. E. Violet, *Underground Nuclear Detonation Of September 19, 1957, Rainier, Operation Plumbbob* (No. UCRL-5124): Lawrence Livermore National Laboratory. (1958). Доступно в сети Интернет по адресу <http://www.llnl.gov/tid/lof/documents/pdf/23306.pdf> (1 April 2004).

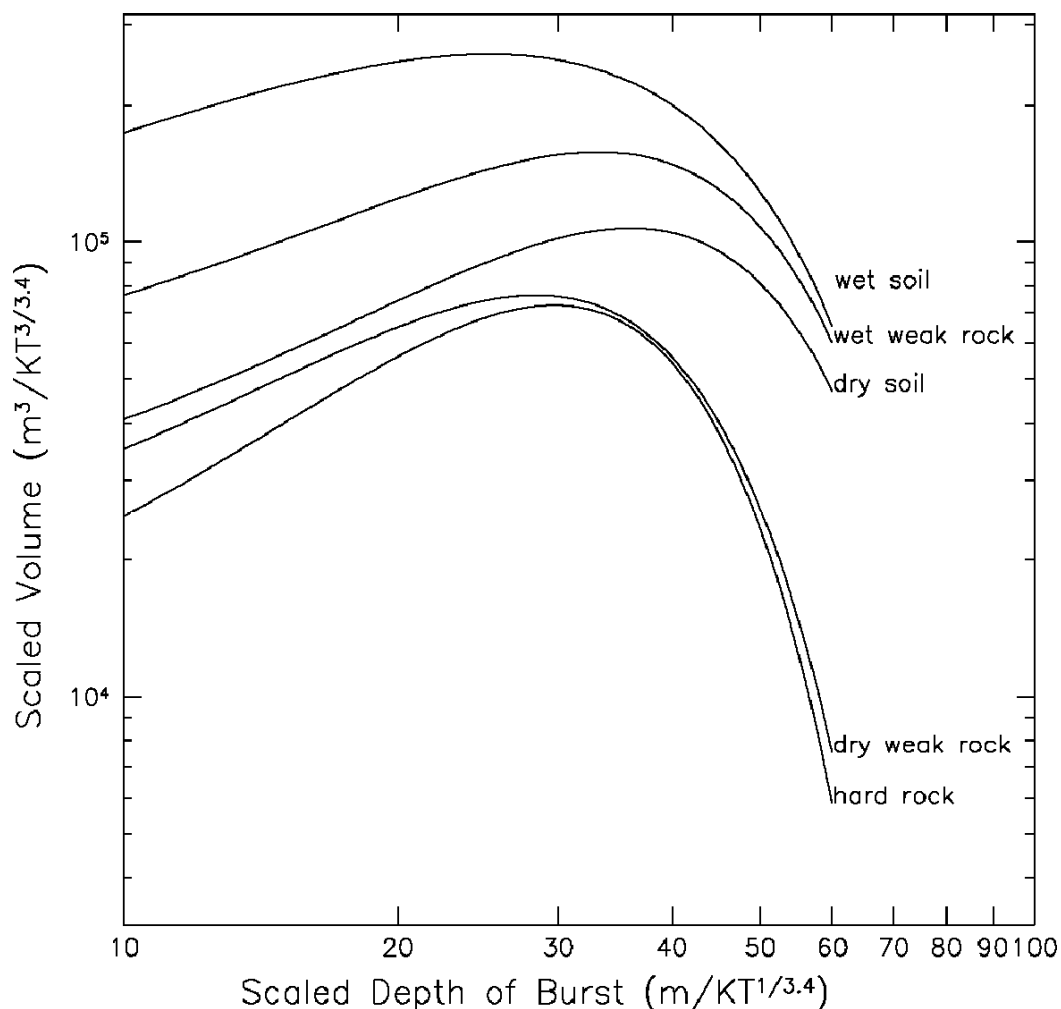


Рис. 1: Приведенный объем видимой воронки от подземного ядерного взрыва в зависимости от приведенной глубины взрыва $D/W^{1/3.4}$. Максимальный размер воронки наблюдается во влажной почве или в насыщенном скальном грунте из-за газового ускорения от пара высокого давления, и достигает максимума при приведенной глубине в 30 – 40 м. $W^{1/3.4}$. Видимый радиус и глубина связаны с видимым объемом соотношениями $R_a = 1,2 V_a^{1/3}$ и $D_a = 0,5 V_a^{1/3}$. Взрыв в 1 кт на глубине в 30 м образует воронку радиусом в 50 м. Кривые на рисунке соответствуют различным типам грунта (сверху вниз: влажная почва; влажный слабый скальный грунт; сухая почва; сухой слабый скальный грунт; прочный скальный грунт). Источник: Northrop, J. A. (ed.). *Handbook of Nuclear Weapon Effects: Calculational Tools Abstracted from DSWAs Effects Manual One (EM-1)* (Defense Weapons Special Agency, Washington, D.C., 1996).

В следующих разделах будут более детально рассмотрены физические условия в подземном ядерном взрыве и условия, необходимые для уничтожения химических и биологических агентов. Однако, представленные выше простые оценки уже показывают, что химические и биологические агенты вряд ли будут уничтожены ядерным взрывом, если они будут защищены слоем земли, скального грунта, или бетона, превышающим по толщине примерно 5 – 10 W метров.

Табл. 1. Параметр экранирования (в см) для прямого ядерного излучения в различных материалах.

Материал	Длина поглощения для быстрых нейтронов (см)	Длина поглощения для фотонов 0,5 МэВ (см)
Воздух	24 000	9 000
Вода	9,7	10,3
Бетон	11	4,5
Почва	17	6,8

Несколько метров воды, почвы, или бетона ослабляют проходящий поток нейтронов или гамма-квантов на несколько порядков величины. Длина поглощения быстрых нейтронов в почве и бетоне приблизительно, и она чувствительна к содержанию воды в материале.

