

АКУСТИЧЕСКОЕ ОРУЖИЕ – ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ

Юрген Алтманн

Акустическое оружие исследуется и разрабатывается в нескольких странах. При рекламе в качестве одного из видов несмертельного оружия о нем говорят, что оно моментально выводит из строя противника, но не приводит к стойким физическим повреждениям. Однако, надежная информация о его характеристиках и воздействии крайне скудна. Настоящая статья должна предоставить базовую информацию по нескольким направлениям: воздействия звука большой амплитуды на человека, возможных источников большой мощности и распространения сильного звука.

Что касается первого направления, кажется, что инфразвук – популярный в журналистике – не оказывает на человека приписываемого ему сильного воздействия. Следствием повышения уровня звукового давления на больших частотах является беспокойство, неудобство и боль. В зависимости от уровня, частоты, длительности и т.п., временное ухудшение слуха может превратиться в постоянную потерю слуха; при очень высоких уровнях звука даже одна, или несколько коротких экспозиций могут вызвать частичную или полную глухоту. Однако, для предотвращения этих воздействий защита ушей может быть весьма эффективной. Помимо воздействия на слух, возможно некоторое нарушение равновесия и неприятные ощущения, в основном, в области грудной клетки. Ударные волны от взрывов с их значительно большим избыточным давлением на малых расстояниях могут повредить другие органы, в первую очередь легкие, вплоть до летального исхода.

В качестве мощных источников звука в основном используются сирены и свистки. При питании от двигателей внутреннего сгорания их акустическая мощность на низких частотах может составлять десятки киловатт, а на высоких частотах – киловатты. При взрывных источниках возможно получение мегаваттной мощности. Размеры источников для направленного действия должны равняться примерно 1 метру, и такими же размерами будут обладать необходимые источники энергии.

Однако, распространение сильного звука на большие расстояния затруднено. На низких частотах дифракция приводит к сферическому распространению энергии, запрещая направленное воздействие. На высоких частотах, где возможно образование пучков, нелинейные процессы деформируют звуковые волны в ударные с пилообразной формой, которые характеризуются необычно высоким поглощением при звуковом давлении, достаточно высоком для заметного воздействия на человека. Достижение уровней звука, которые могут вызвать боль в ушах, нарушение равновесия, или другие заметные эффекты, представляется недостижимым на расстояниях более примерно 50 метров при размерах источников порядка 1 метра. Внутри строений ситуация изменяется, в особенно если можно использовать резонанс.

Акустическое оружие будет оказывать гораздо меньшее воздействие по сравнению с недавно запрещенным ослепляющим лазерным оружием. С другой стороны, у него в большей степени могут проявляться побочные воздействия из-за размытия пучка. Из-за того, что во многих случаях не будет давать военным или полиции радикальных преимуществ, в особенности, если противник применяет защиту ушей, то шансы на превентивные ограничения существуют. Поскольку акустическое оружие может применяться во многих формах для различных целей, и поскольку широко используется взрывное оружие, такие ограничения должны быть проработанными и детальными.

Автор работает на факультете экспериментальной физики Дортмундского университета (Германия) и в Бохумском проекте по верификации Рурского университета в Бохуме (Германия). Это исследование было начато во время месячной научной командировки в программу исследований мира в Корнелльском университете в Итаке (штат Нью-Йорк, США) с

финансовой поддержкой фонда Джона Д. и Кэтрин Т. Макартур. Оно было закончено в Дор-тмундском университете с финансовой поддержкой Министерства науки и исследований земли Северный Рейн – Вестфалия.

Оригинальная версия статьи была получена журналом *Наука и всеобщая безопасность* 2 июня 1998 года, а в сокращенной и переработанной форме – в июле 1999 года.

ВВЕДЕНИЕ¹

Акустическое оружие как вид "несмертельного" оружия

С начала 90-х г.г. возник возрастающий интерес (в основном в США) к так называемому несмертельному оружию (НСО), которое предназначено для обезвреживания оборудования или персонала при исключении или минимизации стойкого или серьезного повреждения людей. Считалось, что НСО предоставит новые, дополнительные возможности для применения военной силы в условиях после окончания холодной войны, и оно могло бы также использоваться для полицейских целей². В то время как одни ожидали революции в

¹ Более подробный вариант этой статьи с большим количеством ссылок и полными приложениями одновременно опубликован как J. Altmann, *Acoustic Weapons - A Prospective Assessment. Sources, Propagation, and Effects of Strong Sound* (Ithaca, NY: Peace Studies Program, Cornell University 1999).

² Большая часть информации по несмертельному оружию появляется в статьях журналистов в военной или обычной прессе. В следующих обзорных статьях и книгах обсуждаются различные проблемы несмертельного оружия и содержится обширная библиография. R. Span, J. Altmann, G. Hornig, T. Krallmann, M. Rosario Vega Laso, J. Wiister, "Non-lethal' Weapons – Fantasy or Prospect of More Humane Use of Force?" (in German), Dossier Nr. 17, Wissenschaft und Frieden (June 1994); R. Kokoski, "Non-lethal weapons: a case study of new technology developments," in: *SIPRI Yearbook 1994: World Armaments and Disarmament* (Stockholm/Oxford: SIPRI/Oxford University Press, 1994); 367-386; S. Aftergood, "The Soft-Kill Fallacy," *Bulletin of the Atomic Scientists* (Sept./Oct. 1994): 40-45; A. Roland-Price, "Non-Lethal Weapons: A Synopsis," in: U.S. Congress, Office of Technology Assessment, "Improving the Prospects for Future International Peace Operations - Workshop Proceedings," OTA-BP-ISS-167 (Washington DC: U.S. Government Printing Office, Sept. 1995); J. Altmann, "Non-Lethal' Weapons," in: J. Rotblat (ed.), *Security, Cooperation and Disarmament: The Unfinished Agenda for the 1990s* (Singapore etc.: World Scientific, 1998); M. Dando, *A New Form of Warfare - The Rise of Non-Lethal Weapons* (London/Washington: Brassey's, 1996); N. Lewer, S. Schofield, *Non-Lethal Weapons: A Fatal Attraction? Military Strategies and Technologies for 21st-century Conflict* (London/New Jersey: Zed Books, 1997). У сторонников несмертельного оружия имеется не так много систематических и подробных публикаций. Следующие ссылки дают некоторые примеры работ сторонников НСО: "Nonlethality: A Global Strategy Whitepaper" (Washington DC: U.S. Global Strategy Council, 1992); J. B. Alexander, "Nonlethal Weapons and Limited Force Options," presented to Council of Foreign Relations, New York, 27 Oct. 1993; Milt Finger, "Technologies to Support Peacekeeping Operations," in: U.S. Congress, Office of Technology Assessment (ibid.); G. Yonas, "The Role of Technology in Peace Operations"; in: U.S. Congress, Office of Technology Assessment (ibid.); C. Morris, J. Morris, T. Baines, "Weapons of Mass Protection - Nonlethality, Information Warfare, and Airpower in the Age of Chaos," *Air-power Journal* 9, no. 1 (Spring 1995): 15-29; D. A. Morehouse, *Nonlethal Weapons - War Without Death* (Westport CT/London: Praeger, 1996). Взвешенное мнение американских военных представлено в: J. W. Cook III, D. P. Fiely, M. T. McGowan, "Nonlethal Weapons - Technologies, Legalities, and Potential Policies," *Airpower Journal* 9, Special Issue (1995): 77-91. Развитие НСО для полицейских операций довольно подробно представлено, например, в: J. Alexander, D. D. Spencer, S. Schmit, B. J. Steele (eds.), "Security Systems and Nonlethal Technologies for Law Enforcement," *Proc. SPIE* 2934 (1997). Все виды деятельности описаны в материалах конференции национальной военно-промышленной ассоциации "Non-Lethal Defense III," Johns Hopkins University, 25 and 26 February 1998, <http://www.dtic.mil/ndia/NLD3/index.html>.

военном деле и "войны без смерти"³, многие другие предсказывали, что НСО только дополнит летальное оружие, указывая, что в реальной войне оба вида будут применяться последовательно или совместно⁴. Однако, могут происходить события, отличные от войны, когда наличие многих вариантов применения силы ниже порога убийства может помочь или предотвратить или сократить смертельные исходы, т.е. полицейские действия (восстания, захват заложников и т.д.), или миротворческие операции. Упоминались многие разнообразные технологии, в том числе лазеры для ослепления, микроволновые импульсы высокой мощности, едкие химикаты, микробы, клеи, смазки и компьютерные вирусы.

Хотя в настоящее время изучением и разработкой этих технологий в основном занимаются США⁵, после развертывания такого оружия в некоторых областях может начаться гонка вооружений нового качества. Имеется также и возможность распространения, которая может "отыграться", если такое оружие будет применяться противниками или террористами⁶. Некоторые из концепций просто нарушают существующие договоры по разоружению, например применение микробов как оружия против оборудования⁷. Другие могут нарушать нормы международного гуманитарного права⁸. Таким образом, имеются серьезные основания для того, чтобы сделать критический обзор НСО, прежде чем согласиться на его разработку и развертывание.

Такой критический анализ должен включать научно-технические, военно-тактические и политические аспекты. До некоторой степени два последних аспекта зависят от первого. Крайне необходим хорошо обоснованный анализ работы НСО, передачи и распространения до цели, и эффектов его воздействия. Это наиболее важно, поскольку в опубликованной литературе научно-технических подробностей почти нет. Военные специалисты и подрядчики, вовлеченные в исследования и разработку НСО, не предоставляют технической информации⁹. Имеется также определенная опасность того, что при отсутствии надежной информации слабо обоснованные суждения и обещания сторонников НСО получают большой полити-

³ Morehouse, см. ссылку 2.

⁴ См., например, A. W. Debban, "Disabling Systems: War-Fighting Option for the Future," *Airpower Journal* 7, no. 1 (Spring 1993): 44-50; Roland-Price (см. ссылку 2).

⁵ Похоже, что другие западные промышленные страны придерживаются подхода «поживем – увидим», ограничиваясь работой на бумаге для того, чтобы быть в курсе, см. Altmann 1996 (ссылка 2); сообщения из России показывают, что там имеется заметный интерес к несмертельному оружию в целом, примеры включают пучковое оружие и акустические пули, см. Kokoski (ссылка 2), 373; M. T., "Russians Continue Work on Sophisticated Acoustic Weaponry," *Defense Electronics* 26, no. 3 (March 1994): 12.

⁶ Эти соображения могли быть среди мотивов в последнем пересмотре позиции США по отношению к лазерному ослепляющему оружию. В июне 1995 года министерство обороны почти что закупило 50 лазерных ослепляющих винтовок LCMS и планировало приобрести еще 2500. Но в сентябре 1995 года его политика изменилась, и в декабре 1995 года (после корректировки текста для учета интересов США и других стран) США подписало новый дополнительный протокол к конвенции ООН по запрещению или ограничению использования определенных видов обычных вооружений, которые могут рассматриваться как избыточно травматические или не делающие различий («Конвенция по определенным видам вооружений» или «Конвенция по нечеловечным вооружениям») 1980 года. См. "Blinding Laser Weapons: The Need to Ban a Cruel and Inhumane Weapon," *Human Rights Watch Arms Project* 7, no. 1 (Sept. 1995); текст протокола в: "Trust and Verify," no. 62 (London: Verification Technology Information Centre, Nov./Dec. 1995).

⁷ Конвенция по биологическому оружию 1972 года запрещает любое враждебное применение биологических агентов, независимо от того, направлено он против живого организма, или против техники; Finger (см. ссылку 2) в этом отношении неправ. См. Altmann (ссылка 2); Cook et al. (ссылка 2). Однако, Конвенция по химическому оружию 1992 года только запрещает ядовитые химические вещества, которые могут привести к смерти, временному выходу из строя или к стойкому вреду для человека или животных.

⁸ Наиболее ярким примером является случай лазерного ослепляющего оружия, применение которого, к счастью, было запрещено в 1996 году, см. ссылку 6.

⁹ См. также B. Starr, "Non-lethal weapon puzzle for US Army," *International Defense Review* 4 (1993): 319-320.

ческий вес, чем они того заслуживают, или что будут приняты решения на основании узкой военной точки зрения.

Поскольку НСО охватывает много различных технологий, для каждого вида оружия требуется детальный анализ¹⁰. В настоящей статье представлен анализ акустического оружия, с основным вниманием к низкочастотному звуку. С одной стороны, говорят, что такое оружие может вызвать потерю ориентации, рвоту и боль, не сопровождающиеся стойкими последствиями. С другой стороны, упоминалась возможность серьезных повреждений органов и даже смерти, так что эпитет "несмертельный" не может быть верен для всех возможных видов и применений. В таблице 1 перечислены некоторые свойства, приписываемые акустическому оружию¹¹. Поскольку многие из них основаны на слухах и не на публично документированных случаях, они не могут рассматриваться в качестве надежной информации, но могут служить указателями направлений, в которых следует провести дополнительный анализ.

В качестве общего примера таких заявлений приведем следующее: "Ученые, участвующие в разработке этих технологий (НСО), знают, что нет иных пределов, кроме поддержки и финансирования. Если они работают над ними, то они заставят их сделать все, что они пожелают нужным"¹². Такое заявление не принимает в расчет, во-первых, законов природы, и во-вторых, возможностей противодействия противника.

¹⁰ Такая оценка новых военных технологий является одним из видов превентивных ограничений на вооружения; примеры других технологий можно найти в J. Altmann, "Verifying Limits on Research and Development - Case Studies: Beam Weapons, Electromagnetic Guns," in: J. Altmann, T. Stock, J.-P. Stroot (eds.), *Verification After the Cold War - Broadening the Process* (Amsterdam: VU Press, 1994).

¹¹ Дополнительные источники, не включенные в эту таблицу: B. Starr, "U.S. tries to make war less lethal," *Jane's Defence Weekly* (31 Oct. 1992): 10; A. and H. Toffler, "War and Anti-War. Survival at the Dawn of the 21st Century" (Boston etc.: Little, Brown and Co. 1993) (см. главу 15, "War without Bloodshed?") (цитируется по немецкому переводу: "Überleben im 21. Jahrhundert" (Stuttgart: DVA 1994)); Debban (ссылка 4), Alexander (ссылка 2); J. Barry, T. Morganthau, "Soon, 'Phasers on Stun'" *Newsweek* (7 Febr. 1994): 26-28; Kokoski (ссылка 2); Aftergood (ссылка 2), G. Frost, C. Shipbaugh, "GPS Targeting Methods for Non-Lethal Systems," Reprint RAND/RP-262 (1996) (перепечатка из IEEE Plans 94); Cook et al. (ссылка 2); Morehouse (ссылка 2), p. 20, 119 f; Dando (ссылка 2), p. 11 ff; SARA report of 10 Febr. 1995 (revised 13 Febr. 1996) и прочие ссылки из: W. Arkin, "Acoustic Anti-personnel Weapons: An Inhumane Future?," *Medicine, Conflict and Survival* 14, no. 4 (1997): 314-326.

¹² Morehouse, см. ссылку 2.

Табл. 1. Выбранные примеры приписываемых свойств, воздействия и целей акустического оружия по доступной литературе с иногда неизвестными источниками. Отметим, что имеются некоторые несоответствия, например, какие частоты, высокие или очень низкие, используются в "акустических пулях"^{13,14,15,16}. В некоторых случаях нельзя избежать впечатления, что соответствующие авторы чего-то недопонимают или путают разные вещи, например, с плазмой, создаваемой акустическими пулями, или с отождествлением недиффразирующего и непроникающего¹³.

Источник звука	Воздействие	Цели	Ссылка
Инфразвук	Может повлиять на лабиринт уха, вызвать головокружение, резонансы во внутренних органах, например, в сердце, с воздействиями вплоть до смерти.	Борьба с беспорядками (применялось Англией в Северной Ирландии)	¹⁷
Инфразвук с нелинейным наложением двух ультразвуковых пучков (испытано в Великобритании)	Непереносимые ощущения.	Борьба с беспорядками	¹⁸
Инфразвук	Вывод из строя, дезориентация, рвота, тошнота, спазмы внутренних органов, воздействие прекращается после включения генератора без нанесения физического вреда.	Борьба с беспорядками и толпой, психологические операции	¹⁹
Шум очень низкой частоты	Дезориентация, рвота, тошнота, спазмы внутренних органов, неконтролируемые испражнения.	Вражеские войска	²⁰

¹³ P. R. Evancoe, "Non-Lethal Technologies Enhance Warrior's Punch," *National Defense* (Dec. 1993): 26-29.

¹⁴ M. Tapscott, K. Atwal, "New Weapons That Win Without Killing On DOD's Horizon," *Defense Electronics* (Febr. 1993): 41-46.

¹⁵ Starr (ссылка 9).

¹⁶ "Army Prepares for Non-Lethal Combat," *Aviation Week & Space Technology* (24 May 1993): 62.

¹⁷ M. Lumsden, *Anti-personnel Weapons* (Stockholm /London: SIPRI/Taylor&Francis 1978): 203-205.

¹⁸ "Army tests new riot weapon," *New Scientist* (20 September 1973): 684; C. Ackroyd, K. Margolis, J. Rosenhead, T. Shallice, *The Technology of Political Control* (2nd ed.) (London: Pluto, 1980): 224-225. См. также: R. Rodwell, "'Squawk box' technology," *New Scientist* (20 September 1973): 667.

¹⁹ "Non-lethality ..." (ссылка 2).

²⁰ V. Kiernan, "War over weapons that can't kill," *New Scientist* (11. Dec. 1993): 14-16.

Источник звука	Воздействие	Цели	Ссылка
Инфразвук - регулируемая низкая частота, высокая интенсивность	Резонансы в полостях тела, вызывающие нарушения в органах, размывание зрения, тошноту – от временного неудобства до смерти (личный состав). Появление трещин и усталость в металлах, тепловое повреждение и расслоение композитов, повреждение стекол в домах, локальные землетрясения (техника).		21
Инфразвук от систем очень больших громкоговорителей и очень мощных не существующих до сих пор усилителей, требующих разработки охлаждения и новых материалов	Дискомфорт, потеря ориентации, тошнота, рвота	Освобождение заложников, борьба с беспорядками и толпой, психологические операции	13
Акустическое пучковое оружие высокой мощности и очень низкой частоты, разработанное вместе с SARA при участии LANL и ARDEC, фазированная решетка позволяет уменьшить размеры до 1 кубометра (для небольшого автомобиля), в будущем может стать еще меньше	Дискомфорт, как рядом с большой сиреной (при определенных частотах и интенсивностях)	Защита американских учреждений за границей (например, посольств)	14
Акустическая пуля очень низкой частоты, излучаемая антеннами, исследованная в ARDEC		Наступательные возможности против личного состава в бункерах или на машинах	15
Акустические пули большой мощности и очень низкой частоты от антенны размером в 1 – 2 метра	Различные эффекты при разных уровнях, от дискомфорта до смерти		16
Высокочастотная недифрагирующая (т.е., не проникающая) акустическая пуля, создающая плазму перед объектом	Травма от удара тупым предметом		14

²¹ Lewer/Schofield (ссылка 2), 8 ff.

Источник звука	Воздействие	Цели	Ссылка
Акустический импульс с частотой около 10 Гц на расстояниях до сотен метров, разработанный в России	Регулируемое от не смертельного до смертельного исхода		²²
«Разностная зона» от пересечения двух не слышимых поодиночке пучков, разработанная в России			²²
Аббревиатуры: ARDEC: U.S. Army Armament Research, Development and Engineering Center, Picatinny Arsenal NJ, U.S., LANL: Los Alamos National Laboratory, Los Alamos NM, U.S., SARA: Scientific Applications and Research, Huntington Beach CA, U.S.			

Некоторые исторические аспекты акустического оружия

В то время как звук низкой частоты часто использовался в вооруженных силах для обнаружения и локализации артиллерии, ничего не известно о его использовании в армии в качестве оружия. В двух обзорных статьях по инфразвуку упоминается о существующих указаниях на то, что Великобритания и Япония исследовали эту возможность, и показали, что для поражающего *смертельного* действия на заметном расстоянии требуются источники нереально большой мощности²³.

По отношению к несмертельному воздействию низкочастотного звука, уже в книге 1969 года по борьбе с беспорядками упоминалось, что теория применения звука как оружия обсуждалась во многих научных статьях (что, однако, автор настоящей статьи подтвердить не может), что были испытаны суперзвуковые и субзвуковые устройства для борьбы с беспорядками, и что оказалось, что такие устройства были слишком дорогими, слишком сложными, и слишком ненаправленными²⁴. Об единственном подробно обсуждавшемся устройстве («Ужастике» или «Разгоняющем толпу») говорилось, что оно излучает пронзительный пульсирующий звук с помощью усилителя в 350 Вт, создающего уровень в 120 дБ на расстоянии в 10 м²⁵.

В 1971 году в коротком обзоре Британского королевского военного научного колледжа отмечалось уменьшение сопротивления при допросах, увеличение усталости вражеских сил, создание инфразвукового барьера и быстрое разрушение строений противника²⁶. Несколько позже журнал «Нью Сайентист» в контексте сообщений об оружии, применяемом против протестующих в Северной Ирландии, написал об успешных испытаниях «вопящего ящика», устройства, про которое сообщалось, что оно излучает две близкие к ультразвуку частоты (например, 16,000 и 16,002 кГц), при сложении в ухе дающие биения с низкой частотой (в

²² М.Т. (ссылка 5).

²³ N. Broner, "The Effects of Low Frequency Noise on People - A Review," *Journal of Sound and Vibration* 58, no. 4 (1993): 483-500; O. Backteman, J. Kohler, L. Sjoberg, "Infrasound - Tutorial and Review: Part 4," *Journal of Low Frequency Noise and Vibration* 3, no. 2 (1984): 96-113. Broner цитирует: J. F. J. Johnston, *Infrasound - a Short Survey* (Royal Military College of Science, England, 1971). Backteman et al. практически без изменений переписали соответствующий абзац из работы Broner, удалив два предложения и две ссылки и не указали на источник.

²⁴ R. Applegate, *Riot Control - Material and Techniques* (Harrisburg PA: Stackpole, 1969): 273.

²⁵ Applegate (ссылка 24). В 1973 году правительство Англии закупило 13 таких систем для применения в Северной Ирландии, но похоже, что там они их не использовали. См. Ackroyd et al., (ссылка 18), 223 – 224.

²⁶ Johnston (ссылка 23), цитировано в Broner (ссылка 23). О применении белого шума против заключенных см также: Lamsden (ссылка 13) и приведенную там литературу.

данном случае 2 Гц), которые, как говорилось, являются невыносимыми²⁷. Министерство обороны опровергло наличие такого устройства²⁸. В последующей книге сообщалось, что оно никогда не было полностью закончено²⁹. Обсуждение такой возможности проводится ниже, в разделе 5.1.2.

В то же самое время появилась серия статей, в которых утверждалось, что эффекты инфразвука, такие, как головокружение и тошнота, проявляются при уровнях в 95 – 115 дБ, что, однако, не было подтверждено другими экспериментаторами³⁰.

Силы США применяли громкую музыку для того, чтобы выгнать М. Норьегу из его убежища в Панаме в 1989 году³¹. Однако такое применение звука больше основано на раздражении, чем на физических повреждениях, и в дальнейшем оно рассматриваться не будет.

Реальные разработки

Центр исследования, разработки и обслуживания вооружений Армии США (ARDEC) в арсенале Пикатинни, штат Нью-Джерси, несет ответственность за усилия армии в выполнении программы вооружений с низким побочным ущербом³². Один из проектов в области низкочастотной акустики представлял собой пульсатор, питаемый двигателем внутреннего сгорания или взрывом, загоняющий газ в трубы, чтобы создать мощный пучок, применяемый против небольших замкнутых объемов, а другой имел дело с недифрагирующими акустическими «пулями», излучаемыми антенной диаметром в 1 – 2 метра с помощью высокочастотного звука. Оба проекта выполнялись Ассоциацией научных применений и исследований (SARA) в Хантингтон-Бич, штат Калифорния³³. Похоже, что аналогичные проекты проводились и в России: в Центре испытания устройств с несмертельными эффектами в Москве давним американским сторонникам НСО Дж. и С. Моррис, как утверждалось, показали устройство, направляющее акустический импульс размером с бейсбольный мяч с частотой около 10 Гц на сотни метров, мощность которого может регулироваться вплоть до смертельной. Другим принципом был «разностный» тон, образующийся при пересечении двух не слышимых поодиночке пучков³⁴. Обсуждение акустических пуль и генерация слышимого звука или инфразвука из двух ультразвуковых полей обсуждается ниже в разделах 5.1.3 и 5.1.2. Так же, как и в проектах США, надежная опубликованная информация отсутствует.

