**Обсуждаем ядерный терроризм: начнем с физики**

А.Б.Колдобский, МИФИ, г. Москва

А еще лучше – с логики и здравого смысла. Находясь в дружбе с ними, трудно не согласиться с двумя очень важными для нашего обсуждения тезисами. Первый: прежде чем начинать обсуждение любой проблемы (тем более, как в нашем случае, многогранной, сложной и во многом не бесспорной), надо договориться по основным дефинициям, относящимся к предмету обсуждения. Вспомним Декарта: «Мы избегнем половины разногласий, если сойдемся в определениях». И второе: рассуждения о предмете, имеющем в первооснове (как опять-таки в данном случае) физико-техническую суть, должны вестись на некотором минимально-допустимом уровне компетентности по существу этого предмета и понимания естественнонаучной методологии.

При несоблюдении любого из этих принципов (а тем более обоих сразу) обсуждение превращается в говорильню, в спор ни о чем. И это еще полбеды, а настоящая беда начинается, когда этот «спор ни о чем» прорывается на страницы и экраны. Тогда, если речь идет об опасных вещах (а ядерный терроризм, стань он реальностью, – вещь, бесспорно, кошмарная), напуганное и дезориентированное общество часто начинает искать методы противодействия опасности на заведомо тупиковых путях. Лучшего подарка гипотетическим ядерным террористам, чем отвлечение общественного внимания, а как следствие – сил и средств от действительно эффективных способов борьбы против этого зла, не придумать.

Итак, начнем с определений. Будем понимать под ядерным терроризмом совокупность намерений и действий отдельных лиц либо групп лиц по созданию либо приобретению иным образом работоспособного ядерного взрывного устройства (ЯВУ) с последующим его применением или угрозой применения для достижения декларируемых ими политических, социальных и иных целей и намерений.

Из этого определения следует важнейшие следствие: государство при реализации этих целей выводится за скобки, оно, в самом благоприятном для террористов случае, их не замечает (или старается не замечать), а в худшем – преследует с большей или меньшей настойчивостью и последовательностью. Это имеет очевидные социальные и политические, а также немаловажные технические последствия.

Разумеется, вопрос о ядерном терроризме, когда государство само начинает играть роль террориста, также не лишен права на постановку. Однако при этом акценты сильно меняются, выводя на первое место не физико-технические проблемы, а политические, юридические, экономические и социальные аспекты дела. С проблемами, обсуждаемыми в настоящей статье, они, конечно, коррелируют, и все же вопрос о государственном ядерном терроризме является особым предметом, с очевидностью выходящим за пределы данной статьи. При этом, правда, возникает вопрос: насколько возможны (и вероятны) исключения из сформулированного выше принципа «недоброжелательной невовлеченности» государства в дела ядерных террористов? С точки зрения автора, да, возможны (хотя и маловероятны) и очень опасны. А реализоваться они могут в «молодых» (теперешних или ближайших будущих) членах «ядерного клуба», руководство которых в большей или меньшей мере поддерживает экстремистские политические либо религиозные течения, организации и движения.

Между прочим, такая поддержка опасна в первую очередь для этого руководства: «экипированные» с его помощью ядерные террористы вполне могут нанести первый удар именно по нему, с учетом характерных для таких режимов внутренней слабости и политической нестабильности. Но все это вопрос, скорее, для политолога, чем для физика.

Главное, без чего ЯВУ не создать, – расщепляющийся материал, вещество, в достаточно компактном объеме которого можно при определенных условиях вызвать взрывную цепную реакцию деления. Без расщепляющегося материала любые планы создания ЯВУ – лишь досужие разговоры. Периодически мелькающие в СМИ сведения о создании ЯВУ, не использующих реакцию ядерного деления, имеют неясные перспективы даже в отдаленном будущем, а сейчас это очевидные страшилки. Добавим к этому, что инициировать и взрывную термоядерную реакцию без делительного запала в наши дни никто еще не научился.

Таких расщепляющихся материалов в рамках нашего рассмотрения два: уран-235 и плутоний-239, оба – оружейной чистоты (> 90 % и > 94 % соответственно по основному материалу). Все, ничего больше. А из этого факта следует три важных следствия.

Первое: наработка минимально необходимых для создания хотя бы одного ЯВУ количеств расщепляющегося материала силами самих ядерных террористов (отдельных лиц или тайных организаций) с «нуля» или даже с использованием ранних промежуточных технологических продуктов – это фантастика, которую даже научной не назовешь. А сообщения об этом в СМИ в контексте реальной опасности или, возможно, даже свершившегося факта – заведомый бред, и интересен лишь его генезис, но не существо.