НЕГЛУБОКИЕ ПОДЗЕМНЫЕ ЯДЕРНЫЕ ВЗРЫВЫ

На рис. 2²¹ показана последовательность событий вслед за неглубоким подземным ядерным взрывом.

Первая микросекунда после взрыва. Завершаются реакции деления или синтеза ядер, и сам боеприпас испаряется. Начальная температура вещества в материале оружия может достигать 10 миллионов градусов Цельсия, а давление – миллиона атмосфер.

Несколько миллисекунд. Расходящаяся ударная волна сначала сжимает скальный грунт и потом разгружает его. При давлениях выше 1 Мбар²² этот процесс термодинамически необратимо нагревает и испаряет грунт до радиуса около $2 W^{1/3}$ м, и расплавляет его до радиуса около $4 W^{1/3}$ м. Газы внутри образующейся полости имеют температуру, близкую равновесию пара и жидкости для грунта (около 4000 °С), и давление, на много порядков величины большее давления вышележащих слоев грунта. Взрывная волна продолжает распространяться со скоростью примерно 5 метров в миллисекунду, обгоняя границу расширяющейся полости. Хотя волна ослабляется с расстоянием, ее сила достаточна для раздробления скального грунта до радиуса примерно $50 W^{1/3}$ м.

10 – 50 миллисекунд. Взрывная волна достигает свободной поверхности и энергия сжатия начинает переходить в кинетическую энергию. Образующаяся волна разрежения после отражения распространяется вниз, позволяя сжатому грунту расширяться взрывным образом, и производит в нем дополнительное разрушение. Если в этой зоне имеются бункер или туннель, то они будут разрушены вместе с их содержимым. Полость расширяется, а давление и температура в ней уменьшаются. Испаренный грунт конденсируется в стеклообразный расплав (примерно 70 тонн на килотонну энерговыделения), в котором содержится большая часть радиоактивных продуктов деления от взрыва. Остаточный газ является перегретым паром.

100 – 500 миллисекунд. Газ в полости продолжает расширяться, толкая и ускоряя наружу раздробленный ранее материал. Основная часть этого материала будет выброшена механически под действием поршня из газов высокого давления в полости – но материал никогда не будет нагрет до высокой температуры внутри полости. Полость прорывается к поверхности и выбрасывает свои горячие газы (в основном, пар) в атмосферу. Температура выброшенных газов не превышает нескольких тысяч градусов.

²¹ E. Teller, *The Constructive Uses of Nuclear Explosives* (New York: McGraw-Hill, 1968).

²² 1 бар равен 0,1 миллиона паскалей, 1 мегабар равен 1 миллиону бар.