Наиболее конкретная информация, доступная в настоящее время, по-видимому, содержится на нескольких первых страницах отчета SARA за 1996 год, как сообщалось в недав-

²⁷ "Army tests ..." (ссылка 18); Ackroyd et al. (ссылка 18), 224-225. См. также: Rodwell (ссылка 18).

²⁸ На последующей пресс-конференции британская армия представила вместо этого систему усилителя и громкоговорителя мощностью 350 Вт (см. ссылку 24), 13 единиц которой было закуплено, но «забыло» пригласить репортера *New Scientist*, который написал статью о «вопящем ящике», см. R. Rodwell, "How dangerous is the Army's squawk box?," *New Scientist* (27 September 1973): 730.

²⁹ Ackroyd et al., (ссылка 18), 224 – 225.

³⁰ M. Bryan, W. Tempest, "Does infrasound make drivers drunk?," *New Scientist* (16 March 1972): 584-586; R. Brown, "What levels of infrasound are safe?," *New Scientist* (8 Nov 1973): 414-415; H. E. von Gierke, D. E. Parker, "Infrasound," ch. 14 in: W. D. Keidel, W. D. Neff (eds.), "Auditory System - Clinical and Special Topics," *Handbook of Sensory Physiology*, vol. VI/3 (Berlin etc.: Springer, 1976): section VII.

³¹ Starr (ссылка 9).

³² Tapscott/Atwal (ссылка 14). См. также: <http://www.pica.army.mil/pica/products/tbiwc.html>.

³³ Starr (ссылка 9). См. также: <http://www.sara.com/documents/future.htm>. Похожая информация представлена в Tapscott/Atwal (ссылка 14); там утверждается, что Лос-Аламосская национальная лаборатория (ЛАНЛ) работает с акустическими пучками, но Starr упоминает ЛАНЛ только в связи с оптическим оружием и микроволновыми снарядами большой мощности. В брошюре ЛАНЛ упоминается только о двух последних темах, но не об акустическом оружии: "Special Technologies for National Security" (Los Alamos NM: Los Alamos National Laboratory, April 1993).

³⁴ М.Т. (ссылка 5).

давней обзорной статье³⁵:

- По отношению к воздействию на человека, некоторые из утверждений таковы: Инфразвук на уровне 110 – 130 дБ вызывает боль в желудке и сильную тошноту. Крайние уровни беспокойства и расстройств достигаются при минутных экспозициях на уровнях от 90 до 120 дБ на низких частотах (от 5 до 200 Гц), сильные физические травмы и повреждение тканей на уровне 140 – 150 дБ, а мгновенные травмы типа травм от ударных волн при примерно 170 дБ (объяснение единицы уровня, децибела, приводится ниже). На низких частотах резонансы в теле могут привести к кровотечению и спазмам; в диапазоне средних частот (0,5 – 2,5 кГц) резонансы в воздушных полостях тела могут вызвать нервное возбуждение, травмы тканей и перегрев; на высоких и ультразвуковых частотах (от 5 до 30 кГц) могут вызвать перегрева вплоть до смертельно высоких температур, ожоги тканей и обезвоживание; на более высоких частотах или при коротких импульсах при кавитации могут образовываться пузырьки и микроразрывы тканей.
- Разрабатываются несмертельное акустическое оружие для установки на вертолете (частота регулируется от 100 Гц до 10 кГц, радиус действия около 2 км, задача достичь 10 км), сирена, работающая от двигателя внутреннего сгорания (мощность в много киловатт, инфразвуковая), и акустическое пучковое оружие для запрета доступа на склады оружия массового поражения с применением термоакустического резонатора, работающего на частоте от 20 до 340 Гц.
- Применяя сжигание химического топлива, можно достичь средней мощности порядка мегаватта, с емкостью топливных баков на стационарных площадках, достаточной для работы в течение месяца.
- Акустическое оружие может быть использовано в осаждаемых посольствах США для контроля над толпой, для барьеров на периметрах или границах, для запрета доступа или атаки по площадям, для обезоруживания солдат или рабочих.

Следует отметить, что некоторые заявления об эффектах не выдерживают критики, в частности, для инфразвуковой и слышимой области³⁶. То же самое относится и к дальности в километры³⁷. Похоже, что SARA принимало прошлые заявления буквально, не проверяя их правильности³⁸.

В 1995 году в Германии Даймлер-Бенц Аэроспейс (ДАСА) в Мюнхене провело подробное исследование всех видов несмертельного оружия для министерства обороны. В то время как большая часть описаний методов и воздействий обоснованна, раздел по акустическому оружию содержит ошибки³⁹. Недавно немецкий институт Фраунгофера по химической технологии поручил задание разработки прототипа и проверки эффекта сдерживания сильного звука⁴⁰.

Задачи статьи

По моим сведениям, акустическое оружие не было предметом подробного открытого

³⁵ SARA Report, 10 February 1995 (revised 13 February 1996) и прочие ссылки, указанные Arkin (ссылка 12).

³⁶ Для инфразвука никакой боли или тошноты не наблюдалось вплоть до 172 дБ, см. ниже раздел 2.2. Для слышимого звука физические травмы и повреждения тканей отсутствуют до 150 дБ, см. раздел 2.3.

³⁷ Десятки метров более реалистичны (Приложение 2).

³⁸ Отметим, что в последнее время, по-видимому, в исследованиях инфразвука задачи несколько изменились, см. J. Hecht, "Not a sound idea," *New Scientist*, 20 March 1999, 17.

³⁹ Например, появление головокружения, рвоты и тошноты приписывались инфразвуку с уровнем 130 дБ (на деле 172 дБ, см. ниже раздел 2.2.3.2.), а разрыв барабанной перепонки – ударной волне в 130 дБ (на деле 185 дБ, см. раздел 2.5); Kap. 3.8, see "Konzeptbeschreibungen akustischer Wirkmittel" in J. Müller et al., *Nichtletale Waffen, Abschlussbericht*, Band II, Dasa-VA-0040-95=OTN-035020, Daimler-Benz Aerospace, 30. 4.1995, 307-333.

⁴⁰ A. Dahn, "Angriff auf das Trommelfell"; *Berliner Zeitung*, 24 March 1999; K.-D. Thiel, "Non-Lethal Weapons Activities at ICT," in *Non-Lethal Defense III* (ссылка 2), file ict.pdf.

научного исследования. Оно обсуждалось в разделе книги 1978 года и в трудах конференции 1994 года, которые в основном были связаны с проблемами гуманитарного права; однако, эти материалы были довольно краткими и не являлись количественными⁴¹. Последняя статья является значительно более подробной, но она в основном опирается на общие заявления фирмы, которая связана с разработкой акустического оружия, военной прессы и военных научно-исследовательских институтов. Автор призывает к «гораздо более детальному и полному пониманию повреждений, вызываемых мощными акустическими пучками» и просит сообщество гуманитарного права включиться в оценки и обсуждения⁴².

Данная статья предназначена для того, чтобы внести свой вклад в выполнение этой задачи, представляя больше надежной информации для того, чтобы серьезный анализ военно-тактических, гуманитарных, разоруженческих и прочих политических аспектов не опирался на недостаточно полную или даже на неточную базу⁴³.

Данное исследование базируется на открытой литературе и моем собственном теоретическом анализе, без доступа к научно-техническим данным, собранным в изучении и разработке акустического оружия, и без оригинальных экспериментов. Что-то могло быть пропущено; в некоторых местах были неизбежны догадки; а некоторые вопросы остались открытыми, в надежде на то, что ответы на них будут получены при последующих исследованиях. Рассматриваемые вопросы таковы:

- Как действует сильный звук, в особенности низкочастотный, на человека?
- Существует ли опасность хронических повреждений?
- Каковы свойства источников звука (прежде всего, требования по размерам, массе, мощности)?
- Как, и насколько далеко, распространяется сильный звук?
- Можем ли мы сделать выводы по практическому применению в полиции или армии?

Следующий подраздел содержит несколько общих положений акустики. Основные разделы посвящены воздействию сильного звука на человека, генерации сильного звука, защитным мерам, и лечению. В приложениях упоминаются, прежде всего, некоторые свойства волн давления в воздухе. Во-вторых, анализируются заявления в журнальных статьях, относящиеся к акустическому оружию.

Общие замечания по акустике

В широком смысле, любое изменение давления воздуха со временем представляет собой звук. Для синусоидального временного профиля количество повторений за единицу времени называется частотой, измеряемой в герцах, равных 1/сек. Обычно область частот ниже 20 Гц называют инфразвуком, но это не является абсолютным пределом слышимости – можно услышать и звуки с более низкими частотами, или воспринимать их другим способом, если давление достаточно велико. Для того, чтобы избежать путаницы с термином «слышимый», мы будем называть в этой статье область частот от 20 Гц до 20 кГц «звуковым диапазоном». Пороги слышимости, боли и повреждений уменьшаются с ростом частоты от нескольких Гц до 20 – 250 Гц (см. ниже рис. 2); поэтому низкочастотные эффекты намного сильнее на низких звуковых частотах, чем в области инфразвука. Поэтому, несмотря на повышенное внимание журналистов к инфразвуку, мы будем обозначать диапазон от 1 до 250 Гц как «низкочастотный» и рассматривать его как целое. Для частот выше 20 кГц используется обычный термин «ультразвук».

Вариации давления означают отклонение от среднего давления воздуха к более высоким или более низким значениям, означающим избыточное или недостаточное давление. Обычно эти отклонения существенно меньше давления воздуха; они называются звуковым

⁴¹ Lumsden (ссылка 17); L. Liszka, "Sonic Beam Devices - Principles" in *Expert Meeting on Certain Weapon Systems and on Implementation Mechanisms in International Law*, Geneva, 30 May - 1 June 1994, Report (Geneva: International Committee of the Red Cross, July 1994), 89-91.

⁴² Arkin (ссылка 12).

⁴³ Моим предметом является только звук в воздухе. Потенциальные подводные применения, например, против водолазов или животных, требуют отдельного рассмотрения.

давлением. Поскольку звуковое давление и интенсивность меняются на много порядков величины, а восприятие громкости человеком приближенно является логарифмическим, эти физические величины часто задаются как уровни L в логарифмическом масштабе, в единицах децибелов, где

$$L_p = 20 \log(p_{rms}/p_{ref}) \text{ dB} \quad \text{и} \quad L_I = 10 \log(I_{rms}/I_{ref}) \quad (1)$$

где p_{rms} и I_{rms} соответственно являются среднеквадратичными значениями звукового давления (отклонения от статического давления воздуха, измеренного в паскалях) и интенсивности звука (акустической мощности на единицу площади, пропорциональной квадрату звукового давления, измеренной в ваттах на квадратный метр). Десятикратное увеличение давления означает стократное увеличение интенсивности и увеличение уровня на 20 дБ. В качестве опорных значений в акустике обычно принимают

$$p_{ref} = 20 \text{ мкПа} \quad \text{и} \quad I_{ref} = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2 \quad (2)$$

которые примерно соответствуют порогу чувствительности человеческого слуха на частоте 1 кГц, близкой к максимуму чувствительности; из уравнения (А-2) и акустического импеданса воздуха $\rho_0 c_0 = 400 \text{ кг/(м}^2 \text{сек)}$ при нормальных условиях следует, что оба уровня, для давления и для интенсивности, равны⁴⁴. В этой статье уровни обычно отсчитываются от данных значений; масштаб уровней, взвешенных по частоте с учетом человеческой чувствительности, таких, как dB(A), при использовании оговаривается особо.

Наиболее важные свойства волн давления в воздухе приведены в приложении 1. Для не очень больших звуковых давлений – ниже примерно 100 Па (уровень 134 дБ), 0,1% от нормального давления – эффекты могут быть описаны линейными уравнениями. Скорость звука постоянна и принцип суперпозиции верен, так же, как в оптике (линейная акустика). При более высоких значениях, но все еще меньших атмосферного давления, становится важным увеличение скорости распространения с давлением, и волны при распространении становятся круче, но недостаточное давление примерно равно избыточному, и скорость распространения остается такой же, как для малых амплитуд (нелинейная акустика, образование слабых ударных волн). Такие нелинейные эффекты будут важны при преобразовании частот, которое, как говорят, имеет место в акустическом оружии. Если избыточное давление больше давления покоя, так, например, как в ударных волнах от взрывов, скорость ударной волны становится намного большей, а недостаточное давление не может быть равно избыточному (сильная ударная волна). Рассматривать взрывное оружие как «акустическое» представляется проблематичным, поскольку многие виды разрывных снарядов, бомб или устройств объемного взрыва будут подпадать под эту категорию⁴⁵. Однако, для полноты, из-за плавного перехода от одного вида к другому, и из-за того, что ударные волны упоминались в данном контексте⁴⁶, в данное исследование включены и сильные ударные волны.

Влияние сильного звука на человека⁴⁷

Сильный звук может временно или постоянно уменьшить способность слышать и повлиять на вестибулярный аппарат. При очень больших уровнях даже при коротких экспозициях могут произойти повреждения ушных органов. При еще более высоких уровнях, возникающих практически только при взрывах, могут быть повреждены и другие органы, самыми чувствительными из которых являются легкие.

В этом разделе сначала будут представлены несколько общих свойств уха и его по-

⁴⁴ Для кратковременных изменений давления уровень часто определяется как максимальный достигаемый уровень давления, а не как его среднеквадратичное значение.

⁴⁵ Обсуждение взрывного оружия см. в Lumsden (ссылка 17), глава 6.

⁴⁶ SARA (ссылка 12).

⁴⁷ Для сокращения объема в этом разделе о воздействиях были исключены несколько деталей и ссылок. Полную информацию см. в Altmann (ссылка 1).

вреждений. В последующих частях особое внимание будет уделено низким частотам, поскольку их влияние менее известно, чем в звуковом диапазоне, и поскольку они упоминаются во многих публикациях по акустическому оружию. Высокочастотный звук и ультразвук будут рассматриваться вкратце. Особый подраздел будет посвящен ударным волнам, например, от взрывов.

В табл. 9 в конце этого раздела будет приведена упрощенная сводка различных эффектов в разных диапазонах частот.

Общие сведения об ухе⁴⁸

Слух и нарушения слуха. В человеческом ухе (см. рис. 1) звуковые волны, входящие в ушной канал, заставляют колебаться барабанную перепонку. Это движение передается тремя косточками к овальному окну в начале лабиринта. Образующаяся волна давления, распространяющаяся в перилимфе улитки, изгибает базилярную перепонку, которая продольно разделяет улитку на лестницу преддверия и на барабанную лестницу; эти два канала соединяются на конце улитки, и последний канал возвращается назад к круглому окну среднего уха. На базилярной перепонке расположен орган Корти, волосатые клетки которого определяют деформацию и передают информацию через клетки ганглия в мозг. Евстахиевы трубы соединяют среднее ухо с полостями носа. С улиткой соединены полости и три полукруглых канала вестибулярного аппарата, которые определяют движение головы и помогают поддерживать равновесие.

Среднее ухо содержит механизмы, которые могут ослаблять уровень вибраций, связанных с внутренним ухом, определяя этим пределы слуха и уменьшая повреждения от сильного звука. На очень низких частотах выравнивание давлений может быть обеспечено евстахиевой трубой. Ушной рефлекс, сокращающий мускулы среднего уха (барабанный мускул и стременной мускул) примерно через 0,2 сек после появления сильного звука, ослабляет трансмиссию через косточки. Из-за механических свойств косточек частоты выше 20 кГц через них не передаются.

После воздействия сильного звука слуховая система обычно становится менее чувствительной; иначе говоря, пороги слышимости увеличиваются. Восстановление будет возможно, если экспозиция не превышает зависящих от частоты пределов уровня и длительности, и если период отдыха достаточно велик. Их обычно называют временными сдвигами порогов (ВСП) и измеряют через 2 минуты после окончания шума. До уровня ВСП примерно в 40 дБ восстановление спокойно происходит примерно в течение до 16 часов. После определенного предела восстановление будет неполным и остаются постоянные сдвиги порога (ПСП), т.е. хроническая потеря слуха. Из-за того, что так называемая «потеря слуха из-за шума» в некоторой степени накапливается, критерии экспозиции, помимо спектрального состава и уровня, включают длительность и время восстановления⁴⁹.

⁴⁸ F. G. Hirsch, "Effects of Overpressure on the Ear - A Review," *Annals of the New York Academy of Sciences* 152(Art. 1) (1968): 147-162; W. D. Keidel, W. D. Neff (eds.), "Auditory System - Anatomy, Physiology (Ear)," in *Handbook of Sensory Physiology*, vol. V/1 (Berlin etc.: Springer, 1974); Karl D. Kryter, *The Effects of Noise on Man* (New York etc.: Academic 1970; second edition 1985), ch. 1; v. Gierke/Parker (note 30); W. Melnick, "Hearing Loss from Noise Exposure," in C. M. Harris (ed.), *Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control* (New York etc.: McGraw-Hill, 1991) ch. 18; W. D. Ward, "Noise-Induced Hearing Damage," in M. M. Paparella et al. (eds.), *Otolaryngology* vol. II (3rd edition Philadelphia etc.: Saunders 1991) ch. 45; B. Berglund, P. Hassmen, "Sources and effects of low-frequency noise," *Journal of the Acoustical Society of America* 99(5) (May 1996): 2985-3002.

⁴⁹ Отметим, что PTS накапливается в течение долгого времени, а TTS возникает ежедневно.

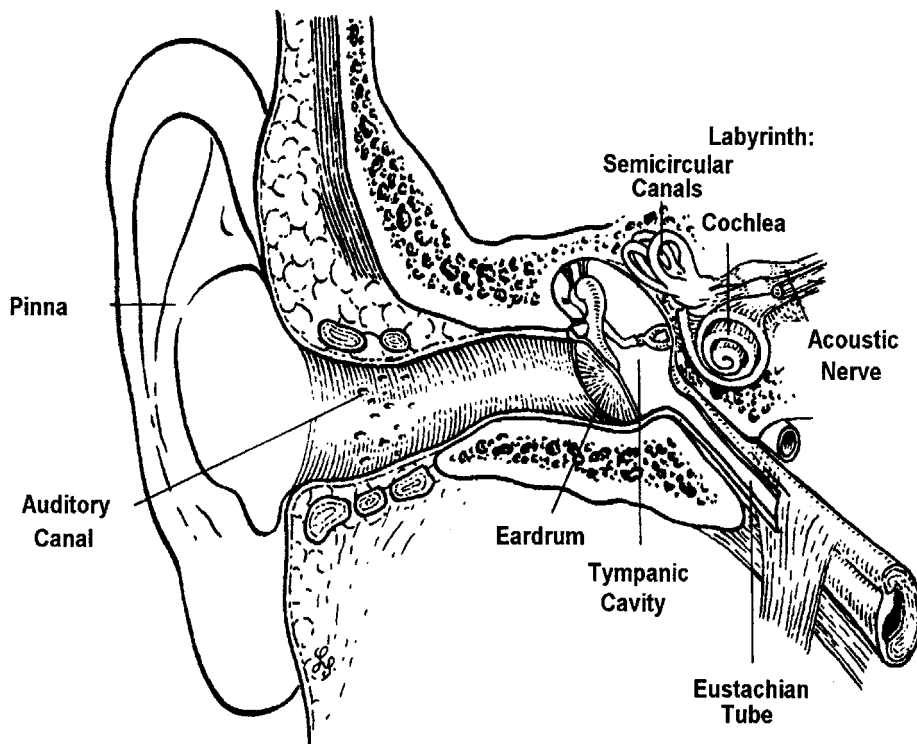


Рисунок 1

Человеческое ухо состоит из трех основных частей: внутреннего, среднего и внешнего уха. Звуковые волны отражаются ушной раковиной и распространяются по слуховому каналу, вызывая вибрации барабанной перепонки. Три косточки среднего уха (молоточек, наковальня и стремя) передают это движение – усиливая давление – к овальному окну на входе лабиринта и к внутренней перилимфе. Образующаяся волна давления проходит внутрь улитки, изгибая базилярную перепонку, которая продольно разделяет улитку и несет на себе чувствительные волосатые клетки. Их возбуждение передается в мозг по слуховому нерву. Выравнивание давления в среднем ухе может обеспечиваться евстахиевой трубой. Мышцы среднего уха (не показаны) могут ослаблять трансмиссию по цепочке косточек. Вторая часть лабиринта представляет собой вестибулярный аппарат с полостями и полукруглыми каналами для определения движения. Рисунок взят из работы⁵⁰ и исправлен с разрешения авторов и издателя; исходное авторское право принадлежит Шпрингер-Ферлаг. Подписи к рисунку (слева направо против часовой стрелки): ушная раковина; слуховой канал; барабанная перепонка; барабанная полость; евстахиева труба; слуховой нерв; улитка; лабиринт; полукруглые каналы.

Если ВСП могут быть измерены в экспериментах на людях, для ПСП приходится опираться на данные о пациентах, пострадавших в несчастных случаях, на производстве и т.п. Другой метод основан на экспериментах с животными, результаты которых, конечно, не могут быть непосредственно применены к людям. В качестве подопытных животных обычно используют шиншиллу, морских свинок или кошек, которые, однако, считаются более чувствительными, чем люди; использовались также собаки и обезьяны, а для ударных волн – овцы.

На базе данных по ВСП можно предсказать, какой шум (большего уровня или длительности) вызовет большие ПСП. Существуют сложные схемы качественной оценки ПСП от шума по ожидаемым ВСП, согласно которым ПСП от ежедневного шума в течение 20 лет примерно равен ВСП после 8 часов. Считается, что ПСП возникает в результате процессов механического и метаболического повреждения чувствительных волосатых клеток на базилярной перепонке улитки. ПСП, как и ВСП, сильно зависит от субъекта. Обычно они раньше и сильнее проявляются на частоте 4 кГц, и распространяются к большим и меньшим частотам.

⁵⁰ H.-G. Boenninghaus mit T. Lenarz, Hals-Nasen-Ohrenheilkunde für Studierende der Medizin, 10. Aufl., Berlin etc.: Springer, 1996.

там, независимо от спектра шума на рабочем месте. Имеется обширная литература по всем аспектам нарушения слуха, таким, как измерения и их документирование, понимание физиологических механизмов, количественная оценка риска, рекомендация пределов превентивных мер, анализ допустимых повреждений и доли пораженного контингента. Наибольшие опасения вызывает эффект накопления за многие годы экспозиции, например, на рабочем месте, где ПСП может достигать таких низких уровней, как 80 dB (A), хотя обычно он лежит в пределах от 80 до 105 dB (A). Однако, имеются также травмы, вызванные одной или несколькими короткими экспозициями сильного звука, что часто называют общим именем «акустических травм»⁵¹. Их воздействие на внутреннее ухо может изменяться от некоторого смещения волосков волосатых клеток до полного разрушения органа Корти. Во-вторых, могут дегенерировать клетки ганглия и нервные волокна.

На рис. 2 показаны пороги слышимости человека и кривые равного восприятия громкости от очень низких до высоких частот⁵². Как можно видеть, воспринимаемая громкость, измеряемая в фонах, на каждой частоте растет со звуковым давлением примерно логарифмически. Там же показаны пороги повреждения слуховой системы, которые важны для обоснования акустического оружия:

- Пороги потери слуха – выше первого при определенных условиях (уровень шума, продолжительность, количество и последовательность экспозиций, зависимость от индивидуальных свойств) существует возможность хронической потери слуха. Близко к порогу продолжительность может составлять несколько часов ежедневной экспозиции в течение многих лет. Выше второго порога, при 120 дБ, когда начинается неудобство, существует высокая степень риска потери слуха даже при коротких и немногих экспозициях (за исключением импульсных звуков).
- Боль в ушах – она начинается выше примерно 140 дБ (200 Па) по всему звуковому диапазону. Однако, в инфразвуковой области порог возрастает при уменьшении частоты до 160 и 170 дБ (2 и 6 кПа). Для статического давления боль начинается выше примерно 173 дБ (9 кПа) для недостаточного давления и примерно 177 дБ (14 кПа) для избыточного давления. Считается, что боль появляется, когда превышаются механические пределы системы среднего уха, и она не связана непосредственно с потерей слуха: слух может нарушиться без боли, и наоборот. Однако, при обычных условиях надо прекратить экспозицию при ощущении боли.
- Разрыв барабанной перепонки – порог в звуковом диапазоне составляет около 160 дБ (2 кПа). Для мгновенного повышения статического избыточного давления порог равен 186 – 188 дБ (42 – 55 кПа). Хотя разорванная перепонка обычно восстанавливается, повреждения среднего и внутреннего уха могут сохраниться. Однако, в некотором роде перепонка служит предохранителем, уменьшая давление, передаваемое внутреннему уху, и, следовательно, потенциально опасные повреждения внутреннего уха.