Второе: все сообщения о кражах и пропажах иных материалов, кроме указанных выше двух, не имеют ни малейшего отношения к проблеме ядерного терроризма. Разумеется, в похищении или утере естественного или слабообогащенного урана (топлива для энергетических реакторов в том числе), радиоизотопной продукции (радиостронция, радиоцезия, радиокобальта и др.) ничего хорошего нет, но обретение всего этого добра ни на миллиметр не приблизит ядерных террористов к созданию ЯВУ. К слову сказать, радиоактивность какого-либо вещества и его пригодность в качестве расщепляющегося материала – абсолютно разные вещи. Собственная (очень незначительная) радиоактивность плутония-239, и тем более урана-235 никак не связана с их использованием в качестве ядерной взрывчатки, но даже и она (в случае с плутонием-239 оружейной чистоты) доставляет немало хлопот (а отнюдь не помогает) конструкторам оружия.

Наконец, третье: ядерная энергетика как таковая за крайне незначительным исключением интереса для ядерных террористов не представляет. Из низкообогащенного (до 5 % урана-235) урана в свежем ядерном топливе создать ЯВУ принципиально невозможно, а из реакторного плутония, содержащегося в облученном топливе, в принципе возможно, но эта возможность имеет чисто умозрительный характер. Даже если не обсуждать практически непреодолимых для террористов физических и технических трудностей по выделению, очистке, металлургии и конструктивному оформлению плутония, при конструировании такого ЯВУ даже у профессионала-ядерщика возникают серьезнейшие проблемы. Тут и значительное содержание балластных материалов, и интенсивный нейтронный фон, и высокая собственная радиоактивность, и тепловыделение, и еще кое-что. В результате даже высококлассный профессионал не создаст из реакторного плутония ничего, кроме громоздкого, маломощного урода, к тому же очень сложного в эксплуатации. Для террориста такой урод неинтересен.

Впрочем, ограничивать обсуждение отношений атомной энергетики и ядерного терроризма лишь только сказанным выше нельзя – по той очевидной причине, что в физической основе производства энергии на АЭС и наработки оружейного плутония лежит одна и та же установка (ядерный реактор), а точнее – рождаемые в нем интенсивные нейтронные потоки. В этой связи уместно сделать несколько замечаний.

Прежде всего, особое внимание, в обсуждаемом контексте должно уделяться энергетическим ядерным реакторам с графитовым или тяжеловодным замедлителем, допускающим перегрузку топлива «на ходу», без снятия реактора с мощности (типа российского РМБК и канадского CANDU). Реакторы такого типа имеют две особенности, благоприятствующие (по крайней мере в принципе) наработке оружейного плутония. Во-первых, они используют в качестве топлива уран низкого обогащения (тяжеловодные CANDU – вообще естественный уран), а эффективность накопления плутония в облученном уране находится в сильной обратной зависимости от степени обогащения. Во-вторых, они открывают принципиальную возможность тайной реализации оптимального времени облучения урана для наработки оружейного плутония – около месяца, в то время как типичные для ядерной энергетики времена облучения (годы) сильно «портят» оружейный плутоний, превращая его в реакторный.

Впрочем, таких реакторов в мировой ядерной энергетике немного, по мощности – лишь несколько процентов. Ее основу составляют другие реакторы – корпусные легководные (типа российских ВВЭР). Перегрузить топливо «на ходу» у них нельзя, а высокое, в сравнении с тяжеловодными и графитовыми, обогащение топлива по урану-235 делает его малопригодным для наработки оружейного плутония. Но на них (как, впрочем, и на всех других ядерных реакторах) нельзя полностью исключить вероятность в высшей степени экзотической кражи – экзотической в том смысле, что ее предметом является не материальный объект (даже не оружейный плутоний), а поток реакторных нейтронов.

Представим себе, что какому-нибудь криминальному Кулибину удалось обеспечить возможность тайного облучения объектов в активной зоне любого реактора (например, установкой дополнительного канала или нештатным использованием каналов системы управления и защиты). Тогда часть нейтронов реактора можно пустить на «неправое дело» – облучение блочков из естественного урана в режиме, оптимальном для накопления и последующего выделения оружейного плутония.

Развитие событий по такому варианту не исключено для любого реактора в том смысле, что оно не запрещено законами физики и технически не выходит за рамки возможного. Впрочем, рецепты его предотвращения также хорошо известны – прежде всего постановка под международный контроль и инспекции МАГАТЭ. В первую очередь это должно касаться высокопоточных реакторов, поскольку в них существенно повышается как эффективность наработки плутония, так и его чистота по основному материалу (плутонию-239).