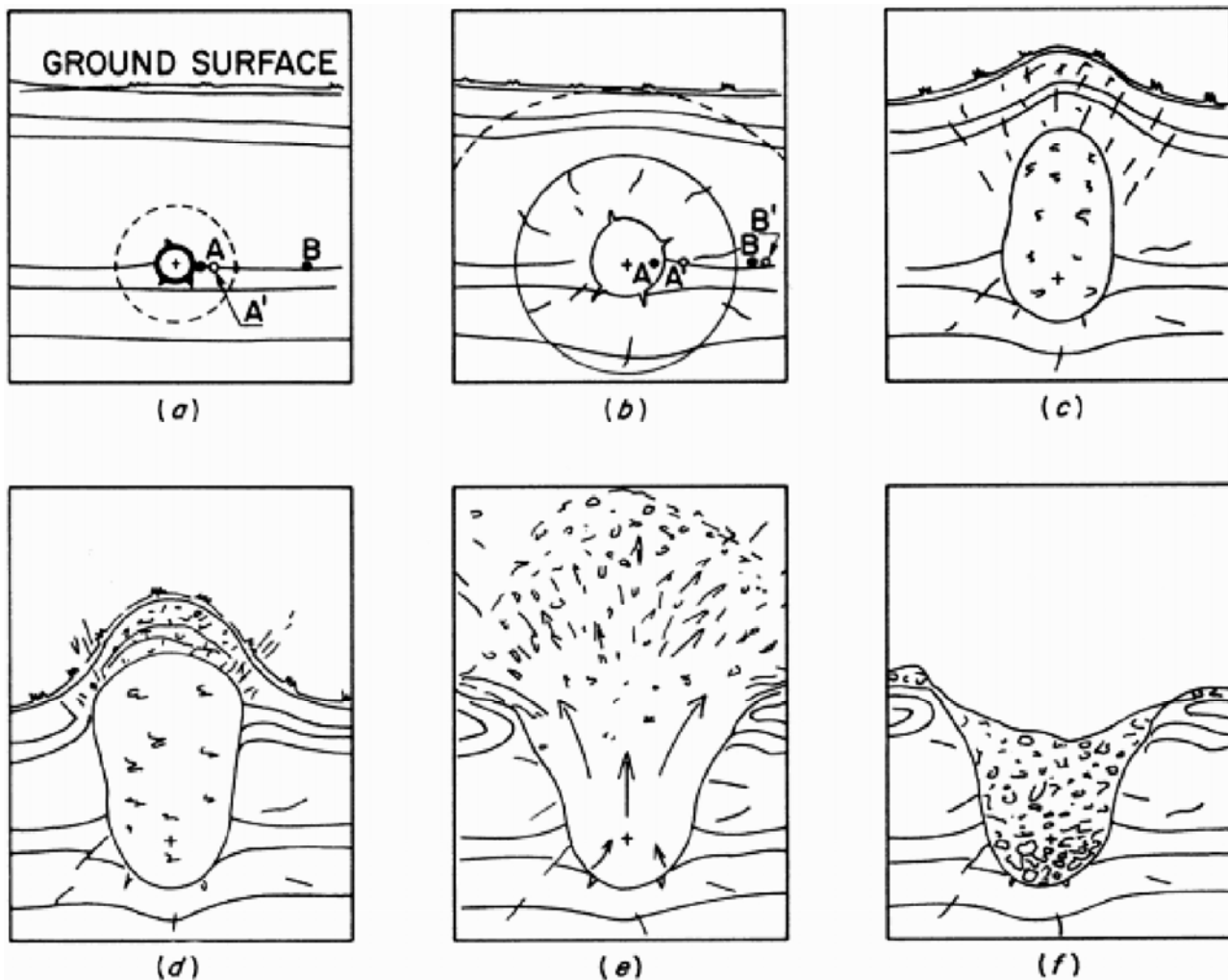


Рис. 2. Последовательность событий при неглубоком подземном ядерном взрыве. Ядерный взрыв образует сильную ударную волну, которая испаряет грунт в полости с начальным радиусом $R \approx 2 W^{1/3}$ м и расплавляет грунт на вдвое большем расстоянии. За пределами этого радиуса нагревание после прохождения волны невелико, но волна остается достаточно сильной для того, чтобы раздробить скальный грунт на расстояниях до $R_a \approx 50 W^{1/3}$ м. Полость заполняется газами высокого давления и температуры и расширяется наружу. Комбинация откола под напряжением и газового ускорения выбрасывает материал из воронки. Источник: Short, N. M., *The Definition of True Crater Dimensions by Post-Shot Drilling* (No. UCRL-7787): Lawrence Livermore National Laboratory (1964); Teller, E., *The Constructive Uses of Nuclear Explosives* (McGraw-Hill, New York, 1968).

1 – 2 секунды. Раздробленный скальный грунт выбрасывается из воронки. Почти весь материал остается холодным, но с обломками будут перемешано некоторое количество горячего стеклообразного материала из центральной полости.

Радиус испарения и расплавления

Максимальный объем грунта, который будет испарен в первые несколько миллисекунд, может быть оценен в предположении, что вся энергия бомбы превратилась в теплоту испарения:

$$V_v < \frac{E}{\rho Q_v} = 110W \text{ м}^3 \quad (6)$$

для типичной плотности и теплоты испарения грунта (см. табл. 2). Это соответствует максимальному радиусу испаренной полости $R_v < 3 W^{1/3}$ м. Точно так же, предполагая удельную теплоту плавления равной 1,8 МДж/кг, можно найти предел объема расплава $V_m < 800 W \text{ м}^3$ и $R_m < 6 W^{1/3}$ м. Эти значения являются верхними пределами, поскольку не вся энергия идет на расплавление

или испарение грунта. Тем не менее, эти оценки весьма близки к стандартному правилу, установленному по глубоким подземным испытаниям: $V_v < 70 \text{ W м}^3$ и $V_m < 700 \text{ W м}^3$ ²³.

В табл. 2 приводится сводка результатов расчетов Бутковича²⁴, который определил массу и радиус полости испарения для ядерного взрыва в одну килотонну в обычных геологических материалах. Типичный радиус испарения составляет примерно 2 метра.

Отметим, что взрыв в одну килотонну в воде создает паровой пузырь радиусом только в 3,3 метра – примерно одну восьмую от оцененного ранее объема испарения. Так происходит потому, что не вся энергия реального взрыва переходит в теплоту испарения.

Табл. 2. Радиусы сферы испарения для взрыва в одну килотонну в шести природных материалах.

Материал	Плотность (т/м ³)	Теплота испарения (кал)	Давление испарения (Мбар)	Радиус испарения (м)	Испаренная масса (т)
Гранит	2,67	2800	1,8	1,83	68,6
Насыщенный туф	1,97	2800	1,11	2,06	72,1
Сухой туф	1,76	2800	0,865	2,15	73,2
Аллювий	1,6	2800	0,703	2,20	71,4
Соль	2,24	1185	0,920	2,25	106,9
Вода	1,0	620	0,196	3,30	150,5

Источник: Butkovich, T. R., in *Shock Metamorphism of Natural Materials* (eds. Bevan M. French & Nicholas M. Short) pp. 83 -85 (Mono Book Corp., Goddard Space Flight Center, 1967).

Температура в полости

Хотя начальная температура после окончания реакций деления в боеприпасе может достичь миллионов градусов через несколько микросекунд после взрыва, после образования полости испарения температура не может быть намного больше температуры испарения грунта – примерно 2500 – 4000 °K – или же будет продолжать испаряться дополнительный материал. Давление будет очень высоким и полость будет быстро расширяться. При адиабатическом расширении идеального газа величина PV^γ будет оставаться постоянной, где $\gamma = c_p/c_v$ – это отношение удельных теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме. Для силикатных пород приближение $\gamma = 4/3$ будет оставаться справедливым вплоть до фазовой границы жидкости и пара²⁵, так что $P \sim R^{-4}$, $T \sim R^{-1}$. Однако, уравнение состояния станет более сложным по мере конденсации силикатов и других тугоплавких материалов, когда скрытая теплота будет возвращаться остаточному газу. Этот процесс оставляет летучие компоненты, в основном углекислый газ и перегретый пар, внутри полости.

Данные по камуфлетному взрыву Rainier показывают, что когда полость достигает своего максимального размера, температура пара T_0 становится равной примерно 1500 °C.

За пределами полости температура уменьшается очень быстро. На рис. 3 показан профиль температуры для камуфлетного взрыва Rainier через 90 мсек после взрыва, detonation, когда полость достигает своего максимального радиуса. Данные по другим камуфлетным взрывам показывают, что температура уменьшается до температуры окружающей среды на расстоянии в 1 – 3 радиуса полости²⁶.