⁵¹ Отметим, что иногда под этим термином понимают хронические травмы, а повреждение при коротких экспозициях называют острой акустической травмой.

⁵² Громкость измеряется сравнением субъективного восприятия тонов, отличающихся от 1 кГц. При 1 кГц уровень громкости в фонах считается равным соответствующему уровню звукового давления в децибелах.

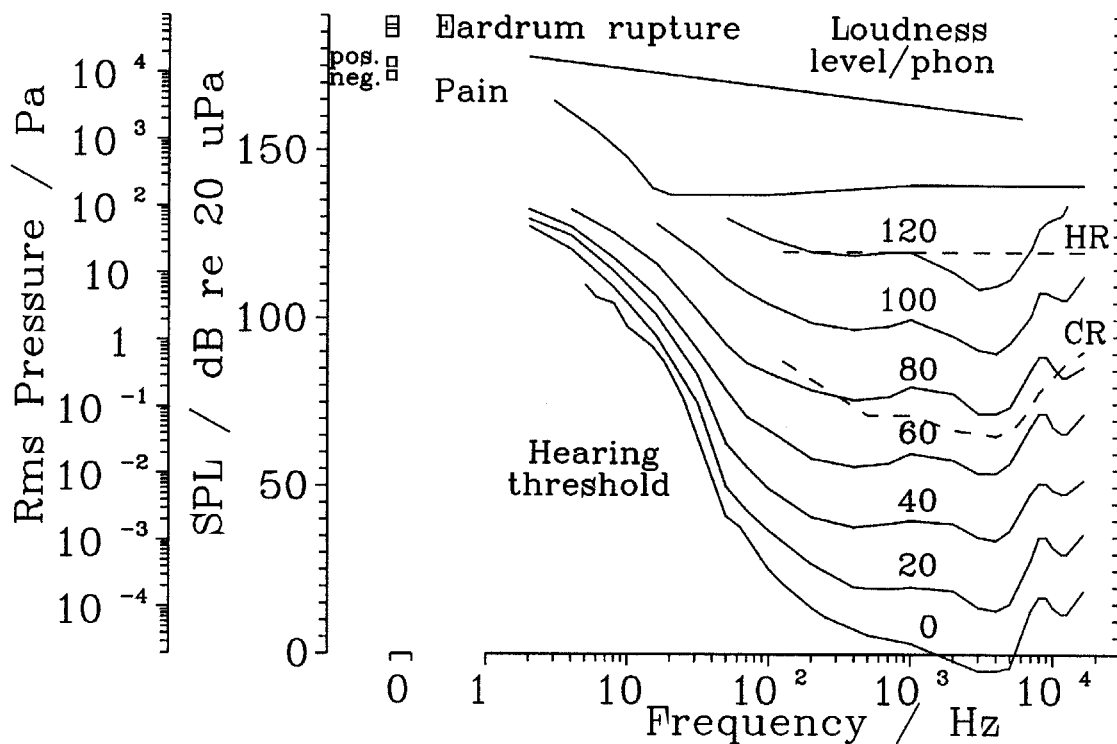


Рисунок 2

Порог слышимости (соответствующий 0 фонам), кривые равной громкости для 20, 40, 60, 80, 100 и 120 фон, среднеквадратичное звуковое давление (в логарифмическом масштабе) и его уровень в зависимости от частоты. Пороговые значения соответствуют бинауральному прослушиванию чистых тонов; пороги моноаурального восприятия несколько выше. Также приводятся (штриховыми линиями) условного (CR) и высокого (HR) риска хронической потери слуха боли в ушах и разрыва барабанной перепонки. Порог высокого риска соответствует также ощущению дискомфорта; порог колющего ощущения несколько ниже болевого порога. Пороги повреждений известны относительно неточно, в особенности для разрыва барабанной перепонки. Слева показаны пороги боли в ушах и разрыва барабанной перепонки для статического давления. Для болевого порога значения для положительного (pos.) и отрицательного (neg.) давления несколько отличаются. Отметим, что нормальное атмосферное давление равно 101 кПа⁵³.

Вестибулярный аппарат. Вестибулярная система внутреннего уха содержит полости (маточку и мешочек) с датчиками линейного ускорения и три полукруглых канала для определения угловых ускорений. Вестибулярная система управляет посредством нескольких, в основном подкорковых, нервных каналов центральной нервной системы движением глаз и изменением положения тела, и обеспечивает восприятие движения и ориентации. Вестибулярная система является одной из сенсорных групп, вызывающих морскую болезнь (две другие, визуальная и соматосенсорная, имеют меньшее отношение к данному контексту).

Жидкости (эндолимфа и перилимфа) вестибулярных органов соединены с жидкостью спиральной улитки. Поэтому, акустическая стимуляция органов равновесия в принципе возможна, и это может быть механизмом тошноты и нарушения равновесия при действии ин-

⁵³ N. S. Yeowart, M. J. Evans, "Thresholds of audibility for very low-frequency pure tones," *Journal of the Acoustical Society of America* 55, no. 4 (April 1974): 814-818; A. M. Small, Jr., R. S. Gales, "Hearing Characteristics," in Harris (ссылка 48), chap. 17. H. Møller, J. Andresen, "Loudness of Pure Tones at Low and Infrasonic Frequencies," *Journal of Low Frequency Noise and Vibration* 3, no. 2 (1984): 78-87; Berglund/Hassmen (note 48); Melnick (ссылка 48); H. E. von Gierke, C. W. Nixon, "Effects of Intense Infrasound on Man," in W. Tempest (ed.), *Infrasound and Low Frequency Vibration* (London etc.: Academic, 1976), ch. 6, 134; v. Gierke/Parker (ссылка 30), 604.

фразвука. Эффекты и пороги для человека и животных в различных диапазонах частот об-суждаются ниже.

Воздействие низкочастотного звука

В 60-х и 70-х г.г. поднялась волна присвоения инфразвуку преувеличенных эффектов, и не только в обычной печати⁵⁴. Многие из них были анекдотичными. В некоторых случаях эффекты, наблюдаемые в одной лаборатории, не могли обнаружить в другой. Одной из причин могла быть генерация гармоник при испытаниях.

Порог слышимости и восприятие громкости на низких частотах. Слышимость не обрывается внезапно ниже 20 Гц. Как показывают точные измерения, при достаточно высоких звуковых давлениях ухо может чувствовать инфразвук вплоть до 1 Гц. Однако, ниже 50 Гц порог резко повышается при уменьшении частоты, как это видно из рис. 2⁵⁵. На низких частотах кривые равной громкости расположены намного ближе; это означает, что восприятие громкости возрастает со звуковым давлением намного быстрее, чем на высоких частотах. Точно так же, болевой порог на низких частотах приближен к порогу слышимости.

Воздействие звука низкой частоты и высокой интенсивности на ухо и слух. Слуховая система человека представляется сравнительно устойчивой к низкочастотной экспозиции, в особенности для инфразвука, где даже при высоких уровнях возникают только некоторые ВСП и не наблюдается никаких ПСП (табл. 2). ВСП для инфразвука ниже, чем для высоких частот, поскольку квазистатическая нагрузка на среднее ухо понижает его трансмиссию во внутреннее ухо. Вероятно, что наблюдаемые ПСП, например, у персонала, подвергающегося действию инфразвука на рабочем месте, в основном связаны с одновременным воздействием высоких частот.

Конечно, индивидуум не может сразу же почувствовать сдвиг порога и, следовательно, воздействия оружия, по крайней мере, с точки зрения разработчиков и пользователей оружия. Больше относится к делу ощущение давления, которое независимо от частоты развивается примерно при 130 дБ. Еще более впечатляющей будет боль в ушах, которая начинается на уровнях от 135 до 162 дБ, в зависимости от частоты (см. рис. 2). Барабанная перепонка человека разрывается при изменении статического давления на 42 – 55 кПа (186 – 189 дБ). Поскольку на звуковых частотах порог, по-видимому, превышает 160 дБ (2 кПа), для инфразвука порог будет расположен между этими значениями⁵⁶.

⁵⁴ См., например, сенсационную статью "The Low-Pitched Killer - Can sounds of silence be driving us silly" (*Melbourne Sunday Press*, 7 Sept. 1975), перепечатанную у Broner (ссылка 23); см. также ссылку 30. Возвращаясь к науке, интересно отметить, что Lumsden писал о совещании Британской ассоциации содействию науки, где "Директор [Британского] общества борьбы с шумом сообщил, что в исследовательском центре в Марселе, Франция, был построен генератор инфразвука с частотой 7 Гц. Он сказал, что при испытаниях устройства люди чувствовали себя нездоровыми в течение часов. Генератор мог вызывать головокружение, нервное утомление и «морскую болезнь» и даже смерть на расстоянии до 8 км (*Associated Press*, Leicester, England, 9 September 1972)." Lumsden (ссылка 13), 204. Это очевидно относится к работе Gavreau's в Марселе, см. V. Gavreau, R. Condat, H. Saul, "Infra-Sons: Generateurs, Detecteurs, Proprietes physiques, Effets biologiques," *Acustica* 17, no. 1 (1966): 1-10; V. Gavreau, "Infrasound," *Science Journal* 4, no. 1 (Jan. 1968): 33-37. Отметим, что сегодня ученые того же института сомневаются в выводах Gavreau о воздействии инфразвука, поскольку его эксперименты и наблюдения не были повторены и подтверждены при точных условиях эксперимента. G. Canevet, Laboratoire de Mecanique et d'Acoustique CNRS, Marseille, частное сообщение.

⁵⁵ Таким образом, при определении возможностей слуха следует прилагать большие усилия к снижению нелинейности при генерации звука, поскольку гармоники внешнего происхождения на высоких и лучше слышимых частотах могут привести к неверным завышенным значениям.

⁵⁶ Имеется один документированный случай, когда у одного экспериментатора после 5 минут экспозиции звуком в 158 дБ (1,6 кПа) с частотой 6,5 кГц наблюдался небольшой разрыв и кровь во внешнем канале уха, см. H. Davis, H. O. Parrack, D. H. Eldredge, "Hazards of Intense Sound and Ultrasound," *Annals of Otology, Rhinology, Laryngology* 58 (1949): 732-738.

Таблица 2. Воздействие звука низкой частоты на человека. Отметим, что у шиншилл, гораздо более чувствительных к обычному звуку, наблюдаются явные повреждения среднего и внутреннего уха после экспозиции с частотами от 1 до 30 Гц при уровнях 150 – 172 дБ⁵⁷.

Частота (Гц)	Уровень (дБ)	Длительность	Эффект
< 1 – 20	125-171	Минуты	ВСП в звуковой области, восстановление через полчаса
3 – 23	130	1 час	Нет ВСП
Низкая	90	Часы	ВСП, восстановление через 2 дня
< 40	140-150	Минута	Нет ВСП
Наполнение воздушного мешка:			
Инфразвук (5 Гц)	165 (макс.)	0,4 сек	Нет ВСП
Высокая (0,5-1 кГц)	153	0,4 сек	ВСП 5-8 дБ на 1,5-12 кГц
Сумма	170 (макс.)	0,4 сек	ВСП 5-8 дБ на 1,5-12 кГц
Ударная волна (2-20 Гц)	162-171	Секунды	Нет ВСП

Воздействие звука низкой частоты и высокой интенсивности на вестибулярный аппарат. Вестибулярное возбуждение может быть измерено по рефлекторным движениям глаза (нистагму), или, у человека, по поведению в тестах на равновесие. Ни у животных, ни у человека не наблюдалось никаких эффектов от ультразвука от 130 до 172 дБ. Следовательно, нарушение равновесия и тошнота, приписываемые журналистами мощному инфразвуку, не подтверждаются. С другой стороны, низкие звуковые частоты от 50 до 100 Гц при 150 – 155 дБ вызывает слабую тошноту и головокружение.

Воздействие звука низкой частоты и высокой интенсивности на органы дыхания. Сильный инфразвук с частотой 0,5 Гц может действовать как искусственные легкие. Воздействии ударной волны от сверхзвуковых самолетов (с основной энергией в области инфразвука) между 154 дБ (1,0 кПа) и 171 дБ (6,9 кПа) не приводит к отрицательным эффектам на респираторную систему человека.

В области низких звуковых частот ниже 50 Гц экспозиция на уровнях до 150 дБ (0,69 кПа) вызывают вибрации грудной клетки и некоторые изменения дыхательного ритма, вместе с ощущением полноты глотки (позывов к рвоте); эти ощущения могут казаться неприятными, но очевидно переносимы. Однако, между 50 и 100 Гц субъективная толерантность достигается и экспозиция прекращается при 150 – 155 дБ (0,63 – 1,1 кПа); эффекты, относящиеся к дыханию, включают дискомфорт глотки, кашель, давление под грудной, одышку при дыхании⁵⁸.

Прочие эффекты звука низкой частоты и высокой интенсивности. При экспозиции интенсивным звуком низкой частоты (от 30 до 100 Гц) при уровнях 150 дБ наблюдаются некоторые другие эффекты. Среди них увеличенная частота пульса, покраснение кожи, слюноотделение и боль при глотании. Поле зрения дрожит и острота зрения уменьшается. У субъектов наблюдается очевидная усталость после экспозиции. С другой стороны, короткий инфразвук не влияет на остроту зрения, двигательную активность и речь.

Обсуждение вибраций. Иногда говорят, что инфразвук приводит в движение органы

⁵⁷ У собак и кошек наблюдались меньшие патологические повреждения. С другой стороны, экспозиция инфразвуком в 172 дБ в течение 30 секунд не привела даже к покраснению человеческой барабанной перепонки.

⁵⁸ С. Mohr, J. N. Cole, E. Guild, H. E. von Gierke, "Effects of Low Frequency and Infrasonic Noise on Man," *Aerospace Medicine* 36, no. 9 (1965): 817-824. Что касается сильного воздействия при низких слышимых частотах, о котором сообщалось С. Mohr, et al., отметим, что сегодня в той же лаборатории имеются сомнения в том, что воздействие было связано с воздухом, а не с каплями масла от компрессора. Эксперименты должны были быть повторены в 1999 году. R. McKinley, Aural Displays and Bioacoustics Branch, Air Force Research Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, OH, U.S., частное сообщение.

так же, как внешние вибрации, приложенные к телу. Несмотря на то, что имеется сходство, существуют также и важные различия.

При вертикальном вибрационном возбуждении стоящего или сидящего человека с частотой менее 2 Гц тело движется как целое. При повышении частоты возникает резонансное усиление на частотах, зависящих от части тела, индивидуума и позы. Основным резонанс наблюдается в области 5 Гц, где наблюдается наибольший дискомфорт; причина заключается в фазированном перемещении всех органов брюшной полости с последующим изменением объема легких и грудной клетки⁵⁹.

Таблица 3. Воздействия звука высокой частоты на человека. На высоких частотах человеческий организм гораздо менее восприимчив, чем в области 1 кГц.

Частота (кГц)	Уровень (дБ)	Длительность	ВСП	ПСП	Замечания
0,1; 1; 2; 4	110, 120, 130	1 – 64 мин.	Максимум на 4 кГц, много меньше на 1 и 2 кГц, еще меньше на 0,5 кГц; восстановление от 60 дБ за 5 суток	Нет указаний	
0,25 – 5,6	До 140	Секунды		Точно нет	Проверка порогов тика и боли
Широкополосный шум (0,5-1 кГц)	153	0,4 сек.	4 – 8 дБ на 1,5 – 12 кГц, восстановление за минуты	Нет	Молодые здоровые люди
Шум РД	> 140	Секунды		Нет после нескольких месяцев	Наземный и палубный персонал
9 – 15	140 – 156	5 мин.	На частоте экспозиции и половинной, быстрое восстановление	Нет	

При действии вариаций давления воздуха на тело ситуация иная. На низких частотах, где размеры тела меньше длины волны, т.е. больше двух метров для частот ниже 170 Гц одно и то же мгновенное давление прилагается повсеместно, и ткань ведет себя как вязкоупругая жидкость с гораздо меньшей сжимаемостью, чем у воздуха⁶⁰. Это приводит к некоторой вибрации, но из-за большой разницы импедансов почти вся энергия отражается. Исключением являются замкнутые объемы воздуха, окруженные телом, как в ухе, где поглощается около 90% падающей энергии, или легкие, где грудная клетка или живот легче перемещаются при приложении внешнего давления. Поскольку внешнее давление одновременно вызывает поток воздуха через трахею в легкие и из них, внешнее давление противодействует перемещению грудной клетки и живота. Система действует более жестко, чем при одностороннем вибрационном возбуждении, и резонанс (с наибольшей скоростью при звуковом давлении и поэтому наибольшем напряжении в тканях) расположен при 40 – 60 Гц, вместо одной десятой от этой величины.

⁵⁹ Человек может выдержать довольно большие ускорения. В экспериментах с частотами от 1 до 25 Гц субъективная толерантность достигалась при ускорениях, в несколько раз превышающих нормальное ускорение свободного падения ($g = 9,8 \text{ м/сек}^2$); подопытные страдали, между прочим, от одышки, боли в груди и в животе, и иногда от кишечного кровотечения. Однако, хронических последствий не наблюдалось.

⁶⁰ Если звуковое давление действует только на часть поверхности тела, то боковые движения и сдвиговые волны в ткани могут привести к гораздо большему выделению энергии.

Воздействие высокочастотного звука большой интенсивности

Влияние на ухо и слух. ВСП в основном наблюдалось и изучалось при производственной экспозиции в течение десяти лет или более на взвешенном уровне от менее 80 дБ(А) до, в основном, менее 120 дБ(А). Чувствительность к ВСП и ПСП примерно следует контурам громкости. Однако, в нашем случае вопросы ставятся для коротких экспозиций при потенциально больших уровнях.

Что касается опасности получения хронических повреждений от одной или нескольких экспозиций (акустической травмы), то здесь, понятно, экспериментальных данных на людях немного. Для того, чтобы оценить ожидаемые эффекты, можно оценить соответствующие эксперименты по ВСП, использовать критерии повреждения, полученные из соответствия между ВСП и ПСП, и сделать осторожные выводы из экспериментов на животных. В табл. 3 показано, что короткие эксперименты на высоких уровнях не вызывают ПСП у людей. В табл. 4 показаны результаты ПСП экспериментов на животных.

Акустические травмы при короткой экспозиции возникают при превышении некоторой критической комбинации уровня и длительности, который соответствует некоторому «пределу упругости» органа Корти. Эксперименты с шиншиллами и морскими свинками показали, что примерно одинаковые обширные повреждения возникают при постоянном значении произведения квадрата интенсивности на длительность воздействия, т.е. для каждого увеличения уровня на 5 дБ длительность следует поделить на 10. Предполагая, что такой же закон справедлив и для людей и принимая критическое значение, отделяющее некоторую потерю слуха от акустической травмы для морских свинок, которое близко к человеческой чувствительности, например, 7 минут при 135 дБ, можно получить альтернативные комбинации в 40 сек при 140 дБ, 4 сек при 145 дБ, и 0,4 сек при 150 дБ⁶¹. Следовательно, кажется разумным предположить, что одиночная экспозиция при болевом пороге в звуковой области (140 дБ) станет опасной, т.е. приведет к выраженному ПСП у большей части экспонированных субъектов, после примерно половины минуты, а при больших уровнях на соответственно менее длительных экспозициях.

Ожидается, что разрыв барабанной перепонки при высоких звуковых частотах будет наступать при пороге выше 160 дБ (2 кПа)⁶².

Прочие эффекты звука высокой частоты и большой интенсивности. Вестибулярное воздействие звука на человека начинает проявляться при уровнях, несколько больших примерно 125 дБ. Нарушение равновесия ощущается на критических частотах обращения вблизи реактивных двигателей на уровнях около 140 дБ. Хотя эти авторы приводят несколько устных сообщений об аналогичных эффектах и их самих часто цитируют, похоже, что условия и причины не были изучены достаточно детально⁶³. Воздействие высоких уровней на животных лежит в пределах от движения глаз до серьезных повреждений вестибулярного аппарата. Не ожидается, что звук высокой частоты сможет привести к вредному воздействию на дыхательную систему, поскольку изменения давления происходят слишком быстро

⁶¹ Отметим, что для почти ежедневной экспозиции людей в течение 10 лет короткими тонами оценивались гораздо более низкие пограничные уровни повреждений от 115 до 130 дБ. Для максимального мгновенного звукового давления, случающегося в течение рабочего дня в форме изолированного события, указывается величина в 200 Па (140 дБ).

⁶² См. ссылку 57.

⁶³ Авторы описывают «наиболее неприятное и раздражающее ощущение общей неустойчивости и слабости»; тошнота, настоящее головокружение, нарушения зрения или нистагм не наблюдались. Защита ушей останавливала эти воздействия. См. E. D. D. Dickson, D. L. Chadwick, "Observations on Disturbances of Equilibrium and Other Symptoms Induced by Jet Engine Noise," *Journal of Laryngology and Otology* 65 (1951): 154-165. Это, кажется, единственная статья, в которой достаточно надежно и полно описаны симптомы и обстоятельства нарушения равновесия рядом с реактивными двигателями. В последующих исследованиях наземного или палубного персонала проблемы равновесия не упоминались, несмотря на то, что персонал находился под влиянием звука в 140 дБ и выше, часто без защиты ушей. Статья Dickson/Chadwick цитировалась в 80-х годах.

для того, чтобы привести к заметному перемещению органов или воздуха в трахее. Однако, резонансы в открытой полости рта, или носа могут привести к ощущению прикосновения или покалывания на уровнях выше 120 дБ.

На уровнях в 160 дБ и выше существенным становится нагрев. В то время как поглощение на обнаженной коже мало из-за большого различия импедансов, оно становится сильным там, где сильное трение противодействует движению воздуха, как в ткани, волосах, мехе, или узких каналах. Поскольку уровни выше 140 дБ в диапазоне высоких звуковых частот исключительно редки, и персонал на рабочем месте должен быть в первую очередь защитить свои уши, понятно, почему слуховые или прочие повреждения из-за такого шума практически не были описаны.

Таблица 4. ВСП и физиологические повреждения от звука высокой частоты у животных. В экспериментах с кошками на всех частотах увеличение на 10 дБ вызывает переход от минимального до серьезного повреждения улитки.

Животные	Частота (кГц)	Уровень (дБ)	Длительность	ПСП	Физиологические нарушения
Шиншилла		Около 120	Около часа		Повреждение клеток волос и т.д.
Морская свинка	0,19 – 8,0	135 – 140 > 140	Минуты Минуты		Серьезные травмы клеток волос Разрушение органа Корти в наиболее пораженных местах
Кошка	0,125 1,0 2,0 4,0	150 153 – 158 120 130 140 140 135 140	4 часа 4 часа 1 час 1 час 1 час 1 час 1 час 1 час	Нет Частичная или полная глухота Нет 55 дБ на 2 кГц Глухота на всех частотах Глухота при > 2 кГц Нет 60 дБ на 4 кГц	Потеря клеток волос в целом вместе с функциональными устройствами

Воздействие ультразвука большой интенсивности

В начале 50-х г.г. много говорили об «ультразвуковой болезни», связанной с симптомами головной боли, тошноты, усталости и т.п., проявляющейся у персонала, работающего вблизи недавно появившихся реактивных самолетов. Позднее такие же жалобы поступали от лиц, работающих с мойками и аналогичными промышленными устройствами. Однако, кажется, что эти эффекты, скорее всего, были вызваны одновременно присутствовавшим высокочастотным, а иногда и низкочастотным шумом⁶⁴.