Другое дело, насколько вероятен начинающийся с таких событий сценарий обретения плутониевого ЯВУ ядерными террористами. По мнению автора, в высшей степени маловероятен. И не только потому, что «украсть нейтроны» – это, как говаривал некий современный персонаж, «не лобио кушать». И даже не потому, что мы выводим за скобки уже упомянутые ранее колоссальные трудности с выделением, очисткой, металлургией и конструктивной технологией плутония (даже непонятно, с какой стороны здесь подступиться группе частных лиц). Главные проблемы поджидают террористов дальше – на этапе конструирования и изготовления собственно ЯВУ. Об этом речь впереди.

Плутоний-239 – материал, в общем, чисто «бомбовый». Почти нигде, кроме ядерных боеприпасов, он не применяется, степень его вовлечения в мирные ядерные топливные циклы в настоящее время весьма ограничена. Соответственно и больших вопросов, где его искать, не возникает. Террористам, однако, от этого ничуть не легче – с учетом того, как организована охрана вожделенных складов, арсеналов и перевозок. В общем, здесь злодеям можно лишь посочувствовать.

Ситуация с ураном-235 оружейной чистоты несколько иная. С одной стороны, его, кроме как на специализированных промышленных комплексах, получить нельзя даже в принципе. Не помогут ни «кража нейтронов», ни другие ухищрения. Террористы могут отдыхать.

Однако в отличие от плутония ядерное оружие и связанная с ним инфраструктура – не единственное место, где можно встретить высокообогащенный уран-235. Он является также топливом для некоторых типов ядерных установок – исследовательских и транспортных реакторов (в первую очередь, реакторов АПЛ).

Отсюда возникает некоторая ситуационная альтернатива возможных действий ядерных террористов по захвату расщепляющихся материалов (и соответственно наиболее целесообразная совокупность мер по противодействию им). Однако наш анализ не может быть полным без рассмотрения ситуации, если террористы все же каким-либо способом (не будем пока дискутировать, насколько это реально) разживутся некоторым количеством материалов, достаточным для изготовления примитивного (но работоспособного!) ЯВУ.

Принцип действия ЯВУ в наши дни общеизвестен (кстати, именно это обстоятельство часто педалируется в качестве главного обоснования реальности угрозы ядерного терроризма). Но именно – принцип. Дьявол, как известно, сидит в деталях, и этих его убежищ в конструкциях реальных (а не книжно-абстрактных) ЯВУ сколько угодно.

В основе действия ЯВУ деления, как уже упоминалось, лежит понятие критической массы – определенной совокупности массы, плотности и конструктивного оформления расщепляющегося материала, при превышении некоторых нейтронно-физических параметров которой цепная реакция на вторичных нейтронах деления приобретает лавинообразный, взрывной характер. Такое состояние называется надкритическим, следствием его намеренного достижения в ЯВУ в необходимый момент и является ядерный взрыв.

Критическая масса может быть достигнута либо увеличением массы расщепляющегося материала при неизменной плотности, либо увеличением плотности при неизменной массе. Первый путь реализуется в зарядах пушечного (ствольного) типа. В них одна подкритическая масса направляется в другую такую же, как снаряд (отсюда и название), после чего состояние образовавшейся системы становится надкритическим. Так была устроена, например, бомба, сброшенная на Хиросиму.

Второй путь лежит в основе действия имплозионных зарядов. В них надкритичность достигается при взрыве заряда из химического вещества, особым образом размещенного вокруг подкритической сферы из расщепляющегося материала. Под действием ударной волны этого взрыва, направленной к центру системы (слово имплозия означает взрыв внутрь), расщепляющийся материал равномерно и очень быстро обжимается, что вызывает скачкообразное повышение его плотности и переход в надкритическое состояние с последующим ядерным взрывом. Имплозионный принцип был использован, например, в бомбе, сброшенной на Нагасаки, а также в первом советском ЯВУ, испытанном в 1949 г.

Для нашего рассмотрения очень существен тот факт, что для использования в пушечной схеме плутоний-239 штатной оружейной кондиции непригоден. Существенно меньшая в сравнении с имплозионной скорость формирования критической массы, свойственная этой схеме, приводит к тому, что из-за наличия в нем заметного количества плутония-240, испускающего нейтроны вследствие спонтанного деления, цепная реакция начинается чересчур рано. Поэтому силы гидродинамического разлета разрушают заряд еще до ее распространения по всему объему расщепляющегося материала, и вместо полноценного взрыва получается маломощный «хлопок».