История температуры выброшенного газа для взрыва на выброс будет более сложной по сравне-

²³ J. Carothers, *Caging the Dragon: The Containment of Nuclear Explosions* (Report DOE/NV-388/DNA TR-95-74). Washington, D.C.: U.S. Department of Energy/Defense Nuclear Agency. (1995). Доступно в сети Интернет по адресу <http://www.osti.gov/gpo/servlets/purl/524871-DR2SpT/webviewable/524871.pdf> (1 April 2004).

²⁴ T. R. Butkovich, in *Shock Metamorphism of Natural Materials* (eds. Bevan M. French & Nicholas M. Short), pp. 83-85 (Mono Book Corp., Goddard Space Flight Center, 1967).

²⁵ H. J. Melosh, *Impact Cratering: A Geologic Process* (Oxford University Press; Clarendon Press, Oxford, 1989).

²⁶ R. A. Heckman, *Deposition of Thermal Energy by Nuclear Explosives* (No. Ucl-7801): Lawrence Livermore National Laboratory. (1964). Доступно в сети Интернет по адресу <http://www.llnl.gov/tid/lof/documents/pdf/19111.pdf> (1 April 2004).

нию с камуфлетным взрывом. Первичным механизмом выброса материала из воронки будет работа, произведенная расширяющимся пузырем горячего пара. По мере того, как пар будет диффундировать через пустоты и трещины в раздробленном грунте, он будет передавать некоторую часть тепла окружающему материалу, в особенности, если грунт насыщен водой, скрытая теплота испарения которой велика.

За исключением весьма неглубоких взрывов, температура выбрасываемого пара не будет больше, чем у камуфлетного взрыва. Следовательно, температура выбрасываемого газа будет не намного больше, чем 1500 °С. Таким образом, даже обломки, ненадолго подвергшиеся воздействию выбрасываемых газов во время взрыва, не будут испытывать действия температур, больших 1500 °С, больше, чем в течение нескольких секунд.

Сеймовзрывная волна

Любые емкости или боеприпасы, наполненные химическими или биологическими агентами, будут разорваны сильной сеймовзрывной волной. На рис. 4 показано расчетное пиковое радиальное напряжение для камуфлетного взрыва в 5 килотонн. В соответствии с предыдущими оценками, радиусы испаренного и расплавленного грунта приблизительно равны соответственно 3 и 6 метрам. При этом давление соответственно равно 1,3 и 0,8 Мбар.

Скальный грунт начинает растрескиваться при давлениях, превышающих примерно 0,5 кбар, и размываться при давлениях, превышающих 5 кбар, намного меньших тех, при которых происходит испарение и плавление. Следовательно, радиус области трещиноватого и выброшенного грунта будет намного больше радиуса полости с ее очень высокими температурами.

Таким образом, ядерный взрыв в радиусе 50 W^{1/3} м от хранилища, по-видимому, выбросит контейнеры с химическими и биологическими агентами. Емкости разрушены расходящейся сеймовзрывной волной, но вещество агента не будет нагрето до высоких температур, если только оно первоначально не находилось очень близко к точке взрыва.

Пиковое радиальное напряжение превышает 5 кбар, что достаточно для раздробления скального грунта, на расстояниях менее 80 метров. Скорость волны равна примерно 5 км/сек, так что она достигает такого расстояния в течение 15 мсек, что намного меньше времени расширения полости. Волны такой силы достаточны для разрушения емкостей с химическими и биологическими агентами. Например, американские баки для хранения нервно-паралитического газа сконструированы так, чтобы выдерживать давление в 25 бар²⁷. Таким образом, агенты будут высвобождены, перемешаны с обломками, подняты вместе с остальной частью главного облака и базисной волной, и выброшены из окрестностей взрыва.

²⁷ GlobalSecurity.org., *Newport Chemical Depot (NECD)*. Доступно в сети Интернет по адресу <http://www.globalsecurity.org/wmd/facility/newport.htm> (1 April 2004).