Воздействие сильного ультразвука на слух. Верхний уровень слышимости меняется в зависимости от отдельных лиц и уменьшается с возрастом. Хотя на основе проводимости костей можно добиться слуховых эффектов, создаваемый в воздухе ультразвук (свыше 20 кГц) нельзя услышать почти всем людям и он не оказывает заметного эффекта на человеческое ухо. Когда подопытные лица облучались звуком высокой частоты (17 кГц) и ультразвуком в диапазоне частот 21-37 кГц при интенсивности на уровне 148-154 дБ, наблюдался некоторый ВСП на первой субгармонике (половинной частоте), а при двух более высоких частотах возбуждения также и на второй субгармонике. Эти сдвиги быстро пропадали и ПСП не возникал.

В результате рассмотрения нелинейного образования субгармоник, что наблюдалось на электрофизиологических записях у морских свинок и шиншилл, было предложено расширить критерий опасного риска в ультразвуковом диапазоне до уровня 110 дБ.

Эффекты сильного ультразвука, не связанные со слухом. При анализе ультразвуковых моек и буров, рядом с которыми рабочие ощущали утомление, головные боли, шум в ушах и тошноту, оказалось, что также наблюдался достаточно высокий уровень сигнала на звуковых частотах, который считался возможной причиной. Не сообщалось о каких-либо вестибулярных нарушениях при проверках на ВСП до 154 дБ. Дыхательные эффекты также не ожидаются из-за быстрых перепадов давления.

На предельных уровнях интенсивности вблизи сирены (до 160-165 дБ) наблюдалась щекотка во рту и в носу как от ультразвука, так и от звука высокой частоты. При такой интенсивности для высоких радиочастот происходил нагрев в узких проходах и в других местах с большим трением⁶⁵. Более того, нагрев будет ощущаться и на голой коже.

Воздействие импульсного шума и ударных волн

Импульсный шум возникает при стрельбе или в промышленности (см. Табл. 5). Особо стоит отметить в нашем случае, что избыточные давления от игрушечного оружия и фейерверков попадают в тот же самый интервал, который характерен для реальных винтовок или для того, что испытывают артиллеристы при стрельбе орудия. Впрочем длительности импульсов и поэтому их энергия могут меняться.

При взрывах избыточные давления могут во много раз превосходить нормальное атмосферное давление. Обычно давление изменяется так, как от сильной ударной волны: быстрый рост и затем замедленный, более или менее линейный спад (с отрицательной фазой) до окружающего давления. Однако, всюду, где есть стены, будут наблюдаться отражения, что приводит к увеличению длительности и энергии воздействия на уши.

Воздействие импульсного шума на слух. Облучение импульсным шумом вызывает такие же эффекты, как и непрерывный шум: при более низких уровнях наблюдается ВСП, сначала при 4-6 кГц. При повторяющемся облучении в течение длительного времени это может развиваться в ПСП и ослабнуть с включением более широкой полосы частот. При более

⁶⁴ Среди примерно 1800 + 450 статей, найденных в базе Medline по ключевым словам (травма или повреждение) и (звук или шум или ультразвук), или (акустическая травма) за 1966 – 1998 годы, автор нашел только четыре, в которых описывались травмы, вызванные тонами, или узко- или широкополосным шумом с уровнем около или выше 140 дБ. С другой стороны, есть много статей, связанных с повреждениями из-за импульсного шума с уровнем в 150 дБ или выше, см. раздел 2.5 в статье Altmann (ссылка 1).

⁶⁵ Крысы и мыши были убиты перегревом в течение минут при звуковых и ультразвуковых частотах.

высоких уровнях постоянное повреждение может последовать в результате даже одного или нескольких случаев. При импульсном шуме индивидуальная восприимчивость меняется даже в более широких пределах, чем при непрерывном. Это показано в табл. 6, где приведены данные по ВСП и ПСП для людей. Боль в ушах может наступить уже при избыточном давлении 0,36 кПа (145 дБ), хотя имеются случаи отсутствия боли даже при разрыве обеих барабанных перепонки. В табл. 7 приведены результаты экспериментов на животных. При импульсном шуме ВСП часто возрастает в течение первых часов после облучения.

Таблица 5: Значения максимального давления от некоторых источников импульсного шума, измеренного в точке, где могут располагаться уши рабочего, стрелка или артиллериста. Обратите внимание, что нормальное атмосферное давление составляет 101 кПа.

Источник звука	Максимальное избыточное давление (кПа)	Максимальный уровень (дБ)
Удар молотом	0,11	135
Забивание болта в стену (на расстоянии 80 см)	0,63	150
Восемь игрушечных пистолетов (50 см)	0,63 – 2,0	150 – 160
Три пистонных пистолета (30 см)	0,89	153
Восемь фейерверков (3 м)	0,063 – 63	130 – 190
Звук от низколетящего самолета	2,4 – 6,9	162 – 171
Пистолет	5,0	168
Винтовка	1,7	159
Четыре винтовки	1,78 – 8,43	159 – 173
Автоматическая винтовка	7,2	171
Полевое орудие	50,3	188,0
Пушка	54	188,6
Трехдюймовый миномет	58	189,2

При рассмотрении безопасной длительности импульсного шума следует принимать во внимание максимальную силу звука, его длительность и спектр, длительность интервалов между импульсами и их полное число. В качестве критерия для коротких импульсов предложен максимальный уровень 162 дБ (2,5 кПа)⁶⁶.

Что касается более высокого избыточного давления при взрывах, имеется опыт с людьми, пострадавшими на войне, при бомбардировке и (что реже) в авариях на производстве. Проводились эксперименты на человеческих трупах и на животных. Предложенная величина порогового избыточного давления для разрыва барабанной перепонки составила 35 кПа (максимальный уровень 185 дБ) (см. табл. 8). Только при более коротких длительностях импульса инерция барабанной перепонки и внутреннего уха сыграют свою роль, чтобы выдержать более высокие давления.

Среди жертв взрывных ударных волн разрыв барабанных перепонки является сильно распространенным явлением. Повреждение или смещение косточек внутреннего уха происходит реже. Наиболее частыми симптомами оказываются потеря слуха, боли и шум в ушах, а также головокружение, причем последний эффект часто может быть связан с непосредственным поражением головы. Небольшие разрывы барабанных перепонки в основном излечиваются. Остальные симптомы также обычно ослабевают со временем, но постоянная потеря слуха часто остается.

Разрыв барабанных перепонки от взрывов у животных изучался в течение десятилетий при атмосферных ядерных взрывах, в аэродинамических трубах или при подрыве боевых патронов. Максимальные значения избыточного давления для собак, овец, свиней и обезьян близки к тому, что наблюдается у людей.

Воздействие импульсного шума, не связанное со слухом. Вестибулярные эффекты

⁶⁶ Быстро нарастающие импульсы с длительностью свыше 3 мс, повторяющиеся с частотой 6-30 в минуту (при полном количестве не более ста при одной экспозиции), не вызовут чрезмерной потери слуха для 75% облученных людей.

импульсного шума наблюдались как у людей, так и у животных. У подвергнутых звуковому воздействию ружейного выстрела морских свинок отмечалось не только серьезное повреждение кортиевого органа, но также и повреждения периферийных вестибулярных органов даже тогда, когда животные не проявляли заметные признаки нарушения равновесия.

Таблица 6: Слуховое воздействие импульсного шума и ударных волн на людей.

Максимальный уровень (дБ)	Длительность импульса	Количество импульсов	ВСП	ПСП	Примечания
140	2 мс	75	40 дБ на 4 кГц	Нет	Наибольшая чувствительность
155	2 мс	75	<40 дБ на 4 кГц	Нет	Наименьшая чувствительность
159	Ружейный выстрел		30-80, восстановление до 6 дней	Нет	На месте стрелка
189	Пушечный выстрел		30-80, восстановление до 6 дней	Нет	На месте прислуги
180 – 183	Холостой выстрел		30-80, восстановление до 6 дней	Нет	Ухо вблизи дула
186 – 189	Миномет (три дюйма)	Первый выстрел	до 75 дБ, 5,8 кГц		Боль, звон в ухе
		Второй выстрел (через 80 минут)	5,8 кГц восстановление до 6 мес.	50 дБ на 8,2 и 9,7 кГц	Разрыв перепонки, кровотечение
Фейерверк		1		60-80 дБ	Студент-мужчина
150-160 на 0,5 м	Игрушечные пистолеты		2,5 % популяции (600)	Среднее 29 дБ на 4 кГц	Сельский праздник в Индии
130-190 на 3 м	Фейерверк		2,5 % популяции (600)	Среднее 29 дБ на 4 кГц	Сельский праздник в Индии
162 – 171	40 – 400 мс	много		Нет	Звуковые удары

Повреждения вестибулярного аппарата были найдены у солдат, подвергавшихся звуковому воздействию от стрельбы, а также у жертв бомбардировок. Впрочем, существует несколько способов компенсации потери чувствительности вестибулярного аппарата.

Таблица 7: ВСП, ПСП и психологический ущерб, вызванные импульсным шумом у животных.

Животное	Максимальный уровень	Количество импульсов	Длительность импульса	ВСП	ПСП	Физиологические повреждения
Макака резус	168 дБ	2	60 мкс (+) 100 мс (+)	Среднее 33 дБ, 14 кГц	Некоторое До 15 дБ (ср.)	Местная или расширенная потеря волосовых клеток
		10 – 20				
Шиншилла	131 – 147 дБ	1, 10, 100	5 мс (эхо)	15-90 дБ	0 – 45 дБ	Потеря волосовых клеток (как ПСП)
Морская свинка	153 дБ	500	35 мкс (+)			Местное повреждение волосовых клеток

Таблица 8: Серьезные повреждения у людей от сильных ударных волн, например, при взрывах (быстрое нарастание давления, за которым следует примерно линейный спад в течение указанного в таблице времени). Для каждого типа повреждений приведены три давления: порог, ниже которого эффект не наблюдается; уровень, при котором данное повреждение ожидается у 50% подвергнутых воздействию лиц, и 100%-ный уровень. Указанные давления соответствуют эффективным максимальным избыточным давлениям (при параллельном падении – это обычный перепад, при перпендикулярном падении добавляется динамический перепад, вблизи крупномасштабной поверхности учитывается отражение). Из-за разнообразия экспериментов и частого отсутствия данных (для людей) приводятся не фиксированные значения, а диапазоны давлений. При повторяющихся воздействиях пороги повреждений снижаются. При более кратких длительностях спада давления пороги повышаются. Обратите внимание, что нормальное атмосферное давление (101 кПа) соответствует максимальному уровню 194 дБ.

Повреждение	А	Б	В
Разрыв барабанной перепонки			
Быстрый рост, 3-400 мс	35	105	
Медленно/статически	42-55	150	
Разрыв легких			
Длительность 3 мс	260-340	680	680
Длительность 400 мс	83-103	260	260
Смертельный исход			
Длительность 3 мс	770-1100	1100-1500	1500-2100
Длительность 400 мс	260-360	360-500	500-690
А – пороговое избыточное давление (кПа). Б – избыточное давление для 50% случаев (кПа). В – избыточное давление для 100% случаев (кПа).			

Таблица 9: Упрощенная итоговая сводка среднеквадратичных звуковых пороговых уровней (в дБ) для разнообразных воздействий, имеющих отношение к акустическому оружию, в различных частотных диапазонах и максимальных уровней для взрывных волн. Обращаем внимание, что пороги носят приблизительный характер, а эффекты плавно меняются с частотой и зависят от продолжительности фазы падения давления; кроме того индивидуальная восприимчивость меняется в широких пределах. Детали изложены в соответствующих разделах текста и приведенных ссылках. Сокращения: к – кило, нч – низкочастотный, вч – высокочастотный, овч – очень высокочастотный.

Диапазон	Частота (Гц)	Боль в ушах	ПСП для короткой экспозиции	Разрыв барабанной перепонки	Временные вестибулярные эффекты	Органы дыхания
Инфразвук	1 – 20	160...140 (1...20 Гц)	Нет до 170	> 170	Нет до 170	Нет до 170
нч-звук	20 – 200	135 – 140	Нет до 150	160	150 слабая тошнота	150 непереносимые ощущения
вч-звук	250 – 8к	140	120...135...150 1 ч...7 м...0,4 с макс. при 1-4 кГц	160	140 слабое нарушение равновесия	140 щекотка во рту 160 нагрев
овч-звук/ ультразвук	8л – 20к/ >20к	140	Нет до 156	?	Нет до 154	140 щекотка во рту 160 нагрев
Ударная волна		145	150 - 160	185	160	200 разрыв легких 210 смерть

Вторым наиболее чувствительным к взрыву органом являются легкие и верхний дыхательный тракт. В качестве характерного признака достижения порога опасных уровней было предложено появление сыпи (кровоизлияние в результате незначительных поражений капилляров – само по себе безопасное и заживающее) в дыхательном тракте, которое наблюдается при нескольких десятках кПа (примерно на уровне 180 дБ). Но при более высоких давлениях в результате контузии появляется кровотечение не только в трахеях, но и в легких. Разрыв тканей может привести к крупномасштабному кровотечению в легких и к закупорке кровеносных сосудов воздухом, что в конечном итоге может привести к смерти от удушья или от затруднения работы кровеносных сосудов. У овец, подвергнутых воздействию ударных волн с избыточным давлением 86-159 кПа (193-198 дБ), которое действовало около 5 мс, поражение легких лежало в пределах от умеренного до сильного, но оно еще было ниже смертельного. Оценки избыточного давления для поражения легких у людей и для смерти приведены в табл. 8⁶⁷.

Создание сильного звука

В то время, как обычный звук хорошо известен, до сих пор имеется гораздо меньше

⁶⁷ Опрокидывание людей, происходящее при ядерных взрывах длительностью 0.5-1 с и с избыточным давлением 7-10 кПа (171-174 дБ) [G.F.Kinney, K.J.Graham, *Explosive Shocks in Air* (New York etc.: Springer, 1985), table XV] не имеет ничего общего с ударными волнами от обычных взрывов. Длительность таких ударных волн составляет всего несколько мс и поэтому передаваемый импульс (интеграл по времени от силы потока) будет соответственно меньше при одинаковом пиковом избыточном давлении. Только на очень близком расстоянии (меньше нескольких метров) импульс окажется достаточным, но при этом большее значение приобретают другие виды опасности (для барабанной перепонки, для легких). См. [1].

источников звука низкой частоты, в частности, инфразвука, который в обычной жизни существует при удивительно высоких уровнях интенсивности. Поэтому сначала рассматриваются отдельные источники низкочастотного звука, а затем обсуждаются сильные источники, которые потенциально применимы в качестве оружия.

Источники низкочастотного звука

Собственно инфразвук образуется естественным образом морскими волнами, лавинами, турбулентностью ветров в горах, при извержении вулканов и землетрясениях и т.п. В то время, как такие волны всего очень слабо поглощаются и могут проходить тысячи километров (усиливаясь из-за сильного отражения от грунта и внутри преломляющих каналов в атмосфере), давления и частоты таковы, что люди не слышат инфразвук, тем более, что на людей он не оказывает отрицательного воздействия. Гром обладает изменяющимися во времени спектральными пиками в диапазоне от инфразвука до низкочастотного звука и его, конечно, можно слышать. Порывы ветра могут приводить к достаточно высоким динамическим давлениям – из формулы динамического давления

$$p_d = \rho_0 v^2 / 2 \quad (3)$$

(плотность воздуха на уровне моря $\rho_0 = 1,2 \text{ кг/м}^3$) следует, что при максимальной скорости ветра 10 м/с максимальное давление составит 65 Па, что соответствует уровню 130 дБ; при сильном ветре (40 м/с) давление повышается до 1.04 кПа (или 154 дБ). Такие перепады давления не вызывают боли по той причине, что ветер изменяется с характерными временами порядка секунд, то есть с частотами порядка 1 Гц или ниже. Создаваемый людьми инфразвук может иметь сравнимые или даже более высокие амплитуды. При прыжках в воду на глубину 2 м давление изменяется на величину 19.6 кПа (180 дБ) примерно за секунду⁶⁸ согласно формуле

$$\Delta p = \rho_w g \Delta h \quad (4)$$

($g = 9.81 \text{ м/см}^2$ - ускорение силы тяжести на уровне моря). Если дуть в ухо соседу, можно добиться давления на уровне до 170 дБ. Даже при беге возникают значительные амплитуды: если применить (4) при среднеквадратичной амплитуде движения головы 0,1 м, то, подставив значение плотности воздуха, получим давление 1,3 Па (96 дБ).

В то время, как в приведенных примерах преобладают частоты порядка 1 Гц и ниже, звуки от реактивного самолета, ракет или от хлопка надутого пакета доходят до звукового диапазона или попадают в него.

Более низкие уровни создаются ветровыми турбинами, кондиционерами и вентиляторами, а также внутри легковых машин и грузовиков; при открытом окне заметно возрастает уровень инфразвука. Низкочастотный звук в промышленности возникает при работе компрессоров, дробилок, топок и т.п. Высокие уровни обнаружены в машинных отделениях судов.

Наконец, следует упомянуть взрывные волны. Амплитуда избыточного давления в этом случае может быть произвольно высокой, но последующие волны отрицательного давления, конечно, ограничены отрицательным атмосферным давлением (101 кПа на уровне моря)⁶⁹.

Для проверки воздействия низкочастотного звука было разработано специальное испытательное оборудование. Чтобы проверять только уши, низкочастотные громкоговорители длиной 30 см и мощностью 15 Вт плотно совмещались с пластиной и эта система соединялась с наушником – при этом достигались уровни до 140 дБ (400 Па)⁷⁰.

⁶⁸ Для этого и следующего примеров смотрите также: D.L.Johnson, "The Effects of High Level Infrasound", in: H.Moller, P.Rubak (eds), *Conference on Low Frequency Noise and Hearing*, 7-9 May 1980, Aalborg, Denmark.

⁶⁹ См. Altmann [1], приложение A.4.

⁷⁰ N.S.Yeowart, M.E.Bryan, W.Tempest, "The Monoaural M.A.P. Threshold of Hearing at Frequencies from 1.5 to 100 c/s", *Journal of Sound and Vibration* 6 (1967): 335-342; M.J.Evans; W.Tempest, [53], chap.5, "Psychological Effects of Infrasound at Moderate Intensities".

Для испытания воздействия на все тело было сооружено несколько испытательных камер объемом один-два кубометра. В них также требуется звукоизоляция, чтобы не допустить выравнивания давления с внешней средой при длине волны, превышающей размеры камеры. Одна из камер работала с шестью громкоговорителями, размер каждого из которых составил 0.46 м, и в ней достигнута громкость на уровне 140 дБ (200 Па)⁷¹. Но в громкоговорителях амплитуда колебания мембраны ограничена (1 см или менее). Более высокие изменения давления можно получить при использовании гидравлических поршней. Например, в камере динамического давления, построенной в центре ВВС Райт-Паттерсон (Огайо, США), имеются поршни диаметром 0.46 м и 1.83 м при максимальном ходе 12 см – на этой установке можно получить давление до 8.0 кПа (172 дБ) в диапазоне частот 0.5-10 Гц, а при 30 Гц давление понизится до 1.6 кПа (158 дБ)⁷². Обратите внимание, что такой же поршень при работе на открытом воздухе на частоте 10 Гц эквивалентен сферическому источнику, дающему среднеквадратичное давление 82 Па (132 дБ) на расстоянии 1 м. При частоте 1 Гц давление уменьшится в 100 раз (до 92 дБ) и будет спадать на 6 дБ при удвоении расстояния⁷³. Все это демонстрирует трудности получения низкочастотного звука с высокой интенсивностью на открытом воздухе и показывает, почему нужна хорошая звукоизоляция испытательных камер. В табл. 10 приведено несколько источников низкочастотного звука.

Таблица 10: Источники низкочастотного звука, доминирующие диапазоны частот и уровни звукового давления на характерных расстояниях (р.а. – расчеты автора).

Источник	Диапазон, Гц	Уровень, дБ	Ссылка
Геофизический	<0.01-10	54-104	⁷⁴
Гром на 1 км	<4-125	<114	⁷⁵
Флуктуации ветра	1	> 160	р.а.
Бег	<2	95	⁷⁶
Дутье в ухо соседа	0.5	170	⁷⁶
Нырание в воду (2 м)	1	180	⁷⁶
Ветровая турбина, 150 м по ветру	2-10	80	⁷⁷
Вентиляция или кондиционеры	1-20	60-90	⁷⁷
Промышленность	5-100	70-110	⁷⁸
Внутри автомашины (окна закрыты)	5-100	100	⁷⁸
Внутри автомашины (окна открыты)	1-30	120	⁷⁸
Реактивный самолет (при спуске)	10-1000	135	⁷⁹
Реактивный двигатель (форсаж)	20-800	148	⁸⁰
Крупная ракета (кабина экипажа)	10-2000	135	⁸¹

⁷¹ N.S.Yeowart, M.E.Bryan, W.Tempest, "Low-frequency Noise Thresholds", *Journal of Sound and Vibration* 9 (1969): 447-453; v.Gierke/Nixon [53].

⁷² D.L.Johnson, "Various Aspects of Infrasound", in L.Pimonov (ed), *Colloque international sur les infra-sons* (Paris: CNRS, 1974): 129-153; v.Gierke/Parker [30]; v/Gierkt/Nixon [53], Fig2, на рис.2 показан "поршень с ходом 12 см".

⁷³ В предположении крупного экрана; см. Altmann [1], уравнение (A-10).

⁷⁴ Для обзора естественных источников см. T.B.Gabrielson, "Infrasound" in M.J.Crocker (ed), *Encyclopedia of Acoustics* (New York etc.: Wiley, 1997) ch.33, а также цитированную там литературу.

⁷⁵ R.D.Hill, "Thunder" in R.H.Golde (ed), *Lightning*, vol.1 (London etc.: Academic, 1977), ch.11.

⁷⁶ Johnson [68], наши расчеты.

⁷⁷ Backteman et al. [23]; Berglund/Hassmen [48].

⁷⁸ Backteman et al. [23].

⁷⁹ Johnson [68]; v.Gierke/Nixon [53].

⁸⁰ Взято из наших измерений звука от МИГ-21 и бомбардировщиков "Торнадо". См. J. Altmann, R. Blumrich, "Acoustic and Seismic Signals during Aircraft Take-offs and Landings" (in German) in *Fortschritte der Akustik-DAGA 94* (Bad Honnef: DPG-Gmbh. 1994): 417-420; R.Blumrich, *Sound Propagation and Seismic Signals of Aircraft used for Airport Monitoring – Investigation for Peace-keeping and Verification* (Hagen: ISL, 1998).

⁸¹ Mohr et al. [58]; v.Gierke/Parker [30].

Крупная ракета на расстоянии 1.6 км	1-200	130	82
Звуковые удары	1-100	120-160	83
Накачка подушки безопасности	5-1000	170	84
Машинное отделение на корабле		133	85
Ударная волна	1-100	Неогр.	
Наушники громкоговорителя	1-200	146	70
Камеры для воздействия на все тело	2-100	140	71
Такие же камеры с поршнями	0,5 - 20	172/158	72

⁸² v.Gierke/Nixon [53].

⁸³ v.Gierke/Nixon [53]; v.Gierke/Parker [30].

⁸⁴ H.C.Sommer, C.W.Nixon, "Primary components of stimulated air bag noise and their relative effects on human hearing", Report, AMRL-TR-73-52 (Wright-Patterson Air Force Base OH: Aerospace Medical Research Laboratory 1973; in v.Gierke/Parker [30], Sec.5; Johnson [68].

⁸⁵ H.G.Leventhall, "Man-made infrasound - its occurrence and some subjective effects" in Pimonov [72]; in v.Gierke/Nixon [53].

Акустические источники, потенциально пригодные для оружия

Сильные звуки, конечно, можно получить при помощи *громкоговорителей*, соединенных с усилителями⁸⁶. Для получения достаточной электрической мощности необходимо иметь генератор или тяжелые батареи, а получение очень высоких уровней давления на открытом воздухе потребует очень большого числа громкоговорителей. Типичные максимальные электрические мощности, подводимые к одному громкоговорителю, составляют несколько сотен ватт, из которых всего 1-2% преобразуются в акустическую мощность из-за несогласованности импедансов мембраны и воздушного пространства⁸⁷. Более высокая эффективность возможна при помещении рупоров (с экспоненциальной или иной формой раструбы) перед громкоговорителем, что улучшает также и направленность. При низких частотах звука раструбы должны быть большими⁸⁸.

Впрочем, основное преимущество громкоговорителей (а именно, возможность излучать широкий диапазон частот без значительного искажения) может оказаться ненужным для акустического оружия. Если требуется всего лишь получение сильного шума, существуют более простые возможности, например, сирена или свисток. В табл.11 приводится список таких источников, а также их свойства.

В *сирене* воздушный поток периодически открывается и блокируется ротором, отверстия которого проходят мимо соответствующих отверстий статора. Хотя эффективность первоначальных образцов составляла 1-2%, уже в 1941 г. была создана модель, генерировавшая примерно 37 кВт акустической мощности (на частоте 460 Гц) от воздушного потока мощностью 52 кВт, то есть эффективность составляла около 70%. Это устройство с двумя двигателями внутреннего сгорания для компрессора (71 кВт) и ротора (15 кВт) было установлено на небольшом грузовике; шесть рупоров экспоненциальной формы общим диаметром 0.71 м обеспечивали диаграмму направленности с половинным углом раствора относительно оси порядка 40° , что близко соответствовало дифракции с длиной волны 0.75 м. При уровне давления свыше 170 дБ внутри рупоров применявшиеся поначалу деревянные рупоры оказались разрушенными при первом пятиминутном испытании и их пришлось заменить на стальные. При работе на открытом воздухе с расширяющим рупором размером 1.42 м наблюдалось затухание максимального давления, обратно пропорциональное расстоянию (что характерно для сферического распространения), при удалении от источника более, чем на 500 м. На расстоянии 30 м давление на оси составило 137 дБ, что выше болевого порога для незащищенного уха, а на 100 м – 127 дБ⁸⁹.

Хотя несомненно возможны более компактные конструкции сирен при том же уровне мощности, ряд обстоятельств (требуемая первичная мощность, ограничения на поток и давление внутри сирены, размер рупоров для согласования импеданса и достижения направ-

⁸⁶ Статьи по цепочке громкоговорителей помещены в специальном выпуске журнала *Journal of the Audio Engineering Society Audio/Acoustic/Applications* 38, no.4 (April 1990).

⁸⁷ Если разместить на мембране слои очень пористого, но крепкого геля, можно совместить импедансы и сильно улучшить связь. Эта возможность упоминается также Фингером [2].

⁸⁸ Значения эффективности приведены в работах: В.М.Starobin, "Loudspeaker Design" in Crocker [74] ch.106; V.Salmon "Horns", in [74] ch.61.

⁸⁹ R.C.Jones, "A Fifty Horsepower Siren", *Journal of the Acoustical Society of America* 18, no.2 (Oct. 1946):371- 387. Экспоненциальные рупоры длиной 68 см и общим диаметром 71 см, имелось также удлинение размером 2.1 м.

ленности на частотах вплоть до сотен Гц) приводят к метровым (и более) размерам – размер тем больше, чем ниже частота. Устройство потребует, как минимум, грузовичка-пикапа, чтобы обеспечить подвижность.

Таблица 11: Источники сильного звука, которые потенциально могут быть использованы для акустического оружия. Приведенные цифры являются типичными или применимыми для конкретных устройств (воображаемыми для гипотетического устройства с повторяющимися взрывами). Обозначения: к – тысяча, р.а. – расчеты автора. Обратите внимание, что при очень высоких уровнях звука вблизи источника и при высоких звуковых или ультразвуковых частотах нелинейные эффекты приведут к сильному поглощению и быстрому спаду уровня давления с расстоянием.

Источник	Диаметр излучателя, м	Частота, Гц	Звуковая мощность кВт	Уровень звукового давления, дБ	Расстояние, м	Ссылка
Большая сирена	1,4	200-600	37	137	30	89
Небольшая сирена	0,3	3к-20к	2	165	Вблизи	90,91
Громкоговоритель с модуляцией воздушного потока	2,3	10-500	20	126	27	90
Гигантский свисток	0,2	40-200	Несколько	160	Вблизи	94
Свисток Хартмана	0,2	4к-8к 20к	2 0,6	160	Вблизи	95
Пьезоэлектрический преобразователь с диском	0,2	20к	0,2	160	Вблизи	96-98
Взрыв	1	<1-100	Неогранич.	Неограничено	Вблизи	
Гипотетический повторяющийся взрыв	1	100	1000	180	Вблизи	р.а.

Сирены можно также использовать для получения высокочастотного звука вплоть до ультразвуковой области. Например, на установке размером 0.3 м и массой 25 кг (не считая компрессора), работавшей при избыточном давлении 200 кПа и при потоке воздуха 0.1 м³/с, были получены уровни давления 160-165 дБ с акустической мощностью более 2 кВт на частотах 3-20 кГц при эффективности 20%⁹⁰. На другой установке был получен уровень давления около 160 дБ на низких ультразвуковых частотах, а также более 140 дБ на частоте 150 кГц, причем в нормальном звуковом диапазоне можно было получать более высокие давления⁹¹.

Принцип сирены – модуляция воздушного потока путем открытия и закрытия отверстий – может быть использован для получения звука с произвольными волновыми формами. Примером подобной сирены, способной работать в инфразвуковом диапазоне, служит система мобильного акустического источника (СМАИ), которая построена в Национальном центре физической акустики университета Миссисипи для Управления по окружающей среде поля боя исследовательской лаборатории Армии США⁹². Эта уникальная система может выдать 20 кВт акустической мощности через рупор экспоненциальной формы (длина – 17 м и

⁹⁰ С.Н.Allen, I.Rudnick, "A Powerful High Frequency Siren", *Journal of the Acoustical Society of America* 19, no.5 (Sept. 1947): 857-865; С.Н.Allen, H.Frings, I.Rudnick, "Some Biological Effects of Intense High Frequency Airborne Sound", *Journal of the Acoustical Society of America* 20, no.1 (Jan. 1948): 62-65.

⁹¹ Н.О.Parrack, "Ultrasound and Industrial Medicine", *Industrial Medicine and Surgery* 21, no.4 (April 1952): 156-164.

⁹² J.Sabatier, "Acoustical Characterization of the Mother of All Speakers" (master's thesis, National Center for Physical Acoustics, 1993).

максимальный диаметр – 2.3 м) при частоте отсечки, равной 10 Гц. Она расположена вместе с компрессором дизельного типа (115 кВт) на раздвижном полуприцепе. В этой системе цилиндр с щелями на периферии вращается с помощью электромотора мимо соответствующих щелей на фиксированном соосном цилиндре и поэтому поток воздуха можно модулировать силой тока в обмотке возбуждения. В диапазоне частот 63-500 Гц давления на оси не практически не зависит от частоты и составляет около 152 дБ на расстоянии 1 м от эквивалентного точечного источника, но при 10 Гц оно падает до примерно 130 дБ в той же точке. На основе первой пары приведенных значений можно подсчитать, что давление на оси уменьшается ниже 137 дБ (болевой порог для незащищенного уха) на расстоянии 5.6 м от предполагаемого точечного источника, расположенного в центре раствора рупора, то есть уже в непосредственной близости⁹³. Область с давлением 120 дБ находится на расстоянии 40 м. В случае инфразвука сочетание возрастания болевого порога и уменьшения эффективности рупора приводит тому, что можно избежать боли в ушах даже совсем близко к раствору рупора, а это снова демонстрирует трудности получения очень высоких низкочастотных амплитуд на открытом воздухе. Главная задача СМАИ – испытание атмосферного прохождения на многие километры, а другая состоит в моделировании шумов транспортных средств. Сильная нелинейность установки не мешает таким применениям.

Периодические сильные низкочастотные колебания воздуха можно получить также аэродинамическими средствами путем нелинейного создания турбулентного взаимодействия с резонаторами, как например, в трубках органа и в *свистках*. В свистке Галтона поток воздуха из кольцевого отверстия попадает на острую круговую кромку, внутри которой находится цилиндрический резонирующий объем. Свисток такого типа применяется для получения частот в диапазоне от инфразвука до ультразвука в зависимости прежде всего от размера резонатора. Некоторое изменение резонансной частоты возможно путем подстройки длины резонатора. В диапазоне частот 40-200 Гц свистки других типов создают более высокие акустические мощности вплоть до киловаттных значений при размерах до метра (по порядку величины)⁹⁴. Инфразвук потребует гораздо более крупных резонаторов (частота обратно пропорциональна длине резонатора) и больших мощностей компрессора (пропорциональных площади сечения воздушного потока).

Для высоких звуковых частот и ультразвука свистки Галтона обладают меньшей мощностью по сравнению со свистками Хартмана, где кольцевое отверстие заменено на открытое сопло. В такой конструкции достигаются частоты в диапазоне от нескольких кГц до примерно 120 кГц, а в улучшенных вариантах была достигнута мощность около 2 кВт в диапазоне 4-8 кГц при эффективности до 30%. При использовании параболического отражателя диаметром 200 мм была достигнута ширина пучка (полная ширина при половине максимального давления) около 30°. В ультразвуковой области при использовании нескольких свистков была достигнута мощность до 600 Вт на частотах около 10 и 33 кГц⁹⁵.

Чтобы получить ультразвук высокой мощности в воздухе, можно использовать более крупные вибрирующие диски из *пьезоэлектрических преобразователей*. В одном из устройств, где применялся диск с дискретным изменением толщины для достижения сфазиро-

⁹³ Если предположить, что звуковое давление почти не меняется вдоль рупора шириной 2.3 м, то удельная мощность, эквивалентная излучению мощности 20 кВт сферой радиусом 1 м, составит примерно 4.8 кВт/м^2 . Сферическое расширение с ослаблением интенсивности по закону $1/r^2$ может оказаться эффективным уже вблизи раструба. Обратите внимание также, что существует зависящая от частоты направленность: давление звука тем быстрее уменьшается при удалении от оси рупора, чем выше частота (но если частота превысит значение, при котором возникает первый нуль в $(A-4)$, уменьшение становится немонотонным из-за наличия боковых лепестков). При слегка меньшем рупоре диаметром 2.1 м интенсивность на 40 Гц ($ka=0.8$) все еще одна и та же по всем направлениям.

⁹⁴ Например, увеличенные до метрового размера модели полицейских свистков создавали частоты 196 и 37 Гц при мощности до 2 кВт, причем при увеличении потока воздуха и повышении размеров можно было иметь более высокую мощность. См. Gavreau et al. 1966 [54]; Gavreau 1968 [54].

⁹⁵ Ya.Ya.Borisov, "Acoustic Gas-Jet Generators of the Hartmann Type", in L.D.Rozenberg (ed.), *Sources of High-Intensity Ultrasound* (New York: Plenum 1969) part I; see also Parrack 1952 [91]; H.Kurtruff, "Physik und Technik des Ultraschalls" (Stuttgart: Hirzel, 1988): 140f.

ванного излучения (несмотря на узловые круги), были получены уровни звука свыше 160 дБ (2 кПа) перед диском диаметром 20 см (диск пришлось охлаждать, чтобы не допустить растрескивания). Эффективность составила около 80%, а мощность звука доходила примерно до 200 Вт. Резонансная полоса частот составила всего несколько Гц. Ширина пучка на уровне половины интенсивности оказалась равной 5° (это соответствовало линейной дифракции), а уровень звука на оси уменьшился до 150 дБ (0.63 кПа) на расстоянии 1 м⁹⁶. Таким образом, при линейном распространении на расстоянии 10 м сигнал составит 130 дБ (63 Па) с дополнительным ослаблением на 8 дБ (уменьшение давления в 2.5 раза) из-за поглощения. Впрочем, на расстоянии 0.1 м появится ударная волна, что увеличивает потери⁹⁷. В эксперименте при уровне давления у источника 153 дБ (0.89 кПа) осталось только около 123 дБ (28 Па) на расстоянии 5.7 м⁹⁸.

Наконец, существует возможность получения ударного импульса от *взрыва*. При сферическом распространении звука даже заметный заряд в 1 кг тротила может вызвать боль в ушах на расстоянии около 200 м, но поражение или смерть ожидаются только на расстоянии в несколько метров⁹⁹. Но такое применение будет, конечно, соответствовать традиционному оружию и традиционному механизму поражения (обратите внимание, что во многих видах оружия радиус смертельного поражения увеличивается по сравнению с эффектом от одного только взрыва благодаря окружению заряда шрапнелью). Применение механизма боли в ушах при сферически распространяющейся ударной волне окажется проблематичным по ряду причин. Тот, кто применяет взрывчатку, должен быть защищен от ее воздействия (а это лучше всего обеспечивает расстояние) и поэтому взрывчатку обычно забрасывают до того, как она подрывается. Поскольку каждый заряд создает только один импульс, может оказаться необходимым часто повторять такие действия. С другой стороны, с точки зрения гуманитарных законов о несмертельном оружии существует опасение, что нацеливание окажется неточным и взрывчатка взорвется слишком близко от кого-нибудь, что вызовет незаживающую травму или даже смерть. Исключением могут стать очень небольшие заряды, которые способны заставить врасплох и вызвать неразбериху, особенно в закрытом помещении. Но в этом случае сопровождающий эффект световой вспышки может оказаться более важным и подобное оружие уже применяется. Для очень малых зарядов (граммы или десятки граммов) имеется принципиальная возможность стрельбы из чего-то, напоминающего винтовку, взрывными пулями на некоторое расстояние (смотрите ниже). Если взрыв происходит не на открытом воздухе, а в каком-то открытом резонаторе или в трубе, может произойти резонансное усиление в некотором диапазоне частот.

Могла бы появиться новая перспектива оружия с ударными волнами, если удастся создать направленную ударную волну и избежать сферически симметричного распределения выделенной энергии, оставив только "линейное" (по закону $1/r$) ослабление с расстоянием, связанное с нагреванием воздуха ударной волной, для гипотетического случая пучка с постоянной шириной. Из-за отсутствия опубликованных данных некоторые рассуждения кажутся оправданными для предварительного анализа. Можно представить, что сферически расширяющаяся ударная волна захватывается окружающими трубами, другие концы которых связываются параллельно, образуя круговую, приблизительно плоскую излучающую область. При помощи соответствующей закрутки длины труб будут меняться так, чтобы индивидуальные ударные волны появились на выходе почти одновременно и там создали общую крупную ударную волну, начинающуюся с почти плоским фронтом. Это было бы эквивалентом однородного слоя взрывчатки, подрываемой почти одновременно во всех точках на излучающей поверхности. Взрываемый слой можно было бы, конечно, создать, например, смесью бензина и воздуха, рассеиваемой небольшими соплами и поджигаемой цепочкой запальных свеч. Основной вопрос в этом случае – на каком расстоянии радиус пучка бу-

⁹⁶ J.A. Gallego-Juarez, G.Rodriguez-Corral, L.Gaete-Garreton, "An ultrasonic transducer for high power application in gases", *Ultrasonics* 16 (November 1978): 267-271.

⁹⁷ Altmann [1], уравнения (A-14) – (A-24).

⁹⁸ J.A.Gallego-Juarez, L.Gaete-Garreton, "Experimental Study of Nonlinearity in Free Progressive Acoustic Waves in Air at 20 kHz", 8th Symposium International sur l'acoustique non lineaire, *Journal de Physique* 41 (Nov. 1979): C8-336 – C8-340; полный уровень рассчитан по уровням отдельных гармоник.

⁹⁹ Altmann [1], Приложение A-4 и рис.A-2.

дет оставаться неизменным или как быстро установится соответствующее сферическое ($1/r^3$) ослабление ударной волны, Однако, сильные ударные волны, распространяющиеся на открытом воздухе, с самого начала подвержены дифракции даже при наличии зависимости давления от скорости¹⁰⁰. Поэтому похоже, что хотя можно добиться некоторой концентрации энергии внутри конуса, сферическое распространение сохранится, начиная с расстояния, в несколько раз превышающего диаметр источника. Более определенное утверждение требует более детального изучения.

Можно также обсуждать, что произойдет, если подобные взрывы (с начальными плоскими волновыми фронтами) будут повторяться один за другим. По аналогии с двигателями внутреннего сгорания, где ежеминутно может происходить несколько тысяч зажиганий в каждом цилиндре, частоты порядка 100 Гц возможны для жидкого топлива (и гораздо более высокие, если пользоваться микромеханическими клапанами и т.п.). Конечно, охлаждение, борьба с импульсами избыточного давления и с отдачей станут огромными, но решаемыми инженерными проблемами. Как показывают оценки, можно говорить об источниках мегаваттной мощности¹⁰¹ с уровнем звука около 180 дБ (давление в десятки кПа, что лежит еще вблизи области слабой ударной волны с почти симметричными волновыми формами) при расходе топлива порядка десятков грамм в секунду, а это сравнимо с танковым двигателем¹⁰².

После первой ударной волны каждая последующая будет распространяться в уже разогретом газе с соответствующей более высокой скоростью. Таким образом, последующие ударные волны будут непрерывно догонять и пополнять передний фронт. Поскольку будет происходить некоторое уменьшение давления и температуры на периферии пучка, последующие волновые фронты станут более направленными вперед и поэтому больше страдают от дифракционных потерь на периферии. Количественные оценки падения избыточного давления в зависимости от расстояния и углового удаления от оси требуют больше пояснений от разработчиков подобных систем и/или детального теоретического изучения¹⁰³.

Чтобы преодолеть уменьшение амплитуды с расстоянием, можно также воспользоваться *небольшим источником*, движущимся вблизи цели. Принцип поясняется взрывами свистящих фейерверков. В них могут находиться свисток или сирена, приводимые в действие сжатым газом (хранимым в баллоне) или газовым генератором (используемым, например, для заполнения надуваемых оболочек) и способные работать в течении многих десятков секунд (вплоть до минут) в зависимости от размера.

При полном весе в сотни грамм оба типа устройств можно забрасывать вручную или стрелять ими из ружья; более тяжелыми "звуковыми гранатами" можно стрелять из более крупных образцов огнестрельного оружия (в т.ч. пневматического)¹⁰⁴.

В заключении скажем, что можно создать сильные источники звука низкой частоты, которые в какой-то степени можно настроить или создать в них произвольные волновые формы, с эффективностью в пределах 10%-70%. Расширение пучка, грубо говоря, соответствует дифракции. Резонаторы, ограничения на потоки воздуха, рупоры для направленности и требования к энергетике – все это приводит к размеру таких источников, включая дополнительное оборудование, порядка одного метра и более, а весовые характеристики лежат в области нескольких сотен кг и выше.

Источники более высоких звуковых частот и ультразвука могут быть и меньше по размерам, но из-за их требований к энергетике не представляется возможным значительное

¹⁰⁰ Altmann [1], Приложение А-4.

¹⁰¹ Упоминалась мегаваттная мощность [12].

¹⁰² Altmann [1], раздел 3.2.

¹⁰³ Для рассмотрения имеющих некоторое отношение проблем смотрите: Y.Inoue, T.Yano, "Propagation of strongly nonlinear plane waves", *Journal of the Acoustical Society of America* 94, no.3, pt.1 (Sept.1993): 1632-1642; Y.Inoue, T.Yano, "Strongly nonlinear waves and streaming in the near field of a circular piston", *Journal of the Acoustical Society of America* 99, no.9 (June 1996): 3353-3372.

¹⁰⁴ Обсуждалась концепция системы со свистком весом 0.5 кг для забрасывания вручную на 10-50 м (срабатывание через 30 с) и системы весом 5 кг для забрасывания пневматическим оружием на расстояние 300 м из небольшого грузовика (срабатывание через 5 минут); в обоих случаях уровень звука 120 дБ на расстоянии 1 м при частотах 1-10 кГц: Muller[39].

уменьшение всей системы (Сравните размеры требуемых двигателей, электрогенераторов или компрессоров с размерами коммерческих бензиновых генераторов переменного тока с мощностью 1-5 кВт.)

Взрывные источники могут образовать ударные волны (возможно, и повторяя их) с низкими звуковыми частотами. Кажутся достижимыми мегаваттные мощности, но опять при размерах источника порядка метра.

Переносимое акустическое оружие размером с пистолет или винтовку и с дальностью действия в десятки метров можно исключить с почти полной определенностью. Единственным исключением стали бы небольшой свисток или взрывная "звуковая граната", забрасываемые вручную или выстреливаемые в точку, находящуюся в нескольких метрах от цели.

Защита от звука большой интенсивности

Действующее на барабанные перепонки звуковое давление можно уменьшить ушными затычками, вводимыми в слуховой канал, или защитными резиновыми наушниками, окрывающими ушные раковины. Хотя оба эти типа могут привести к ослаблению на 15-45 дБ при высоких частотах (500 Гц и выше вплоть до ультразвука), наушники менее эффективны при более низких частотах (250 Гц и ниже), а при некоторых инфразвуковых частотах они могут даже усилить уровень звука. В этих случаях затычки действуют лучше – если их вылепить по форме слухового канала пользователя, они ослабляют сигнал на 10-30 дБ при низких частотах. Наилучшую защиту при низких частотах дают затычки, изготовленные из герметичного пенопласта и медленно меняющие свою форму, которые могут обеспечить ослабление на 35 дБ, если их разместить глубоко в канале. Можно посоветовать сочетание затычек и наушников для предохранения от импульсного звука на уровне 160 дБ и выше. Сочетание наушников и поглощающего звук шлема может дать ослабление на 30-50 дБ в диапазоне частот 0.8-7 кГц. Более сильное ослабление звука снаружи не дает эффекта, поскольку звук доходит до внутреннего уха также благодаря проводимости костей и тканей¹⁰⁵.

Защиту от воздействия на все тело можно обеспечить в принципе камерами или оболочками, которые должны быть достаточно жесткими, чтобы не могли легко вибрировать и передавать звук вовнутрь, а также облицовкой из звукопоглощающих (то есть, пористых) материалов. Для работающих с реактивными турбинами техников существуют защитные костюмы¹⁰⁶. Но на низких частотах механизм поглощения звука теряет свои свойства, когда облицовка становится тоньше четверти длины волны (для 250 Гц это 0.34 м) и поглощение падает с уменьшением частоты¹⁰⁷. При очень высоких уровнях давления и высоких частотах нагревание поглощающего материала может представить проблему, но в современных условиях это смотрится главным образом как теоретическая проблема в связи с сильным ослаблением звука в зависимости от расстояния.

Полностью закрытый бронированный транспорт должен обеспечить значительную защиту от низкочастотного звука. С другой стороны, у обычного дорожного транспорта нет надежной изоляции от внешней среды, а его окна или детали недостаточно жестки и могут пропускать внешние низкочастотные колебания давления. Аналогичным образом низкочастотный звук может проникать в здания через щели или закрытые окна. Если частота звука соответствует комнатному резонансу¹⁰⁸, может возникнуть внутреннее давление, намного превосходящее давление падающего звука. Для применения этого эффекта потребуются источник с переменной частотой, а также моделирование и/или проведение экспериментов в конкретном месте. Но очевидно, что при резонансном росте разбиваются оконные стекла (поскольку у них большая площадь, а порог ниже болевого порога для людей), что опять

¹⁰⁵ C.W.Nixon, E.H.Berger, "Hearing Protection Devices", ch.21 in Harris [48]. Значения индивидуальных ослаблений, включая шлемы, приведены в статье J.C.Webster, P.O. Thompson, H.R.Beitscher, *Journal of the Acoustical Society of America* 28, no.4 (July 1956): 631-638.

¹⁰⁶ G.Jansen, "Influence of High Noise Intensities on the Human Organism" (in German), *Wehrmedizinische Monatsschrift*, no.10 (1981): 371-379.

¹⁰⁷ R.Moulder, "Sound-Absorptive Materials", in Harris [48], chap.30.

¹⁰⁸ Для комнаты прямоугольной формы половина наибольшей резонансной волны равна наибольшей длине. Тогда, например, при длине 5 м самая низкая резонансная частота составит 34 Гц.

снижает резонансный эффект.

С другой стороны, при более высоких частотах стены, окна, металлические покрытия и другие подобные детали обеспечивают значительное ослабление звука.

Лечение акустических и ударных травм

Здесь мы приведем только несколько указаний¹⁰⁹. Некоторые мгновенные эффекты повышенного звукового воздействия могут просто проходить со временем (в интервале от минут до месяцев): к ним относятся потеря слуха, шум в ушах, боль или головокружение. Но некоторые могут остаться постоянными. Они по-видимому вызываются повреждением внутреннего уха, например, повреждением волосяных клеток на костной мембране в передней части ушного лабиринта или аналогичными эффектами в вестибулярной системе. Похоже, что такие повреждения нарастают в течение нескольких часов после акустической травмы, что может оказаться связанным с ослабленным кровоснабжением. Поэтому часто предлагаются лекарства, усиливающие циркуляцию крови. Изучение того, насколько успешно такое лечение, приводит к противоречивым результатам¹¹⁰.