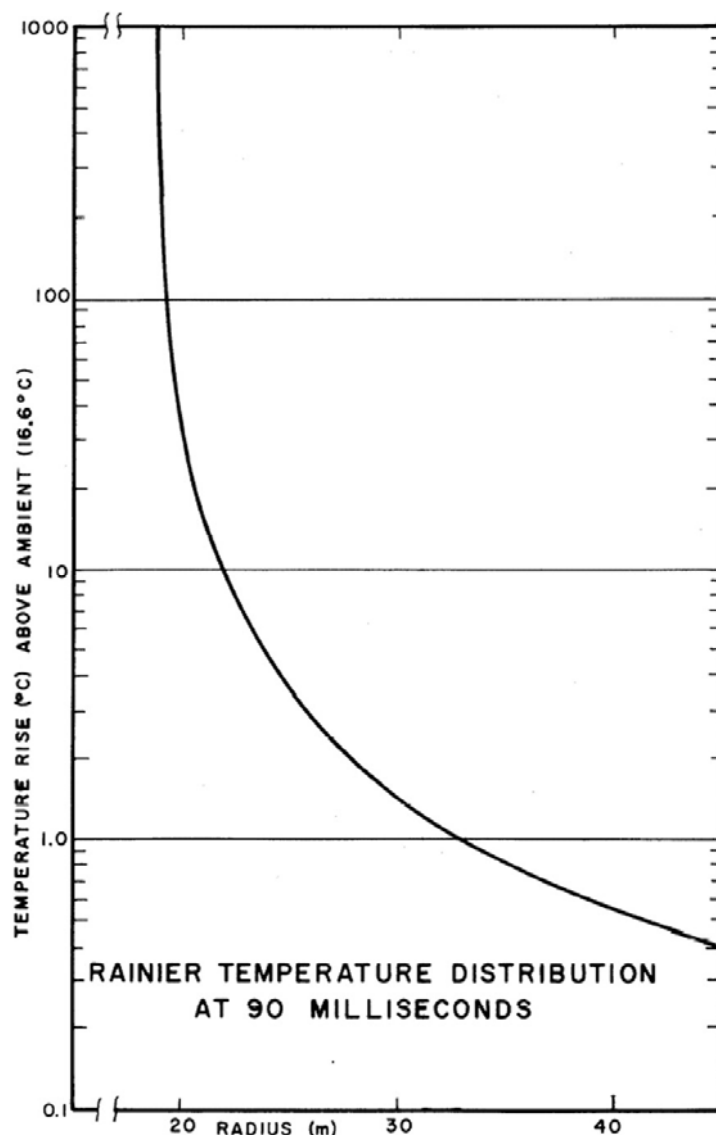


Рис. 3. Расчетное распределение температуры за пределами полости взрыва Rainier в 1,7 кт через 90 мсек после взрыва. В это время начальная полость радиусом около 3 метров расширилась примерно до 19 метров в радиусе и газы охладились до температуры около 1500 °С. Отметим низкий нагрев за пределами 2 радиусов полости. Источник: Heckman, R. A., *Deposition of Thermal Energy by Nuclear Explosives* (No. Ucl-7801): Lawrence Livermore National Laboratory. (1964). Доступно в сети Интернет по адресу <http://www.llnl.gov/tid/lof/documents/pdf/19111.pdf>

УНИЧТОЖЕНИЕ ДИСПЕРГИРОВАННОГО АГЕНТА ТЕПЛОМ

Несмотря на описанные выше ограничения, можно задать вопрос, будут ли химические и биологические агенты, подверженные действию высокотемпературных выбрасываемых газов с $T \approx 1500$ °С, тем не менее уничтожены. Здесь мы покажем, что это не так, если только химический и биологический агент не будет диспергирован на мелкие капли с радиусом не более нескольких миллиметров.

Можно получить понимание из американской программы уничтожения своего собственного химического оружия, как это требуется по конвенции по химическому оружию²⁸. В Приложении А описывается сжигание химических боеприпасов на установке для утилизации химических агентов в Туэле, штат Юта. В установке в Туэле используется многоступенчатая печь для сжигания, работающая при температурах, превышающих 1400 °С. Даже при столь высоких температурах полные емкости с химическими агентами должны стерилизоваться более 50 минут – в основном из-за того, что жидкий агент сначала должен выкипеть,

²⁸ A. E. Smithson and M. Lenihan, The Destruction of Weapons Under the Chemical Weapons Convention. *Science & Global Security* 6, 79-100 (1996).

прежде чем он достигнет температур, превышающих его температуру испарения. В более быстром процессе используется впрыскивание агента в печь в виде аэрозоля.

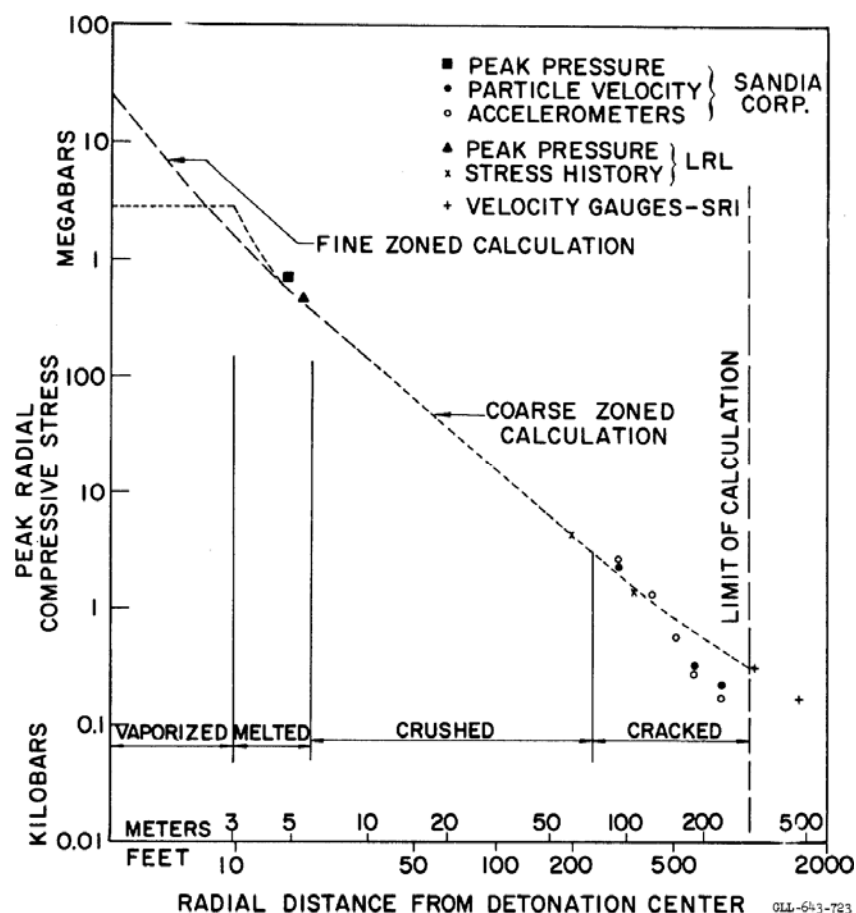


Рис. 4. Пиковое радиальное напряжение в граните в зависимости от расстояния для ядерного взрыва в 5 килотонн. По горизонтальной оси отложено радиальное расстояние от центра взрыва и указаны участки испарения, плавления, раздробления и появления трещин. Штриховая линия представляет результаты численных расчетов, а пустые и сплошные маркеры – экспериментальным данным. Испарение гранита происходит при 1,3 Мбар, а плавление начинается при 0,8 Мбар. За пределами зоны плавления при радиусах от 10 до 150 метров грунт будет раздроблен, но не очень сильно нагрет. Источник: Butkovich, T. R., *Calculation Of The Shock Wave From An Underground Nuclear Explosion In Granite* (No. Ucl-7762 Reprint-1965-4-1): Lawrence Livermore National Laboratory. (1967). Доступно по адресу в сети Интернет <http://www.llnl.gov/tid/lof/documents/pdf/19093.pdf>