Поскольку дальнейшее воздействие сильного шума увеличивает повреждение и пересекается с процессом лечения, важным компонентом лечения является скорейшее обеспечение тишины для поврежденного уха (например, при помощи ушных затычек)¹¹¹.

Разрывы барабанных перепонки при бомбардировке в 80-90% случаев излечиваются сами по себе. Если разрыв занимает площадь свыше трети перепонки, как правило, требуется операция по ее зашивке. Более редко происходят перелом или смещение косточек среднего уха – они указывают на гораздо более серьезное взрывное повреждение, которое требует гораздо более сложной хирургии¹¹².

Хотя встречаются случаи почти полного восстановления слуха даже после разрыва обоих барабанных перепонки, более вероятно, что произойдет ПСП (умеренного или опасного масштаба)¹¹³. Лечение не может серьезно помочь в этом случае – основной помощью могут стать слуховые аппараты. Если наступает почти полная глухота, имплантация в ушную улитку или даже в головной мозг для прямой электростимуляции чувствительных или нервных клеток (это очень дорогое лечение) может восстановить в значительной степени слух и возможность воспринимать речь¹¹⁴. Предохранение (например, защита уха) – это единственный надежный путь, чтобы избежать постоянной потери слуха¹¹⁵.

¹⁰⁹ Конечно, есть много медицинской литературы по повреждениям слышимости и их лечению, например, Paparella [48]. Мы не будем обсуждать лечение повреждений других органов (кроме ушей) при взрывах ниже смертельного уровня, поскольку повреждение ушей будет доминирующим, а повреждения других органов не попадают в раздел "акустических".

¹¹⁰ Ward 1991 [48]. See also R.Probst et al., "A Randomized, Double-blind, Placebo-controlled Study of Dextran/Pentoxifylline Medication in Acute Acoustic Trauma and Sudden Hearing Loss", *Acta Otolaryngologica* (Stockholm) 112, no.3 (1992): 435-443.

¹¹¹ Ward 1991 [48].

¹¹² R.H.Chait, J.Casler, J.T.Zajtchuck, "Blast Injury of the Ear: Historical Perspective", *Annals of Otolaryngology, Rhinology & Laryngology* 98, no.5, pt.2, Suppl 140 (May 1989):9-12; J.D.Casler, R.H.Chait, J.T.Zajtchuck, "Treatment of Blast Injury to the Ear", *ibidum*, pp. 13-16 and respective references.

¹¹³ See e.g.: A.G.Kerr, J.E.T.Byrne, "Concussive effects of bomb blasts on the ear", *Journal of Laryngology and Otolaryngology* 89, no.2 (Febr. 1975): 131-143.

¹¹⁴ Papers of International Cochlear Implant, Speech and Hearing Symposium, *Annals of Otolaryngology, Rhinology & Laryngology* 104, no.9, pt.2, Suppl.166 (Sept. 1995): 1-468. О приобретенной глухоте при потенциальном воздействии шумов смотрите: J.S.Thomas, "Cochlear Implantation in the Elderly", *ibid.* pp.91-93; R.K.Shepherd et al., "The Central Auditory System and Auditory Deprivation: Experience with Cochlear Implants in the Congenitally Deaf", *Acta Otolaryngologica* (Stockholm), Supplement 532 (1997): 28-33; M.J.A. Makhdoum, A.F.M. Sink, P. Van den Broek, "Cochlear implantation: a review of the literature and the Nijmegen results", *Journal of Laryngology and Otolaryngology* 111 (Nov. 1997): 1008-1017; papers of third European Symposium on Pediatric Cochlear Implantation, *American Journal of Otolaryngology* 18, no.6 Suppl (Nov. 1997): S1-S172.

¹¹⁵ Ward 1991 [1].

Выводы

Судить об акустическом оружии особенно сложно, потому что существует столь много аспектов. Диапазон потенциальных эффектов простирается от простого раздражения, вызванного временным ухудшением слуха, до физиологического повреждения уха, а в предельном случае – и других органов, что приводит к смерти. Критерий также будет различным в зависимости от предлагаемого контекста и сценария применения – спектр критериев включает, с одной стороны, локальную защиту конкретных установок от мобильных систем и, с другой стороны, ужесточение законов вооруженных конфликтов. Недостаток официальной информации по разрабатываемым проектам и необоснованные утверждения о свойствах и воздействии акустического оружия делают суждения еще более затруднительными.

Вместо того, чтобы попытаться получить полное суждение о всех возможных типах оружия и вариантах их применения, данная статья направлена на предоставление фактов, которые содействуют обсуждениям и в конечном счете помогают добиться ответственных решений о том, как относиться к акустическому оружию. Ниже подводятся основные результаты исследований и в конце приведено несколько замечаний общего характера.

Воздействие на людей

В отличие от нескольких статей в оборонной прессе инфразвук высокой мощности не оказывает заметного воздействия на людей. Болевой порог выше, чем в звуковом диапазоне, и нет надежных фактов относительно утверждаемого воздействия на внутренние органы, на вестибулярную систему, на рвоту и неуправляемые испражнения при уровне звука 170 дБ или более.

Во всем звуковом диапазоне (20-20000 Гц) раздражительность может появиться уже при уровнях звука, которые гораздо ниже физического дискомфорта, особенно если звуки неприятны и/или продолжаются в течение длительного времени. Это может привести к намечаемым эффектам в конкретных ситуациях, например, при осаде здания, занятого преступниками. Поскольку обычно это не приводит к длительному повреждению, нет причин для беспокойства с гуманитарной точки зрения.

Ситуация меняется при более высоких уровнях интенсивности, где дискомфорт проявляется примерно при 120 дБ и, а при превышении порога примерно 140 дБ возникает боль в ушах. В результате интенсивного звука сначала возникает обратимое ухудшение слуха (временный сдвиг порога). Впрочем, в зависимости от уровня интенсивности, продолжительности, частоты и индивидуальной восприимчивости уже кратковременное воздействие на уровнях выше, скажем, 135 дБ могут возникнуть длительные повреждения слуха (постоянный сдвиг порога). Такое повреждение совсем необязательно должно ощущаться жертвой немедленно – ухудшение может проявиться позднее. Обычно оно связано с внутренним ухом. При разрыве перепонки (около 160 дБ), даже хотя это можно лечить, постоянные потери слуха могут сохраниться.

При низких звуковых частотах (50-100 Гц) могут возникнуть нетерпимые ощущения главным образом в груди, даже если уши защищены, но для этого нужны уровни 150 дБ и выше.

В диапазоне от средних до высоких звуковых частот возможны отдельные нарушения равновесия при уровне звука выше 140 дБ и незащищенных ушах. При еще более сильном звуке в полостях, заполненных воздухом (например, в носу и во рту), могут возникнуть ощущения щекотки и жжения.

Высокие звуковые частоты (выше 10 кГц) приводят к меньшему сдвигу порога, а при ультразвуке ухо практически не реагирует на звук, если его уровень ниже 140 дБ. В этом частотном диапазоне может оказаться существенным нагревание воздушных полостей, тканей и волос при уровнях звука выше примерно 160 дБ.

Быстрое лечение может привести к некоторому улучшению после акустической травмы. Впрочем, если наступает постоянная потеря слуха, реально его нельзя восстановить и основными средствами для уменьшения последствий станут слуховые аппараты и попытки имплантации в улитку внутреннего уха.

Ударные волны взрывного характера (возникает вопрос, можно ли их назвать акусти-

ческими) могут иметь разные воздействия, При умеренно высокой силе их (до примерно 140 дБ) появляется временная потеря слуха, которая может перейти в постоянную при более сильных волнах. При уровне шума свыше 185 дБ начинают разрываться барабанные перепонки. При еще более сильных волнах (около 200 дБ, когда избыточное давление уже втрое превосходит атмосферное) начинают разрываться легкие, а при уровне около 210 дБ наступит смерть.

Возможные источники сильного звука

Громкоговорители оказываются не очень эффективными для создания сильного звука, пока их не оснастят рупорами. Более высокие уровни гораздо проще достигаются сиренами, создающими простой тон переменной частоты и питающимися, например, от двигателя внутреннего сгорания. На низких частотах были получены мощности звука в десятки киловатт при уровне сигнала около источника 170 дБ, а для высоких звуковых частот и ультразвукового диапазона характеристики источника составляют несколько киловатт при 160 дБ. Громкоговоритель типа сирены может создавать низкочастотный звуковой сигнал с произвольной волновой формой при аналогичных уровнях мощности и силы звука. Свистки также создают в основном монотонный звук: при низких частотах можно получить десятки киловатт, при высокой звуковой частоте – несколько киловатт, а в ультразвуковом диапазоне – около одного киловатта.

Взрывные заряды создают ударную волну, где избыточное давление (на заданном расстоянии) линейно зависит от выделенной энергии, и поэтому на близких расстояниях от источника практически не существует верхнего предела на этот параметр. Получился бы новый тип источника, если происходит не один единственный взрыв, а следует быстро повторяющаяся цепочка взрывов с частотой, лежащей, например, в диапазоне низких звуковых частот. Для такого случая, в принципе, можно говорить об акустической мощности порядка мегаватта и уровне звука 180 дБ (вблизи источника).

Практически для всех упомянутых видов источника типичный размер составит метр или более. Подобная универсальность относится к размеру излучающей площади и к соответствующему источнику питания (например, двигателю внутреннего сгорания). Переносимое вручную акустическое оружие типа винтовки рассматривается только для свистящих или грохочущих пуль. Все остальные источники будут фиксированными или потребуют для перевозки вертолеты, грузовой транспорт или что-то подобное.

Получение сильного инфразвука при нелинейном наложении двух ультразвуковых частот нереалистично.

Проблемы распространения

Хотя можно получить раздражающие, болезненные или приводящие к травмам давления звука от всех упомянутых выше типов источников (а взрывы могут даже убить), если служащие целью люди находятся близко к источнику, появляются большие трудности или непреодолимые проблемы, когда такие уровни звука надо получать на значительных расстояниях.

Первым препятствием является дифракция. Излучаемые источником волны немедленно начинают расходиться сферически, если длина волны больше размера источника, то есть мощность распределяется по площади, которая возрастает с удалением от источника, а давление звука и его интенсивность уменьшаются с расстоянием. При размерах источника порядка метра это сохраняется для частот ниже нескольких сотен Гц. "Инфразвуковые пучки" не вызывают доверия. Но даже при более высоких частотах (когда длина волны становится короче), где можно добиться фокусировки или создания пучков с постоянной шириной до какого-то расстояния, сферическое расширение все равно восторжествует.

Вторая проблема возникает из-за нелинейных свойств воздуха. Как только давление звука достигает величины, требуемой для намеченного немедленного воздействия, вскоре (через какое-то расстояние) форма волны меняется, принимая пилообразный вид, поскольку пики волн движутся быстрее, чем волновые подошвы. Образующиеся ударные фронты го-

раздо сильнее рассеивают энергию волны, так что звуковое давление падает как $1/r^2$ даже для плоской волны без расширения пучка (и еще сильнее при расходящемся пучке). Для сферических ударных волн ослабление пропорционально $1/r^3$, пока избыточное давление превышает нормальное атмосферное давление.

Ударные волны образуются раньше и соответствующие потери энергии становятся сильнее с увеличением частоты. Поэтому, даже если дифракция незначительно уменьшает давление звука с расстоянием при какой-то достаточно высокой частоте, потери в ударных волнах уменьшат затем по длине пучка давление по сравнению с начальным высоким значением. Как далеко может распространиться данный уровень звука, зависит от многих деталей, например, от размера источника, частоты, формы начального волнового фронта, влажности воздуха, намечаемого уровня звука в районе цели, но эмпирически можно утверждать, что распространение достаточно высоких уровней звука (скажем, свыше 140 дБ) на расстояние более 50 м не кажется осуществимым при источниках метрового размера.

Только для волн от одного взрыва, полученных от заметного по величине заряда взрывчатки (свыше 0.1 кг тротила), избыточные давления могут превзойти указанные выше уровни на указанных расстояниях. Поскольку люди лучше выносят импульсы, а давление круто падает с расстоянием, на близких расстояниях от источника сохраняются гораздо более высокие избыточные давления, способные привести к разрыву легких и к смерти.

Я не знаю правдоподобного механизма "акустического ядра размером с баскетбольный мяч", которое, как утверждается, может привести к смертельному исходу даже на расстоянии в несколько сотен метров – подтверждение или надежное опровержение такого утверждения требует дальнейших исследований.

Ситуация меняется, если сильные акустические волны устанавливаются внутри помещения, где мощность не рассеивается благодаря подпитке от колебаний стен. Достижение высоких уровней окажется особенно эффективным при комнатном резонансе. Прямая связь (например, через вентиляционные щели) окажется наиболее эффективной. Следующее место занимает подача звукового давления через тщательно подогнанные трубки, прижатые к окнам. Удаленные источники звука приводят к самой худшей связи, но они могут при некоторых условиях оказаться достаточными для создания резонансных вибраций.

Дальнейшие исследования

Существует не столь много областей, где выяснение или более детальное научно-техническое изучение могут оказаться полезными. Наиболее важные проблемы таковы:

- количественные аспекты распространения ограниченных по ширине пучков ударных волн (слабые и сильные ударные волны);
- рабочие принципы и характеристики возможного источника ударных волн, образованных последовательностью многих взрывов;
- возможность "свободного от дифракции" прохождения акустических импульсов большой мощности на значительные расстояния ("акустические пули"), в частности, с использованием вихревых колец.

Общие замечания

Как и для других типов "несмертельного оружия", у акустического оружия возникают проблемы дозировки и восприимчивости, которые отличаются у разных лиц. Подвергнутые воздействию звука той же самой интенсивности, одни могут страдать от постоянной потери слуха, а у других сдвиг порога оказывается всего лишь временным.

Впечатляющие воздействия на состояние равновесия или на дыхательный тракт происходят только при таких уровнях звука, которые непосредственно опасны с точки зрения постоянного нарушения слуха. Поэтому обещания сторонников акустического оружия о "кратковременных повреждениях" можно было бы обеспечить только при четко установленных пределах, например, при уровне звука не выше 120 дБ в районе уха любого лица. В противном случае, это приведет к отказу от многих вызывающих надежды эффектов акустического оружия.

Поскольку защита ушей может оказаться вполне эффективной во всем частотном диапазоне, ее, конечно, будут применять вооруженные силы, милиция и банды преступни-

ков, по крайней мере, после первого знакомства с использованием акустического оружия противниками. Но так как защита очень проста и легко доступна, ее скорее всего вскоре будут применять "обычные" люди на демонстрациях и т.д.

С точки зрения аспектов международного гуманитарного права еще предстоит провести полный анализ. На современном уровне несколько предварительных размышлений кажутся оправданными.

Акустическое оружие отличается от недавно запрещенного ослепляющего лазера в некоторых отношениях:

- Аргумент, что 80-90% чувств человека проходят через глаза, явно нельзя перенести на уши; поэтому и аргумент о ненужном страдании не может быть выдвинут на таком же основании, как в случае с ослепляющим оружием¹¹⁶.
- Физиологическое повреждение уха от взрыва не отличается от действия обычного оружия.
- Даже при разрыве барабанных перепонок возможно лечение или, по крайней мере, улучшение слышимости.
- Могут применяться слуховые аппараты и имплантации, а для системы зрения сравнимых средств в действительности не существует.

Поэтому ситуация с предупредительным запретом с точки зрения международного права ведения войн гораздо менее ясна, чем для ослепляющих лазеров.

С другой стороны, акустическое оружие несет в себе большую опасность невыборочных эффектов, хотя только на малых расстояниях. Некоторые типы акустического оружия будет трудно направить только на одну цель, тем более на одну часть человеческого тела, поскольку дифракция приводит к расширению волны. Таким образом, в некоторых мыслимых ситуациях лица, не участвующие в военных операциях, или просто свидетели будут подвергаться воздействию. Пока результаты воздействия будут временными или пока постоянные эффекты малы, при некоторых обстоятельствах подобная ситуация может быть приемлемой.

При расположенных в определенном месте источниках звука могут не вызвать возмущений даже источники, способные вызывать заметные длительные повреждения на близких расстояниях, так как приближающиеся к ним люди услышат звук, а затем почувствуют боль и в большинстве случаев смогут выбраться из опасной зоны добровольно. Впрочем, если их подталкивает толпа, это может оказаться невозможным, так что можно было бы потребовать установления не приносящих повреждения уровней звука (скажем, ниже 120 дБ) в районе физической барьера, защищающего сооружение с источником сильного звука.

Мобильное акустическое оружие, способное наносить постоянные повреждения в радиусе, скажем, 10-20 м, окажется гораздо более проблематичным, особенно в контексте ужесточения международного права. По-видимому, можно не полагаться на пользователей оружия, чтобы придерживаться определенных пределов – если быть последовательным до конца, придется сводить такие пределы в систему (например, в виде абсолютных верхних пределов на мощность или пределов на фактическую мощность и длительность сигнала в зависимости от расстояния до цели; для целей внутри комнат потребуются специальные предосторожности.)

Международный Комитет Красного Креста предложил четыре критерия для суждения о том, когда зависящие от конструкции и предвидимые воздействия оружия приведут к излишним телесным повреждениям и необязательным страданиям. Первый критерий выполняется, если оружие вызывает "конкретное заболевание, конкретное ненормальное физиологическое состояние, конкретное ненормальное психологическое состояние, конкретную и постоянную неспособность к действию или конкретный изъясн"¹¹⁷. Если обратиться к такому

¹¹⁶ L. Doswald-Beck (ed.), "Blinding Weapons: Reports of the Meetings of Experts Convened by the International Red Cross on Battlefield Laser Weapons, 1989-1991" (Geneva: International Committee of the Red Cross, 1993): 336; "Blinding laser weapons...[6]: 28ff.

¹¹⁷ R.M. Coupland (ed.), "The SirUS Project – Towards a determination of which weapons cause 'superfluous injury or unnecessary suffering'" (Geneva: International Committee of the Red Cross, 1997).

утверждению общего характера, некоторые типы акустического оружия попадут под его действие.

Если подвести итоги, то акустическое оружие явно не станет чудо-оружием, как иногда рекламируется. Использование такого оружия в вооруженных конфликтах или ужесточение международного права поднимут важные проблемы, имеющие отношение к необязательным страданиям, к защите посторонних лиц и к соразмерности. Можно представить особые ситуации, где акустическое оружие может добавить варианты применения легитимной силы более гуманным образом, например, возможно, в случаях с заложниками. Впрочем, воздействия окажутся не столь заметными по сравнению с сообщаемыми, особенно у подготовленных оппонентов, чьи собственные возможности причинить ущерб заметно не уменьшатся. Поэтому заинтересованность вооруженных сил и полиции в оружии такого типа может оказаться меньшей, чем хотели бы его сторонники.

Это могло бы обозначать, что направленные усилия гуманитарного, международного и правового сообщества на упреждающий запрет определенных типов акустического оружия могут обещать успех. Из-за большого разнообразия типов потенциального оружия и их воздействия на людей для этой цели окажутся необходимыми четкие определения и критерии. Один из подходов мог бы, например, потребовать предела в 120 дБ во всех доступных публичных местах, если положение источника сильного звука фиксировано. Мобильное акустическое оружие может быть запрещено или ограничено небольшим числом применений для конкретных полицейских задач, если оно способно создавать более, чем, скажем, 130 дБ на расстоянии 5 м. В число ограничений может входить также зависящая от частоты слуховая чувствительность людей и такие ограничения будут ужесточены в диапазоне частот 0.5-6 кГц. Эти пределы направлены на гарантирование заметно более низкого уровня повреждений, чем те, что, как правило, вызываются обычным стрелковым оружием при вооруженном конфликте. Поэтому всеобщее принятие шагов такого типа может оказаться проблемой, если ограничить обсуждения законами самой войны.

Более общий подход, аналогичный тому, какой был принят при запрещении ослепляющего лазерного оружия (запрещение оружия, конкретно предназначенного для того, чтобы приводить людей в состояние постоянной глухоты), кажется в данном случае менее разумным, поскольку это не является главной задачей современных разработок акустического оружия, а оглушение на малых расстояниях может непосредственно произойти как побочный эффект оружия, предназначенного для создания только временных эффектов на более удаленных расстояниях. Даже более общий запрет на лишение слуха как метода войны является нереальным в связи с наличием большого количества оружия взрывного действия в арсеналах вооруженных сил.

Поскольку средства защиты просты, может оказаться, что вооруженный конфликт окажется наименее подходящим сценарием, а другие операции, например, контроль над толпой будут более реалистичными. Поэтому запреты и ограничения должны с самого начала оказаться в поле зрения при рассмотрении ужесточения права и других применений акустического оружия.

Эти аргументы показывают, что необходимы дальнейшие рассмотрения, чтобы пойти по разумному пути. Мы надеемся, что данная статья даст вклад в подобные обсуждения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Хотелось бы поблагодарить программу изучения проблем мира (ПИПМ) Корнеллского университета и особенно Юдифь Реппи за приглашение меня, как гостя, для исследовательской работы на ноябрь 1997 г. Я благодарен также Фонду Макартуров за предоставление средств для проекта контроля над техническими средствами в рамках ПИПМ, которые обеспечили мое пребывание в Корнеллском университете, и министерство науки и исследований земли Северный Рейн – Вестфалия (Германия) за предоставление гранта Дортмундскому университету на проект превентивного контроля над вооружениями (над технологиями нового оружия), в рамках которого я завершил данное исследование. Наконец, я благодарен Францу Фуджара с факультета экспериментальной физики Дортмундского университета, который поступил туда на работу и оказывал помощь в научно-технических исследованиях по проблемам разоружения.

Приложение 1 Волны давления в воздухе¹¹⁸

Линейная акустика¹¹⁹

Изменения давления, образуемые источником, распространяются в воздухе как звуковые волны. Точное волновое уравнение является нелинейным, но при небольших амплитудах (например, давление звука примерно в 1000 раз меньше статического, то есть лежит ниже 100 Па, что соответствует уровню 134 дБ) линии на диаграмме давление-объем в воздухе можно заменить касательными и уравнение линеаризуется. В этом случае линейной акустики скорость звука составляет $c_0 = 343$ м/с при статическом давлении кПа, температуре и плотности $\rho_0 = 1,20$ кг/м³.

Давление звука p является отклонением от статического давления P_0 . Чтобы подсчитать давление звука от простого источника, можно использовать допущение о монополе (дышащей сфере), излучающем сферические волны в открытое пространство. Если v_{rms} - среднеквадратичная поверхностная скорость синусоидального колебания, то среднеквадратичное давление на расстоянии r от центра в дальней зоне поля излучения составит

$$p_{rms}(r) = \rho_0 c_0 k A v_{rms} / 4\pi r \quad (A-1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ - волновое число, λ - длина волны, а ν - частота. Среднеквадратичная интенсивность, то есть среднеквадратичная мощность, приходящаяся на единицу площади и переносимая вместе с волной, составит

$$I_{rms}(r) = p_{rms}^2(r) / (\rho_0 c_0) \quad (A-2)$$

где величина $Z_0 = \rho_0 c_0$ называется импедансом свободного воздуха. Интенсивность спадает как $1/r^2$, поскольку среднеквадратичное давление уменьшается как $1/r$. Полная излучаемая мощность P_{rms} определяется интегралом по всей сфере радиуса r :

$$P_{rms} = 4\pi r^2 I_{rms}(r) \quad (A-3)$$

которая постоянна при отсутствии иных потерь.

Если волновое поле не является сферически симметричным, а ограничено неким конусом с телесным углом Ω , интенсивность внутри конуса окажется больше в $4\pi/\Omega$ раз, а давление – в корень квадратный из этой величины. Если источником звука служит поршень (радиуса a) внутри бесконечного и жесткого кожуха, вибрирующий со среднеквадратичной скоростью v_{rms} и с частотой ν , то среднеквадратичное давление на расстоянии r под углом θ в дальней зоне поля излучения составит

$$p_{rms}(r, \theta) = \frac{\rho_0 c_0}{4\pi r} k 2v_{rms} \pi a^2 \frac{2J_1((ka) \sin \theta)}{(ka) \sin \theta} \quad (A-4)$$

Значение функции Бесселя $2J_1(x)/x$ близко к единице в диапазоне аргумента $x = (0, \pi/2)$. Сравнение с (A-1) показывает, что на оси ($\theta = 0$) давление звука вдвое превышает давление от простого сферического источника с такой же площадью поверхности или с таким же объемным расходом. Интенсивность в четыре раза выше из-за отражения от кожуха или из-за распространения в полусферу. Если удалить кожух и представить, что поршень дви-

¹¹⁸ Altmann [1], Приложения А.1-А.4.

¹¹⁹ Е.г.: Е. Skrudrzyk, *The Foundation of Acoustics – Basic Mathematics and Basic Acoustics* (New York/Wien: Springer, 1971); P.M. Morse, K.U. Ingard, *Theoretical Acoustics* (New York: McGraw-Hill, 1968); A.D. Pierce, *Acoustic – An Introduction to Its Physical Principles and Applications* (Woodbury NY: Acoustical Society of America, 1991).

жется в горловине трубы¹²⁰, то множитель 2 (или 4 для интенсивности) пропадет, а конец трубы будет действовать на оси как простой источник с таким же поверхностным или объемным расходом¹²¹. Когда длина волны превышает $2\pi a$ (длину окружности), аргумент функции Бесселя становится меньше $\pi/2$ (даже при $\theta = \pi/2$), а последний множитель в (А-4) при этом равен единице, то есть давление звука фактически одно и то же по всем направлениям, в том числе и вдоль кожуха, или даже (при $\lambda \geq 4\pi a$) в обратном направлении в случае трубки. Это означает, что для достижения направленного излучения при низких частотах потребуются очень большие излучающие поверхности, например для частоты 50 Гц (длина волны – 6.8 м) явно требуется радиус a размером свыше 1.1 м.

Передача звуковой волны достаточно высокой частоты в основном в пределах некоторого конуса может быть достигнута при помощи рупора с отражающими стенками, помещенного перед источником, и отражающего экрана, расположенного за источником^{122,122}. Благодаря возрастающему поперечному сечению, такая система действует как трансформатор импеданса и может повысить эффективность генерации звука, например, от 1-2% для громкоговорителя до 10-50%¹²³. Если круговая площадка излучает параллельные волны постоянной интенсивности, то в дальней зоне поля излучения самое главное дифракционное френгоферово пятно определяется углом φ_1 , соответствующим первому нулю функции Бесселя из (А-4):

$$\sin \varphi_1 = 1,22\lambda / D \quad (\text{А-5})$$

где D – диаметр антенны. Если выражение справа больше единицы, то нуля функции Бесселя вообще нет.

Интенсивность на оси равна

$$I_{\max}(r) = P\pi D^2 / (4\lambda^2 r^2) \quad (\text{А-6})$$

При распространения звука на открытом воздухе вводятся поправки, обусловленные некоторыми эффектами, большинство из которых малы доля рассматриваемых здесь расстояний (10-100 м) и ими пренебрегают при простых расчетах в рамках данной оценки. Впрочем, некоторые из них трудно оценить в конкретной ситуации и поэтому они добавляют значительный объем непредсказуемости для применения акустического оружия на расстояниях примерно свыше 50 м.

Нелинейная акустика – режим слабых ударных волн¹²⁴

Если возмущения, вносимые акустическими волнами, уже не малы по сравнению со статическими значениями, приходится рассматривать тот факт, что скорость распространения не является более постоянной величиной – она увеличивается с давлением, плотностью или скоростью частиц. Таким образом, области большего сжатия движутся быстрее, а области меньшей плотности – медленнее, чем нормальная скорость звука. Это означает, что форма волны, даже если сначала она была синусоидальной, становится возмущенной (рис.А-1а). Относительно точки, где амплитуда волны переходит через ноль, пики давления

¹²⁰ Если труба отсутствует, между передней и задней частями поршня произойдет акустическое короткое замыкание при низких частотах. По этой причине громкоговорители обычно устанавливают в закрытых ящиках.

¹²¹ See also: H. Levine, J. Schwinger, "On the Radiation of Sound from an Unflanged Circular Pipe", *Physical Review* 73 (1948): 383-406.

¹²² Смотрите работу Салмона [88] и цитированную в ней литературу.

¹²³ Starobin [88].

¹²⁴ See e.g.: O.V. Rudenko, S.I. Soluyan, *Theoretical Foundations of Nonlinear Acoustics* (New York/London: Consultants Bureau, 1977); G.B. Whitham, *Linear and Nonlinear Waves* (New York: Wiley, 1974); M.F. Hamilton, D.T. Blackstock (eds.), *Nonlinear Acoustics* (San Diego: Academic, 1998).

двигаются вперед, а подошвы – назад, образуя в конце концов пилообразную волну, когда в данной точке пространства сначала появляется положительный скачок давления, а затем линейный спад к минимуму отрицательного давления – и этот процесс повторяется периодически (рис.А-1b). Это можно описать также как последовательное нарастание гармоник начальной частоты (для идеальной пилообразной волны амплитуда n -ой гармоники пропорциональна $1/n$). Хотя диссипативные потери в среде не важны в области первого нарастания, они сильно увеличиваются по мере того, как формируется ударный фронт. На втором этапе амплитуда и нелинейное искажение слегка уменьшаются до тех пор, пока давление не становится столь малым, что снова превалирует линейное распространение (рис.А-1c).

Детали сложны. Для плоской волны среднеквадратичное давление фактически остается постоянным при первой фазе. После образования ударной волны оно уменьшается примерно обратно пропорционально расстоянию (обратите внимание, что это уменьшение сохраняется для бесконечно широкого волнового фронта и не связано с геометрическим расширением). Эта фаза завершается при низкой амплитуде насыщения, не зависящей от начального значения. При третьей фазе преобладает экспоненциальное затухание.

Для сферических волн рост нелинейного возмущения ускоряется при сходящихся волнах и замедляется при расходящихся волнах из-за увеличения (уменьшения) амплитуды в зависимости от радиуса r . Если вообще образуется сходящаяся ударная волна, амплитуда уменьшается с расстоянием быстрее, чем $1/r$, а ударный фронт исчезает на некотором радиусе.

В случае ограниченных волн (пучков) амплитуда на каком-то расстоянии зависит от относительного вклада нелинейных эффектов по сравнению с дифракционными. Для количественных утверждений требуются детальные исследования¹²⁵.

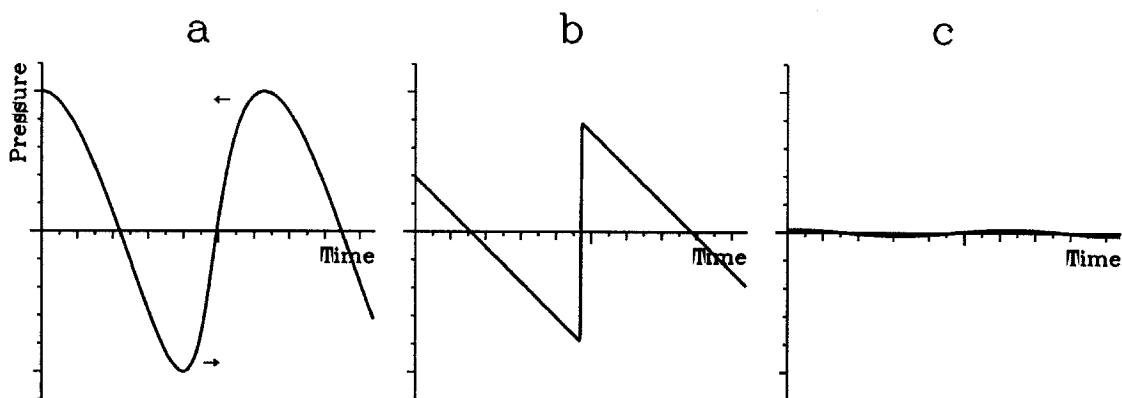


Рис. А-1: Представлена зависимость давления от времени (волна движется направо). Указаны волновые формы начальной гармонической волны до и после образования ударного фронта. На первом этапе (а) пики давления движутся быстрее, а подошвы медленнее, что деформирует форму волны по мере ее распространения. На втором этапе образуется округленная пилообразная волновая форма с сильной диссипацией на ударном фронте (b). Фронт становится толще, а амплитуда слабее, пока, наконец, не останется небольшая синусоидальная волна (c).

Нелинейная акустика – получение разностной частоты, демодуляция¹²⁶

¹²⁵ Нелинейное распространение звука и взаимодействие с дифракцией и поглощением являются областями активных исследований. Нужны дальнейшие работы особенно для импульсных источников. Смотрите заключения работы J.N.Tjøtta, S. Tjøtta, "Nonlinear Equations of Acoustics" in M.F. Hamilton, D.T. Blackstock (eds.), *Frontiers of Nonlinear Acoustics: Proceedings of 12th ISNA* (London: Elsevier, 1990): 80-97. Текущие исследования освещаются в выпусках Международного симпозиума по нелинейной акустике.

¹²⁶ Смотрите Rudenko/Soluyan [124].

Если две волны с разными частотами ω_1 и ω_2 распространяются в нелинейной среде, принцип наложения больше не действует и, как правило, возникают новые частоты $n\omega_1 + m\omega_2$ (где n и m - целые числа). В частности, в нашем случае может представлять интерес разность $\Omega = \omega_1 - \omega_2$ двух почти одинаковых частот, так как последняя из-за своего низкого значения будет гораздо слабее поглощаться в воздухе, чем начальные. Кроме того значительно уменьшится расширение пучка из-за дифракции.

Наложение (суперпозиция) двух волн с близкими частотами приводит прежде всего к изменению амплитуды, аналогичному тому, что наблюдается у волн с амплитудной модуляцией. Для плоских волн модулированная волна (или волна с разностной частотой) с амплитудой p_Ω будет сначала линейно нарастать с расстоянием. Впрочем, она насытится до постоянной величины, линейно связанной с начальной амплитудой p_0

$$p_\Omega = \pi m \Omega p_0 / (4\omega) \quad (\text{A-7})$$

($m \geq 1$ - степень модуляции). Это справедливо для волны треугольной формы и с точностью до постоянного множителя верно для начальной синусоидальной волны, имеющей аналогичную разностную частоту. Уравнение (A-7) означает, что давление звука низкочастотной волны всегда ниже начального давления первичной волны в Ω/ω раз, а это отношение всегда много меньше единицы в силу сделанных ранее предположений.

Режим сильной ударной волны¹²⁷

В сильной ударной волне, которая возникает при *взрыве*, избыточное давление значительно превышает нормальное атмосферное давление. Конечно, последующий импульс отрицательного давления ограничен атмосферным давлением. В связи с большим избыточным давлением фронт ударной волны движется со скоростью, явно превышающей скорость звука. На любом заданном расстоянии сначала наблюдается быстрый скачок избыточного давления, а за ним следует более медленное падение давления до нормального значения (возможно, это происходит из-за фазы понижения давления). После прохождения ударной волны газ остается нагретым с меньшей плотностью. Максимальное избыточное давление примерно линейно растет с энергией и для трехмерного распространения падает примерно обратно пропорционально кубу расстояния. По мере того, как избыточное давление падает ниже атмосферного, происходит переход к слабой ударной волне и, наконец, к линейному распространению с обычной скоростью звука, зависимостью от расстояния типа $1/r^2$ и экспоненциальным ослаблением амплитуды.

На рис. 2 представлены некоторые величины для взрывов мощностью 0.1 и 1 кг тротила в свободном воздухе на уровне моря. На рис. 2а показано избыточное давление. Виден переход от зависимости типа $1/r^3$ (сильная ударная волна) к зависимости $1/r$ (слабая ударная волна/линейное распространение) в диапазоне расстояний 3-7 м при избыточном давлении порядка одной трети нормального. Интересно, что даже при взрыве 1 кг тротила (значительного количества взрывчатки, примерно в десять раз превышающего заряд ручной гранаты) порог для разрыва барабанной перепонки (примерно 35 кПа) превышает на расстояниях менее 5 м. С другой стороны, максимальное давление выше 145 дБ (0.36 кПа), когда большинство лиц ощущает боль при лабораторных экспериментах¹²⁸, на расстояниях до 200 м.

На рис.2b представлена длительность фазы положительного избыточного давления в ударной волне. Очевидно, что при небольших взрывах химического ВВ длительность этого импульса на имеющих смысл расстояниях составляет несколько миллисекунд и поэтому в табл.8 применены пороги поражения для малых времен воздействия.

¹²⁷ Ya.B. Zel'dovich, Yu.P. Raizer, *Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena*, vol.1 (New York/London: Academic Press, 1966); Whitham [124]; S. Glasstone, P. Dolan, "The Effects of Nuclear Weapons" (Washington DC: Government Printing Office, 1977), ch.III; Kinney/Graham [67].

¹²⁸ W.D. Ward, W. Selters, A. Glorig, "Exploratory Studies on Temporal Threshold Shift from Impulses", *Journal of the Acoustical Society of America* 33, no.6 (June 1961):781-793.

При таких коротких волнах тело быстро погружается в область одинакового избыточного давления, действующего со всех сторон, и результирующая заметная сила главным образом вызывается медленным изменением торможения от динамического давления движущегося воздуха за ударной волной. На рис.2с показан приблизительный динамический удельный импульс при единичном коэффициенте аэродинамического сопротивления.

Сильная ударная волна также подвержена дифракции, но с той разницей, что скорость распространения зависит от локального давления. В расширяющейся плоской или сферической волне этот механизм обеспечивает некоторую стабилизацию фронта волны: если где-то возникает скачок обратного направления, усиление энергии в этом месте приведет к ускорению вперед и наоборот. Впрочем, волны, выходящие из открытого конца трубы, немедленно расширяются и даже начинают двигаться в обратном направлении вдоль внешних стенок трубы.

Для разбираемых в статье применений вопрос состоит в том, можно ли будет сфокусировать энергию ударной волны в узком конусе, чтобы избежать распространение во всю сферу. В то время, как избыточное давление будет падать как $1/r$, когда размер пучка не меняется, при увеличении размера пучка появится обычное ослабление типа $1/r^3$.

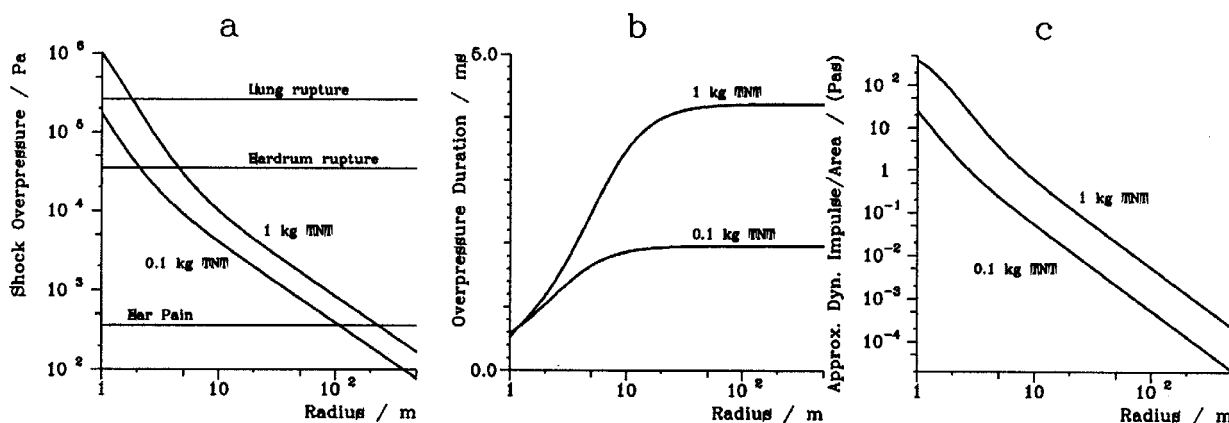


Рис.А-2: Избыточное давление в ударной волне (а), длительность импульса избыточного давления (b) и примерное значение удельного импульса, вызванного динамическим давлением, при единичном коэффициенте атмосферного сопротивления (с) в зависимости от расстояния до точки взрыва при массе взрывчатки 0.1 и 1 кг (взрыв в свободном воздухе на уровне моря). Режим сильной ударной волны с уменьшением давления типа $1/r^3$ сохраняется до расстояний 2 и 5 м, соответственно. Когда взрыв происходит над плотным грунтом, энергию надо увеличить вдвое, а расстояния – в $2^{1/3} = 1.26$ раз. На рис.(а) указаны некоторые пороги повреждений. Разрыв легких наступает на расстояниях менее 0.8 или 1.8 м, а разрыв барабанных перепонок можно ожидать на расстояниях менее 2 и 5 м; отдельные лица почувствуют боль в ушах на расстояниях ближе 100-200 м, соответственно. На расстояниях более 1 м длительности импульса избыточного давления (b) составляют миллисекунды. Удельный импульс от атмосферного сопротивления, передаваемый небольшому объекту, можно подсчитать на основе приблизительного графика (с) путем умножения на соответствующий коэффициент сопротивления.

Необходимо детальное исследование, чтобы понять, на каких расстояниях можно добиться более сильного избыточного давления, чем при сферическом взрыве. Впрочем, кажется трудным представить себе ударную волну от метрового источника, все еще ограниченную в поперечных размерах на расстояниях, скажем, порядка 50 м.

Приложение 2

Анализ конкретных утверждений по поводу акустического оружия¹²⁹

Последующие материалы касаются ряда утверждений, сделанных недавно в журналистских статьях относительно принципов оружия, во-первых, и воздействия на людей, во-вторых.

Утверждения по поводу принципов оружия

Инфразвуковые пучки от направленного источника? В ряде журналистских статей говорится об "инфразвуковых пучках" (см. табл.1). С самого начала ясно (см. уравнение А-6), что для длинных волн потребуется большая излучающая площадь, чтобы получить значительную интенсивность на некотором расстоянии¹³⁰. Для проведения консервативных оценок предположим, что диаметр передатчика составляет 3 м (это уже достаточно громоздкое сооружение), а самая короткая длина волны, совместимая с понятием "инфразвука", равна 17.2 м при частоте 20 Гц и скорости звука 340 м/с. Примем акустическую мощность 10 кВт, что можно получить, например, от двигателя внутреннего сгорания мощностью 30-60 кВт. При этом среднеквадратичное давление вблизи источника составит 0.77 кПа (уровень 152 дБ). Поскольку длина волны гораздо больше размеров излучателя дальняя зона поля излучения одна и та же по всем направлениям и пучка быть не может. Вместо этого наблюдается сферическое расширение (как наблюдалось на слегка меньшем устройстве СМАИ, упомянутом в разделе, посвященном низкочастотным источникам).

В связи с большим источником и низкой частотой не образуется никакой ударной волны и повсюду наблюдается линейное распространение, когда амплитуда в зависимости от расстояния уменьшается как $1/r$. Выберем для примера расстояние 50 м, где давление составит 3.2 Па (уровень 104 дБ), что на несколько порядков величины ниже любого заметного эффекта инфразвука. Конечно, если бы звуковая волна до того, как выйти из источника, прошла через гораздо более узкий канал с большей интенсивностью, в этом случае может образоваться волна, что уменьшит интенсивность снаружи в еще большей степени.

Далее, возьмем низкую звуковую частоту 100 Гц (это верхний предел, диапазона, в котором наблюдались сильные незвуковые воздействия примерно на уровне 150 дБ) и предположим, что имеется такой же крупный излучатель размером 3 м. При направлении вперед все еще остается сферическое распространение без ударной волны. На расстоянии 50 м давление составит 16 Па (уровень 118 дБ), что соответствует громкому звучанию, но явно не превышающему болевой порог. Воздействия на внутренние органы, для которых требуется порог примерно 150 дБ, будут наблюдаться немедленно, но непосредственно перед источником. Можно ожидать боль в ушах и повреждения при кратковременном воздействии (при незащищенных ушах) на расстоянии до нескольких метров.

При более высоких частотах сфокусированное распространение облегчено более короткими длинами волн. Впрочем, по мере того, как образуется и становится более узким пучок, параллельно усиливается нелинейное поглощение. В то время, как на близких расстояниях можно добиться очень высоких уровней звука с заметным воздействием, например, на органы слуха или вестибулярную систему, будет практически невозможно дойти до болевого порога на расстоянии 50 м или дальше.

Инфразвук от нелинейного наложения двух направленных ультразвуковых пучков. Об одном из утверждаемых типов акустического оружия ("кричащий ящик", упоминаемый во Введении) было сказано, что в нем используются две близкие к ультразвуку волны, образующие нетерпимую инфразвуковую разностную частоту (вместе с ультразвуковой суммирующей частотой)¹³¹. При кратком общем анализе акустического оружия четко было высказано требование к наличию нелинейности для получения такого эффекта. В данном случае было сказано, что низкочастотный компонент (например, 7 Гц), образуемый от частот 40000 и 40007 Гц, расстраивает вестибулярный орган¹³². Но нигде не была проведена количест-

¹²⁹ Altmann [1], раздел 5 и приложения А.5-А.7.

¹³⁰ Детальный анализ и вычисления для диапазона 0.5-10 кГц приведены в Altmann [1], Приложение А.5.

¹³¹ "Army tests..." [18].

¹³² Lizzka [41].

венная оценка эффективности преобразования.

Для анализа этого утверждения прежде всего следует вспомнить, что в контролируемых экспериментах инфразвук на уровнях свыше 140 дБ не влиял на вестибулярную систему. Нелинейное получение сигналов на разностной частоте может произойти либо при распространении в воздухе, либо внутри уха¹³³.

Коснемся поначалу преобразования в воздухе. Как обсуждалось в связи с уравнением (А-7), для плоских волн звуковое давление в волне с разностной частотой меньше начального давления в первичных волнах в отношении разностной и начальной частот. Если в рамках консервативного подхода взять высокую инфразвуковую частоту 20 Гц и низкую ультразвуковую частоту 16 кГц, это отношение составит 1/800, то есть инфразвуковое давление будет в 800 (или более) раз меньше, чем ультразвуковое давление, излучаемое источником (уровень будет ниже на 58 дБ или более). При размере излучателя 1 м условие получения плоской волны примерно выполняется.

Если продолжить консервативное рассмотрение и принять, что уровень инфразвука, требуемый для появления воздействия на вестибулярный аппарат, составляет 140 дБ (среднеквадратичное давление 200 Па), то уровень инфразвука вблизи источника должен составить примерно 200 дБ (200 кПа – удвоенное атмосферное давление, что уже лежит в области сильных ударных волн и примерно в сто раз (или на 40 дБ) выше, чем в самых сильных ультразвуковых источниках, существующих до сих пор). Такое давление будет соответствовать интенсивности 100 МВт/м², которая после интегрирования по излучающей площади (0.79 м²) приведет к полной акустической мощности 79 МВт. Для воздействия инфразвуком такую мощность придется, вероятно, поддерживать в течение нескольких секунд. Представляется исключительно сложным достижение такого уровня мощности, даже если использовать прямое преобразование 16000 взрывов в секунду смеси бензин-воздух перед отражателем. Снижение мощности путем применения излучателя меньшего размера не поможет, так как ширина пучка начнет увеличиваться на меньших расстояниях и в связи с этим уменьшится интенсивность нелинейного преобразования. Количественный анализ подобной гипотетической цепочки сильных ударных волн потребует отдельного исследования. В действительности, в конечном итоге можно будет получать интенсивности порядка 1 МВт/м² вблизи источника (180 дБ, на границе области слабых ударных волн, где еще справедливо уравнение А-7; смотрите раздел о потенциальных источниках для оружия), а это можно с учетом отношения частот преобразовать в максимальный уровень 120 дБ, который безвреден в инфразвуковом диапазоне.

Поэтому кажется очень маловероятным, что при нелинейном получении разностной частоты в воздухе, когда ультразвук преобразуется в инфразвук, можно будет добиться уровней звука, при которых наступает заметное воздействие на органы слуха или на вестибулярные органы.