Неглубокий подземный ядерный взрыв выбрасывает большую часть материала воронки в течение временного интервала, продолжающегося несколько секунд. После того, как температура в полости понизится ниже нескольких тысяч градусов, полные емкости с химическими и биологическими агентами – даже если они находятся очень близко к полости – не будут иметь достаточного времени для испарения. Однако, сильная взрывная волна, предшествующая расширению полости, может оказаться достаточной для разрыва емкостей и разброса жидкого агента.

Предположим, что агент был разбит на мелкие капли радиуса a прямо перед тем, как он будет подвергнут воздействию газов с высокой температурой T . Капли будут уменьшаться в размере, по мере того, как будут испаряться внешние слои, то в течение этого времени температура внутренних слоев все время будет оставаться ниже температуры кипения – 373 ° К для воды. Теплота, поглощаемая при испарении, равна $\dot{m}Q$, где $\dot{m}$ – скорость потери массы и $Q = 2,2 \cdot 10^6$ Дж/кг – удельная теплота испарения воды. Поглощение тепла сбалансировано диффузией тепла в каплю:

$$\dot{m}Q = 4\pi a^2 D \frac{dT}{dr} \quad (7)$$

где $D = 0,68$ Дж/сек К м – теплопроводность воды. Записывая градиент как $dT/dr \approx T/a$, мы найдем характеристическое время для испарения всей капли:

$$\tau \approx \frac{\rho a^2 Q}{3\alpha DT} = \left(\frac{a}{10^{-3} \text{ м}} \right)^2 \left(\frac{1000^\circ \text{ К}}{T} \right) \text{ сек} \quad (8)$$

где $m = 4\pi r^3/3$ и $\rho = 10^3$ кг/м³ – плотность воды. Таким образом, капли размером более нескольких миллиметров должны выдержать воздействие высоких температур в несколько тысяч градусов в течение нескольких секунд. Они не будут нагреты выше их температуры кипения и они будут оставаться активными и высокотоксичными агентами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Только агенты, хранящиеся вблизи от начального радиуса полости, $R \approx 5 W^{1/3}$ метров от точки взрыва, вероятно, могут быть стерилизованы ядерным взрывом. Материалы, хранящиеся на большем расстоянии, но внутри объема воронки, будут выброшены и перемешаны с радиоактивными осадками, не будучи нейтрализованным.

Для гарантированного уничтожения ядерный боеприпас, проникающий в грунт, должен взорваться в том же самом подземном помещении, где хранятся химические и биологические агенты. Однако, весьма маловероятно, что любой проникающий в грунт ядерный боеприпас сможет достичь необходимой точности и глубины для того, чтобы взорваться точно внутри помещения. Как было показано в предыдущей статье, никакой ядерный боеприпас не может достичь глубины, превышающей 10 – 20 метров железобетона, не разрушившись в этом процессе. Даже если бункер будет неглубоким, точное положение и физическая геометрия сооружения будут весьма неопределенными.

В заключение, можно подытожить следующие основные положения этой статьи:

- Уничтожение химических и биологических агентов требует радиационных доз, превышающих 1 Мрад, или постоянного воздействия высоких температур, необходимых для испарения и сжигания жидкого агента. Данные из программы уничтожения химического оружия США показывают, что для сжигания полных химических боеприпасов потребуется более 50 минут при температурах, превышающих 1000 °С.
- Прямое нейтронное и гамма-излучение от подземного ядерного взрыва поглощается в пределах нескольких $W^{1/3}$ метров грунта.
- Расходящаяся взрывная волна будет нагревать материалы до температур, достаточных для уничтожения химических и биологических агентов, только в пределах радиуса приблизительно $5 W^{1/3}$ м.
- Взрывная волна, тем не менее, раздробляет скальный грунт – и контейнеры с химическим и биологическим оружием, до радиуса $50 W^{1/3}$ м. Этот материал будет выброшен из воронки.
- Химические и биологические агенты за пределами небольшой зоны уничтожения, но внутри воронки, будут разбросаны вместе с выбросами из воронки, не будучи стерилизованными.

ПРИЛОЖЕНИЕ А СЖИГАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ АГЕНТОВ

В 1997 году у США имелось приблизительно 30 000 тонн химического оружия, включающего иприт, кожно-нарывные отравляющие вещества, и нервно-паралитические фосфорорганические агенты. Эти химические вещества находились в составе мин, ракет, артиллерийских снарядов и авиабомб. Аналогичные химические вещества были найдены и уничтожены инспекторами специальной комиссии ООН по Ираку после первой войны в Персидском заливе²⁹.

В основном США уничтожают свой арсенал химического оружия в высокотемпературных печах для сжигания на восьми отдельных площадках в континентальной части США и на

²⁹ Central Intelligence Agency. *Iraq's Weapons of Mass Destruction Programs* (2002). Доступно в сети Интернет по адресу http://www.cia.gov/cia/reports/iraq_wmd/Iraq_Oct_2002.htm (1 April 2004).

атолле Джонстона в Тихом океане³⁰. На рис. А1 показан поддон с 155-мм снарядами, в каждом из которых содержится примерно 3 кг нервно-паралитического агента GB (зарина), на установке по утилизации химических агентов в Туэле, штат Юта. До сжигания эти снаряды открываются при помощи резакон с дистанционным управлением, и из них извлекается разрывной заряд. После этого либо жидкий агент выливается и затем сжигается в отдельной печи для сжигания жидкости, либо выпаривается из боеприпаса в целом.

Несмотря на то, что многие химические агенты начинают разлагаться в диапазоне 100 – 300 градусов Цельсия, при таких температурах полное разрушение происходит слишком медленно. Например, период полураспада зарина в водном растворе при 300 °C равен 146 часам³¹. Официальный критерий Армии США «5X» требует, чтобы агент был испарен, и чтобы все металлические части боеприпаса выдерживались при температуре более 1000 °F (585 °C) не менее 15 минут³².

В установке по утилизации в Туэле используется многоступенчатая печь для сжигания, работающая при температурах выше 1 400 °C³³. На рис. А2 показана температура в печи для металлических деталей и скорость испарения агента из поддона с 24 105-мм снарядами, наполненными ипритом (HD). Каждый поднос со снарядами подается в шлюз в первой зоне, где происходит испарение и сгорание большей части агента. Температура газа в печи для сжигания поддерживается вблизи 1160 °K с временем выдержки, достаточным для испарения и уничтожения агента.

Температура жидкого агента в каждом снаряде остается вблизи, но всегда ниже температуры кипения (258 °C для иприта и 158 °C для зарина)³⁴. Агент уничтожается только после того, как он испаряется. Следовательно, время, необходимое для стерилизации полных емкостей с химическим агентом определяющим образом зависит от скорости испарения, которая, в свою очередь, определяется скоростью теплопередачи от горячих газов в печи к жидкости внутри снарядов или емкостей.

³⁰ A. E. Smithson and M. Lenihan, The Destruction of Weapons Under the Chemical Weapons Convention. *Science & Global Security* 6, 79-100 (1996).

³¹ United States Congress Office of Technology Assessment. *Disposal of Chemical Weapons: Alternative Technologies* (No. OTA-BP-O-95). Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office. (1992). Доступно в сети Интернет по адресу <http://www.wws.princeton.edu/cgi-bin/byteserv.prl/~ota/diskl/1992/9210/921001.PDF> (1 April 2004).

³² National Research Council (U.S.). Committee on Alternative Chemical Demilitarization Technologies., Longwell, J. P., National Research Council (U.S.). Board on Army Science and Technology. & National Research Council (U.S.). Commission on Engineering and Technical Systems. *Alternative Technologies for the Destruction of Chemical Agents and Munitions* (National Academy Press, Washington, DC, 1993).

³³ National Research Council (U.S.). Panel on Review and Evaluation of Alternative Chemical Disposal Technologies & National Research Council (U.S.). Board on Army Science and Technology. *Review and Evaluation of Alternative Chemical Disposal Technologies* (National Academy Press, Washington, D.C., 1996).

³⁴ National Research Council (U.S.). Committee on Review and Evaluation of Alternative Technologies for Demilitarization of Assembled Chemical Weapons. *Review and Evaluation of Alternative Technologies for Demilitarization of Assembled Chemical Weapons* (National Academy Press, Washington, D.C., 1999).



Рис. А-1. Поддоны с 155-мм снарядами, в каждом из которых содержится примерно 3 кг нервно-паралитического агента GB (зарина), на установке по утилизации химических агентов в Туэле, штат Юта. Снаряды изготовлены из высокопрочной стали. До сжигания эти снаряды открываются при помощи резакв с дистанционным управлением, и из них извлекается разрывной заряд. Даже при температурах, превышающих 1000 °C, требуется около часа для того, чтобы полные емкости с заринем испарились и агент был уничтожен. На переднем плане показана установка, являющаяся частью эксперимента для разработки метода неdestructивного отождествления агента при помощи нейтронной спектроскопии. Источник: Helmuth, L, *Seeing Through Steel: INEEL-Developed Technology Identifies Chemical Weapons*. Доступно в сети Интернет по адресу <http://www.eurekalert.org/pub.releases/1998-10/INEE-STSI-141098.php> (получено 1 апреля 2004 г.).

В примере, показанном на рис. А2, на полное испарение из полных снарядов требуется более 50 минут при температуре 1170 °K. Конечно, скорость испарения будет увеличиваться при более высоких температурах. Однако, скорость теплопередачи при кипении обладает сильным локальным максимумом при разнице температур между поверхностью и жидкостью, равной примерно 30 °C. Только при исключительно высоких разностях температур, когда начинает доминировать теплопередача, скорость переноса тепла превзойдет этот локальный максимум.

Конечно, быстрое испарение будет происходить в области вблизи взрывающейся боеголовки. Однако, дальше от нее температура будет намного ниже. Как обсуждалось выше, температура выбрасываемых паров от подземного ядерного взрыва составляет примерно 1500 °C, что сравнимо с температурой в описанных выше печах для сжигания. Поскольку кратерообразующий взрыв длится всего около нескольких секунд, то очевидно, что для испарения и уничтожения любого выброшенного химического или биологического агента времени не хватит.