Во-вторых, преобразование ультразвука в инфразвук на основе нелинейных процессов может происходить в ухе. Поскольку нет публикаций о получении инфразвука на разностной частоте от ультразвука с высоким уровнем, проведем простые расчеты с использованием правдоподобных (консервативных) предположений. Первое заключается в следующем: по мере того, как частота звука возрастает от величины, соответствующей максимальной чувствительности (для людей это около 2 кГц), до порога слышимости, уменьшаются перемещения барабанной перепонки и соответствующие передачи импульса во внутреннее ухо благодаря (главным образом) инерции участвующих масс. У кошек наблюдается уменьшение слышимости в 20 раз при переходе от 1 кГц к 10 кГц¹³⁴. Примем с запасом это значение для частоты 16 кГц и выше. Второе предположение в том, что принимается сильно упрощенное нелинейное соотношение между статическим давлением и углом поворота центра барабанной перепонки, с которым связаны молоточки. Снова принимаем порог вестибулярных эффектов от инфразвука на уровне 140 дБ и отсюда приходим к требуемому уровню

¹³³ Оба случая разбираются в Altmann [1], Приложение А.6.

¹³⁴ J.J. Guinan, Jr, W.T. Peake, "Middle-Ear Characteristics of Anesthetized Cats", *Journal of the Acoustical Society of America* 41, no.5 (1967): 1237-1261. Обратите внимание, что у подвергнутых анестезии животных мускулы среднего уха были расслаблены и поэтому не сработал звуковой рефлекс, уменьшающий прохождение звука. Поэтому сделанные в этом случае оценки оказываются даже более консервативными.

ультразвука 180 дБ (19 кПа) или выше.

Это примерно на 10-20 дБ выше возможностей самых сильных имеющихся периодических источников ультразвука. Но тем не менее допустим, что такие уровни можно получить. При стандартных предположениях волна с частотой 16 кГц, начинающаяся при таком уровне, уже через 1.4 см станет ударной волной, после чего начнется сильное поглощение до возникновения третьего этапа с постоянной амплитудой (который начнется на расстоянии 39 м при уровне звука 60 дБ). Таким образом, требуемый уровень будет ограничен непосредственной близостью к гипотетическому источнику. Впрочем, при этом возможно прямое повреждение уха из-за перегрузки выше болевого порога и это явится более заметным эффектом наряду даже с нагреванием обнаженной кожи (смотрите раздел по ультразвуку).

Поэтому, принимая во внимание сделанные консервативные предположения, представляется, что ни один из нелинейных механизмов, приводящих к разностной частоте (или к модуляции) в воздухе или в ухе, может вызвать что-то близкое к тем уровням инфразвука во внутреннем ухе, при которых возникнут вестибулярные эффекты или ушная боль. Исключением может стать только область, непосредственно примыкающая к источнику звука.

С другой стороны, кажется возможным получение с помощью нелинейных процессов в воздухе или в ухе слышимых звуков на основе пересечения двух неслышимых (ультразвуковых) пучков от разных источников, поскольку уровни в несколько десятков дБ достаточны для слышимости.

Акустические "пули" без дифракции. В журналистских статьях, посвященных разработке акустического оружия в США и в России, сообщалось об акустических "пулях" без дифракции, но с в чем-то противоречивыми свойствами: в отдельных сообщениях они работали на высоких частотах, а в других – на низких. Упоминались американские антенны размером 1-2 м, а про российские пули говорилось, что их размер соответствует баскетбольному мячу, рабочая частота равна 10 Гц, а смертельный порог соответствует нескольким сотням метров (см.табл.1).

Непонятно, что может стоять за такими утверждениями. Как показано в Приложении 1, дифракция имеет место для всех трех типов акустических волн - линейных, слабых ударных и сильных ударных. Как указано выше, именно при низких частотах дифракция обеспечивает всестороннее распространение. Заявление о "10 Гц", похоже, подразумевает длину волны 34 м, которая, конечно, совсем не соответствует волновому пакету размером с "баскетбольный мяч". Но и при более высоких частотах и даже в случае ударной волны дифракция в конечном итоге приведет к расширению пучка, так что кажется невозможным распространение сильного возмущения с фактически неизменными размерами на расстояния в "сотни метров", если акустические волны излучаются источником размером порядка метра. Это остается справедливым до тех пор, пока сигналы от разных участков источника фактически являются аналогичными и периодическими.

Существует принципиальная возможность излучения с поверхности источника различных импульсных волновых форм, меняющихся контролируемым образом, чтобы при их наложении возникал импульс, который остается локализованным в виде узкого пучка на гораздо больших расстояниях, чем при однородном возбуждении тех же самых участков источника. Ширина пучка может быть меньше размеров источника с самого начала (с точностью до длины волны). Но если у источника конечный размер, что, естественно, необходимо для реального устройства, всегда образуется далекая область поля излучения с уменьшением амплитуды по закону $1/r$. Такие волны назывались "свободными от дифракции" пучками, акустическими (или электромагнитными) "ракетами" или "пулями", акустическими (или электромагнитными) "цепочками импульсов направленной энергии". Условия для получения подобного эффекта таковы: импульсные сигналы от источника с определенной (пространственно меняющейся) формой волны и с широкой полосой частот (то есть, со значительным содержанием высоких частот) и линейное распространение. С точки зрения акустики, первые эксперименты с ультразвуком в воде (несколько десятков см) продемонстрировали, по крайней мере, некоторое увеличение интенсивности на оси по сравнению с тем, что наблюдалось при однородном возбуждении непрерывных волн цепочкой источников¹³⁵. Впрочем, в

¹³⁵ Имеется гораздо больше литературы по электромагнитным и оптическим узким импульсным пучкам, чем по акустическим, и гораздо больше теоретических работ, чем экспериментальных. Смотрите, например: R.W. Ziolkowski, "Localized transmission of electromagnetic en-

отличие от электромагнетизма, в акустике имеются два противодействующих эффекта. Первый из них – это линейное поглощение, растущее пропорционально квадрату частоты и поэтому последовательно снижающее вклад высоких частот при прохождении импульса. Второй эффект связан с тем, что при сильном звуке нелинейное распространение приводит к образованию ударной волны, которое наступает тем скорее, чем выше амплитуда и частота. Как упоминалось в Приложении 1, на фронте ударной волны происходят необычные диссипативные потери, которые приводят к ослаблению типа $1/r$ для пучка постоянной ширины. Если только детальное теоретическое исследование или эксперимент не докажут обратного, представляется желательным скептическое отношение к распространению акустических импульсов высокой мощности практически без расширения пучка на расстояниях, которые заметно превосходят то, что можно получить при дифракции однородных сигналов. Может оказаться, что даже хотя окажутся осуществимыми “сходящиеся пучки” с малой амплитудой сигнала, нелинейное поглощение при больших амплитудах разрушит эффект.

В качестве альтернативы можно подумать о солитоне, то есть, об одиночном импульсе, распространяющемся в нелинейной среде таким образом, что его амплитуда и форма не изменяются. Это требует того, чтобы более высокой скорости более сильного возбуждения, вызываемого нелинейностью (см. Приложение 1), препятствовали либо дисперсия, либо диссипация, а распространение имело одномерный характер (в трубе или в канале или в виде плоской волны бесконечного размера¹³⁶). Но в воздухе дисперсия на представляющих интерес частотах пренебрежимо мала и диссипация также мала, что демонстрирует процесс образования ударной волны. Даже в среде, где могут перемещаться солитоны, в трехмерном случае пучок расширяется на расстояниях, превышающих размер источника, что приводит к уменьшению амплитуды¹³⁷.

Существует еще одна возможность – вихревые кольца, которые из-за их вращательного характера не описываются обычными волновыми уравнениями. Вихревое кольцо (например, кольцо табачного дыма) обычно образуется при испускании импульса жидкости через сопло. На выходе возникает вращение и захватывается окружающая жидкость, после чего вращающееся кольцо из-за вязкостного взаимодействия с окружающей средой движется как устойчивое образование через эту среду. Жидкость в торе остается той же самой и поэтому вихревое кольцо может что-то переносить, как демонстрируется переносом частиц дыма внутри дымового кольца. При движении вихревого кольца тормозящая сила вязкости захватывает все больше окружающей жидкости и образует попутную струю, в результате чего кольцо теряет импульс и становится более крупным и более медленным. Следует заметить, что понятие дифракции в данном случае неприменимо, а размер возрастает с расстоянием относительно медленно. Наконец, кольцо распадается в нормальное турбулентное движение¹³⁸. Оценки образования, распространения и эффектов вихревых колец не

ergy”, *Physical Review A* 39, no.4 (Febr. 15, 1989): 2005-2033; Gang Wang, Wen Bing Wang, “Beam characteristics of short-pulse radiation with electromagnetic missile effect”, *Journal of Applied Physics* 83, no.10 (15 May 1998): 5040-5044. Обратите внимание, что термин “пуля” применяется даже для импульсного “выстрела” через конически расширяющееся “ружье”: A. Stepsnisen, “Acoustic bullets/ transient Bessel beams: Near to far field transition via an impulse response approach”, *Journal of the Acoustical Society of America* 103, no.4 (April 1998): 1742-1751. Ультразвуковые эксперименты описаны в работе R.W. Ziolkowski, D.K. Lewis, “Verification of the localized-wave transmission effect”, *Journal of Applied Physics* 68, no.12 (15 Dec. 1990): 6083-6086.

¹³⁶ E. Infeld, G. Rowlands, *Nonlinear waves, solitons and chaos* (Cambridge: Cambridge University Press 1990); M. Remoissenet, “Waves Called Solitons – Concepts and Experiments”, (Berlin: Springer 1994).

¹³⁷ Для обсуждения коллапса или расширения “солитонов” (без сохранения амплитуды) в двух- или трехмерной плазме или в других средах смотрите работу Infeld/Rowlands [136], chap.9.

¹³⁸ Динамика вихревых колец изложена в работах: H. Lamb, *Hydrodynamics* (6th edition, Cambridge: Cambridge University Press, 1932), chap.7; P.G. Saffman, *Vortex Dynamics* (Cambridge: Cambridge University Press, 1992), chap.10; K. Shariff, A. Leonard, “Vortex Rings”, *Annual Review of Fluid Mechanics* 24 (1992): 235-279; эксперименты и теория по потерям при прохождении смотрите в работах: T. Maxworthy, “The structure and stability of vortex rings”, *Journal of*

могли быть проведены в данной статье по причинам ограничений на место и время¹³⁹. Если бы задачей колец было бы не создание давления, а только перенос каких-нибудь материалов (нагретый газ, раздражители и т.п.), скорость вращения не столь важна, но в данном случае квалификация в качестве "акустического" оружия (уже в чем-то спорная по отношению к самим вихревым кольцам), конечно, неприменима ни в коем случае. Вихревые кольца – это другая область, где требуется более глубокое изучение¹⁴⁰.

Возможно также, что журналисты или обозреватели чего-то правильно не поняли. Например, сфокусированный пучок невидимого лазерного света может создать перед мишенью плазму, излучающую ударную волну (см. ниже) – прохождение к фокусу не будет, конечно, считаться "акустическим". Недоразумение предполагается также при расхождении между низкой и высокой частотами или при приравнивании понятий "проходящий без дифракции" и "проходящий без проникновения" (см. табл.1).

Плазма, создаваемая перед мишенью; удар тупым объектом. В оборонной прессе, было процитировано высказывание сотрудника, связанного с программой стрелкового оружия Службы стрелкового оружия США, о том, что акустическая "пуля" приведет к выводу противника из строя благодаря образованию "плазмы перед целью, которая создает ударную волну, похожую на тупой объект....Он вызывает травму как от удара бейсбольным мячом. Обычные пули вызывают разрывы. Но это что-то другое, поскольку удар вызывается плазмой"¹⁴¹.

Создание плазмы потребует избыточных давлений порядка многих МПа, которые наблюдаются в непосредственной близости от взрывающегося заряда (и где, действительно, благодаря температурам порядка нескольких тысяч К воздух не только испускает видимый свет, но и частично ионизируется¹⁴².

Если принять понятие "тупого объекта", то размер ударной волны должен быть, по крайней мере, сравним с размером человеческого тела. Это означает, что воздействию подвергнутся как уши, так и легкие, у которых порог повреждений лежит гораздо ниже 1 МПа. Поэтому ударная волна с гораздо более высокими избыточными давлениями несомненно окажется смертельной. Вторая проблема связана с возможностью создания таких сильных ударных волн. В то время, как при помощи сфокусированных ударных волн (при имплозии) можно получить давления на уровне даже ГПа в очень малом фокусном объеме (в центре сферической ударной волны¹⁴³), представляются недостижимыми (см. ниже) перспективы получения таких давлений на расстояниях больше размера источника (для этого придется избавляться от ослабления давления в ударной волне из-за сферического расширения ее по закону $1/r^3$).

Итак, возможность образования плазмы на заметных расстояниях от источника можно не принимать во внимание. Можно обсуждать, ошиблись ли журналисты, относя этот эффект к акустическому оружию, в то время, как он имеет смысл для импульсного химического лазера, который описан страницей позже в той же самой статье: "образуя горячую плазму высокого давления в воздухе над поверхностью мишени, в которой создается взрывная волна, приводящая к разнообразному, но контролируемому воздействию на материалы и персонал"¹⁴⁴. В этом случае проблема фокусировки на значительном расстоянии облегчена малой длиной волны (порядка микрон) лазерного света, а огромную мощность за небольшое время будет легче получить при использовании коротких импульсов.

Fluid Mechanics 51, no.1 (1972): 15-32; T. Maxworthy, "Turbulent vortex rings", *Journal of Fluid Mechanics* 64, no.1 (1974):227-239; T. Maxworthy, "Some experimental studies of vortex rings", *Journal of Fluid Mechanics* 81, no.3 (1977):465-495.

¹³⁹ Несколько предварительных указаний представлены в Altmann [1], раздел 5.1.3.

¹⁴⁰ Некоторая информация об американских усилиях в области оружия с вихревыми кольцами представлена в работах: G. Lucey, L. Jasper, "Vortex Ring Generators", in *Non-Lethal Defense III* [2]; J. Dering, "High Energy Toroidal Vortex for Overlapping Civilian Law Enforcement and Military Police Operations" (ibid).

¹⁴¹ Tapscott/Atwal [15], p.45.

¹⁴² Altmann [1], Приложение А.7.

¹⁴³ Например, I.I. Glass, J.P. Sislian, *Nonstationary Flows and Shock Waves* (Oxford: Clarendon, 1994), chap.12.

¹⁴⁴ Tapscott/Atwal [15], p.46.

Аналогичный аргумент сохраняет силу, если задается вопрос о том, может ли "травма от тупого объекта" быть нанесена самой ударной волной на некотором расстоянии. Ограниченная поначалу волна очень скоро становится больше размеров человеческого тела и быстро дифрагирует на нем, создавая практически везде одинаковое избыточное давление и вызывая главным образом силы сжатия, к которым терпимы ткани за исключением заполненных воздухом полостей. Только торможение движущегося воздуха за фронтом ударной волны создаст результирующую силу. При взрыве химического ВВ потребуется избыточное давление в ударной волне около 100 кПа (это соответствует сферическому взрыву 1 кг тротила на расстоянии около 3 м¹⁴⁵). При таком давлении уже ожидается в 50% случаев разрыв барабанной перепонки, что станет, конечно, более серьезным повреждением.

Поэтому травма от тупого объекта возможна только на очень близком расстоянии от источника ударной волны и/или тогда, когда размеры пучка ударных волн меньше размера человеческого тела. И в этом случае произошло, возможно, такое же смешение понятий с лазерной плазмой и она, действительно, была упомянута в том же самом контексте.

Случай с вихревым кольцом, которое действует только на часть тела, требует отдельного анализа (см. выше).

Локализованные землетрясения, вызванные инфразвуком. В беглом обзоре по не смертельному оружию утверждалось, что акустическое оружие могло бы воздействовать на здания, не только разбивая стекла в окнах, но даже путем "локализованных землетрясений" (впрочем, точный источник не указан)¹⁴⁶. Землетрясение может быть определено как перемещение почвы, достаточное для угрозы зданиям, которая появляется при скорости перемещения значительно выше 10 мм/с¹⁴⁷. Если принять это значение в качестве консервативного предела и использовать максимальный коэффициент 10^{-5} м/Па¹⁴⁸ при преобразования акустических эффектов в сейсмические, то для получения указанной скорости потребуется давление низкочастотного звука 1 кПа (уровень звука 154 дБ). Как показано выше, такие уровни возможны только в непосредственной близости от источника звука низкой частоты и их нельзя сохранить на расстоянии свыше десятка метров. Поэтому если при каких-то обстоятельствах придется создавать уровни вибрации, приносящие повреждения зданиям, они скорее всего не будут передаваться колебаниями окружающей почвы, а будут созданы резонансами самого здания или его внутренних частей (вероятнее всего, в отдельных больших комнатах), которые непосредственно возбуждаются энергией низкочастотного звука. В этом случае внутри здания могут в действительности возникать "эффекты типа землетрясений" в виде дребезжания столовой посуды, разбитых стекол в окнах, трещин в штукатурке и (в экстремальных ситуациях) разрушения непрочных стен, но все это потребует очень хорошей связи с источником (см. также раздел по защите). Недопонимание словосочетания "типа землетрясения" может стать причиной для утверждения.

Точно так же утверждаемое "разрушение бетона" инфразвуком¹⁴⁹ (которое звучит так, как будто бы это произойдет при единичном воздействии, но такое само по себе неправдоподобно из-за огромного несогласования импедансов) можно понять только при использова-

¹⁴⁵ Altmann [1], Приложение А.7.

¹⁴⁶ Lewer/Schofield [2], p.12.

¹⁴⁷ Скорость 5 мм/с является порогом для "архитектурных" повреждений и ее предполагали принять в качестве безопасного предела для пульсирующих вибраций. Находящиеся в хорошем состоянии жилые здания должны выдержать 10 мм/с. "Небольшие повреждения" происходят при скоростях свыше 50-60 мм/с: A.G. Wiffin, D.R. Leonard, "A survey of traffic-induced vibrations", RRL Report LR 418 (Crowthorne Berkshire: Road Research Laboratory, 1971), p.14, table 4.

¹⁴⁸ Для покрытой травой почвы это значение максимума обычно составляет несколько десятков Гц, а при других частотах оно может стать в 5-10 раз меньше: J.M. Sabatier et al., "Acoustically induced seismic waves", Journal of the Acoustical Society of America 80, no.2 (1986): 646-649; Altmann/Blumrich [80]; W. Kaizer, *Sound and Vibratiion from Heavy Military Vehicles – Investigations of Frequency Assignment and Wave Spreading with respect to Monitoring under Disarmament Treaties* (Hagen: ISL, 1998).

¹⁴⁹ "Non-lethal devices slice across science spectrum", *National Defense* (October 1993): 25; Arkin [12].

нии подходящего резонанса здания на основе хорошей связи с источником звука¹⁵⁰. То же самое справедливо для охрупчивания или усталости металлов, расслоения композитов и т.п.¹⁵¹.

Утверждения, связанные с воздействием на людей

Имеются не так много утверждений по поводу воздействия звука большой мощности на людей, которые производят большое впечатление при чтении, но трудно отыскать соответствующие подтверждения в научных журналах. Они касаются главным образом рвоты и неуправляемых испражнений¹⁵².

Хотя в научных статьях описывались тошнота и головокружения вблизи сильных источников звука (часто эти эффекты характеризовались как слабые или быстро проходящие), не было сообщения о реальной рвоте ни от высоких звуковых частот, ни от ультразвука (в последнем случае дурнота, как кажется, была связана с наличием звуковых частот¹⁵³). При систематических исследованиях вблизи реактивных двигателей наблюдалась потеря равновесия, но тошнота отмечалась только у отдельных сотрудников (часто после завершения работы), а рвоты вообще не было. Авторы упоминают "американские отчеты", где один из источников утверждал, что при 13 кГц и мощности 1 Вт за раздражимостью и головными болями следовали тошнота и даже рвота, хотя, впрочем, никаких ссылок на этот источник не приведено¹⁵⁴. Если учесть, что в других экспериментах люди подвергались воздействию звука с частотами 9.2, 10, 12, 15 и 17 кГц при уровнях 140-156 дБ в течение пяти минут без каких-либо упоминаний даже о тошноте¹⁵⁵, то без дальнейшей информации подобное единичное утверждение о рвоте вряд ли заслуживает большого доверия. Что касается низкочастотного звука, то в самых предельных экспериментах, выполненных до сих пор, сообщалось о слабых тошноте и головокружениях в диапазоне частот 50-100 Гц при уровне звука около 150 дБ, но рвоты снова не происходило¹⁵⁶. Рвота вообще не упоминалась в экспериментах с животными на низких частотах при уровне звука до 172 дБ¹⁵⁷.

Связанные со спазмами кишечника и неуправляемыми испражнениями факты еще более скудны. Среди всей литературы, просмотренной для этой статьи, был найден только один намек на "проблемы с пищеварением", наблюдавшиеся при экспериментах с сильной сиреной, которая работала на 16 Гц. Однако они никак не были конкретизированы, а в последовавшем мгновенном объяснении говорилось о вибрирующих объектах в карманах одежды¹⁵⁸. При низкочастотном воздействии с уровнем звука до 150 дБ не наблюдалось спазм кишечника¹⁵⁹. То же самое справедливо для экспериментов с животными на низкой частоте¹⁶⁰. Здесь имеет смысл отметить, что и в упомянутых экспериментах с вибрациями нет упоминания о спазмах в кишечнике или о неуправляемых испражнениях¹⁶¹.

¹⁵⁰ Обратите внимание, что современные промышленные здания без штукатурки могут выдерживать землетрясения с колебаниями почвы 20-40 мм/с; Whiffin/Leonard [147].

¹⁵¹ Lewer/Schofield [2], p.12.

¹⁵² Рвота: "Non-lethality..." [2]; Evancoe [18]; Kierman [16]; Morehouse [2]. Неуправляемые испражнения или понос: Rierman [16]; Toffler/Toffler [12], p.187; спазмы в кишечнике: "Non-lethality..." [2]; Morehouse [2].

¹⁵³ Высокие звуковые частоты: Allen et al. 1948 [90]; ультразвук: Parrack 1952 [91]; H.O. Parrack, "Effect of Air-borne Ultrasound on Humans", *International Audiology* 5 (1966): 294-307; W.I.Acton, M.B. Carson, "Auditory and Subjective Effects of Airborne Noise from Industrial Infra-sound Sources", *British Journal of Industrial Medicine* 24 (1967):297-304.

¹⁵⁴ Dickson/Chadwick [63].

¹⁵⁵ Parrack 1966 [153].

¹⁵⁶ Mohr et al. [58].

¹⁵⁷ Например, при воздействии на все тело морские свинки и обезьяны просыпаются: D.E. Parker, "Effects of Sound on the Vestibular System", ch.7 in Tempest [53].

¹⁵⁸ Gavreau et al. 1966 [54], p.9.

¹⁵⁹ Mohr et al. [58]. Обратите внимание, что в этой работе сообщается о боли яичка одного из подопытных (это другой потенциально беспокоящий эффект).

¹⁶⁰ Смотрите [157].

¹⁶¹ Раздел 5.3 в работе M.J. Griffin, *Handbook of Human Vibration* (London: Academic, 1990).

Третий эффект, для которого, похоже, нет надежных источников, касается резонансов на очень низких частотах, например, резонансов сердца, которые могут привести к смерти, что утверждалось (но без дальнейших ссылок на первоисточник) в старой книге¹⁶². В ссылках на экстремальное воздействие (при уровне 150 дБ) на частотах 50-100 Гц показано, что подопытные лица испытывали некоторые проблемы с грудной клеткой, но сердце не было упомянуто как источник беспокойства (это проверялось при помощи ЭКГ)¹⁶³. Точно так же не было указаний на внутренние кровотечения, которые, как утверждалось, вызываются звуками низкой частоты¹⁶⁴.

Поэтому похоже, что эти утверждения в большей степени основаны на слухах, нежели на научных фактах. Нельзя исключить, что при более высоких уровнях звука в конкретном диапазоне частот появятся рвота, неуправляемые испражнения или проблемы с сердцем, но подобные факты редки в лучшем случае, а получение таких уровней звука на определенном расстоянии весьма затруднительно в любом случае.

¹⁶² Lumsden [13], p.203.

¹⁶³ Mohr et al. [58].

¹⁶⁴ SARA [12]. С другой стороны, по вопросам желудочно-кишечного кровоизлияния, вызванного *колебаниями*, смотрите подраздел по колебаниям низкой частоты.