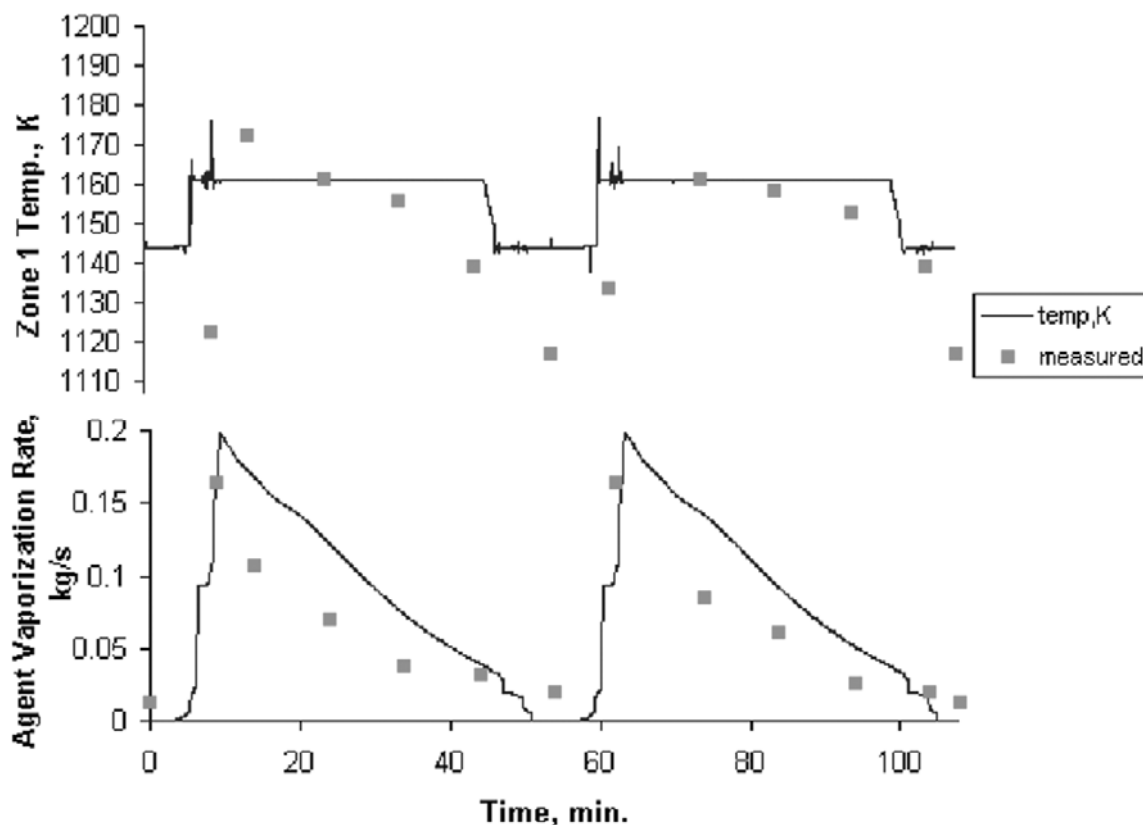


Рис. А2. Температура в печи для металлических деталей (вверху, в градусах Кельвина) и скорость испарения агента из поддона с 24 105-мм снарядами (внизу, в кг/сек), наполненными ипритом (HD). Показаны два цикла, включающие два различных поддона со снарядами. Кривая представляет результат численного расчета, а сплошные маркеры данных представляют измеренные значения. Каждый поднос со снарядами подается в шлюз в первой зоне, где происходит испарение и сгорание большей части агента. Температура газа в печи для сжигания поддерживается вблизи 1160 °K с временем выдержки, достаточным для испарения и уничтожения агента, и нагрева снаряда до температуры в 1000 °F (585 °C) в течение не менее 10 минут. Отметим, что для полного уничтожения агента при таких температурах может потребоваться час или более. Источник: Martin K. Denison et al., in 21st International Conference on Incineration and Thermal Treatment Technologies (New Orleans, Louisiana, 2002).

ПРИЛОЖЕНИЕ Б КОММЕНТАРИИ К СТАТЬЕ МЭЯ И ХАЛДЕМАНА

После завершения большей части исследований, на которых основана данная статья, автор получил рукопись Майкла Мэя и Закари Халдемана³⁵, в которой также рассматривался вопрос уничтожения агента ядерным оружием. Они рассматривали два случая: взрыв в большом подземном сооружении, пустом, за исключением 1000 бочек, каждая из которых содержала 200 литров биологического агента, и подземного взрыва рядом с сооружением, но за его пределами. Первая ситуация весьма нереальна (как признают и авторы), учитывая вероятное отсутствие точной информации о геометрии и расположении бункера, и распределение емкостей и боеприпасов с химическими и биологическими агентами по многим помещениям данного комплекса, и то, что ни один из бетонобойных боеприпасов не может проникнуть больше, чем через 10 – 20 метров железобетона. Не удивительно, что они пришли к выводу о том, что химические и биологические агенты на расстоянии до нескольких метров от ядерного взрыва в одну килотонну будут уничтожены теплом и излучением.

Мэй и Халдеман менее уверены в том, что произойдет с материалом, хранящимся на расстоянии нескольких радиусов от подземного взрыва, что я считаю более реальным случаем. Вопрос основан на количестве тепла, передаваемом агентам и емкостям по мере расширения полости и просачивания перегретых газов через материал воронки перед прорывом. Они не делали попыток детально

³⁵ M. May and Z. Haldeman, Effectiveness of Nuclear Weapons against Buried Biological Agents, *Science & Global Security* 12(1-2), 91-113 (2004).

рассчитать этот вариант, но отметили, что «может не хватить времени для нагрева бочек, не находящихся в непосредственной близости от взрыва за время до выброса». Это приводит к их более осторожному выводу о том, что «для наиболее вероятных случаев полная стерилизация не может быть гарантирована».

Хотя в этой статье также не рассчитывались подробности перемешивания диффузии тепла при полном прорыве, простые оценки, представленные во введении, показывают, что для стерилизации химических или биологических агентов просто не будет достаточно энергии, если только они хранятся под землей и находятся на расстоянии, превышающем примерно $5 W^{1/3}$ от взрыва. Можно сделать вывод, что в наиболее вероятных случаях химические и биологические агенты не будут стерилизованы.