С другой стороны, уран-235 почти не применяется в современном ядерном оружии – уж слишком очевидны преимущества плутониевых ЯВУ перед урановыми. Да и имплозионная схема сама по себе (кстати, она «всеядна» и допускает применение как урана, так и плутония) в сравнении с пушечной намного более совершенна. К числу главных ее достоинств принадлежит возможность существенно уменьшить количество расщепляющегося материала, ведь величина критической массы обратно пропорциональна квадрату его плотности. Например, для урана-235 обогащением 93,5 % критическая масса (без отражателя) равна 30 кг при нормальной (естественной) плотности, 7,5 кг – при удвоенной и 3,3 кг – при утроенной.

Здесь, между прочим, возникает любопытный вопрос, также являющийся сейчас предметом многочисленных спекуляций, и часто именно в контексте ядерного терроризма: а если сжимать дальше? Не открывается ли здесь возможность, хотя бы принципиальная, собрать ЯВУ на основе лишь нескольких граммов (а то и миллиграммов) плутония? Их-то террористу несравненно проще раздобыть, чем 6 – 8 кг плутония-239 для снаряжения «нормального» имплозионного ЯВУ. А ведь расчетное взрывное энерговыделение при полном делении всего 1 г плутония-239 эквивалентно (по порядку величины) 10 т тротила! Совсем неплохо… Увы!.. Первую «подножку» ставит химия. Элементарные расчеты показывают, что добиться таких степеней сжатия с помощью химических ВВ невозможно из энергетических соображений.

А нельзя ли как-нибудь иначе? Собственно и основополагающий принцип известен. Это – сжатие излучением. Именно на нем основано современное термоядерное (водородное) оружие. Но в термоядерных ЯВУ источником излучения является… делительное инициирующее устройство на основе плутония! Того самого, количество которого мы собрались уменьшать.

В принципе огромные степени и скорости сжатия достаточно малых масс вещества можно обеспечить излучением мощного лазера – причем, чем меньше масса, тем выше достигаемая степень сжатия. Однако тут «подножку» ставит уже нейтронная физика. Дело в том, что само по себе достижение надкритического состояния есть лишь создание условий для лавинообразного роста числа нейтронов, волной накрывающего все новые и новые ядра делящегося материала. Но что от этого толку, если таких ядер просто мало. Пусть вы – любитель крепко выпить, и однажды волею судьбы попали в идеальную ситуацию, когда вместо каждой выпитой маленькой рюмки вам немедленно приносят три новые (надкритичность достигнута). Однако, если водки в заведении мало и такая смена произойдет только один раз, ваше желание уйти домой «на бровях» не осуществится – четырех рюмок для этого маловато.

Аналогия довольно близкая с тем, что происходит в ЯВУ. Количество таких «смен» в нейтронной физике называется числом поколений нейтронов. Начало ядерного взрывного процесса (разлета вещества) в имплозионной бомбе соответствует его значению 40–45. А при малой массе расщепляющегося материала и очень высокой скорости его сжатия поколения не набираются вовсе, хотя надкритичность достигается.

По оценке чл.-кор. РАН Л.П.Феоктистова, для осуществления таким образом взрывной цепной реакции потребуется не менее 10 г плутония при мощности лазеров обжатия в десятки мегаджоулей. Таких лазеров в мире еще нет, а если бы и были? Террорист, вероятно, лишится дара речи от одной лишь мысли, что ему вместе с малогабаритным ЯВУ придется захватить «на дело» как минимум грузовик с лазерной аппаратурой плюс передвижную электростанцию приличной мощности.

Вернемся теперь к анализу возможных конструкций ЯВУ в контексте ядерного терроризма. Итак, у имплозионной схемы перед пушечной все преимущества, кроме одного, но в нашем случае, скорее всего, решающего: имплозионная схема несравненно сложнее в реализации. Надо точно определить состав, количество и размеры обжимающих линз из химического ВВ, надо гарантировать идеальную синхронизацию их подрыва, надо в строго определенный момент обеспечить включение инициирующего нейтронного источника… Стоит не выполнить хотя бы одно из этих условий (а есть и другие), как ЯВУ попросту не сработает.

Вот тут-то упомянутый выше дьявол показывает зубы из каждой мелочи. А ведь все это (наряду с конструктивно оформленным расщепляющимся материалом) надо еще достать, изготовить, смонтировать, проверить. Короче говоря, вероятность того, что террорист (или террористы) сумеет сконструировать, укомплектовать, собрать и проверить работоспособное имплозионное ЯВУ на основе плутония, по мнению автора, столь же невелика, как и того, что они сумеют накопить необходимое его количество, о чем говорилось выше.

А вот урановое ЯВУ пушечного типа по конструкции и технологии сборки гораздо проще. Тот же факт, что по эффективности использования расщепляющегося материала оно сильно уступит имплозионному плутониевому, вряд ли сильно взволнует террориста, ведь факт реального наличия работоспособного ЯВУ гораздо важнее, чем его тактико-технические характеристики. Но вот такое качество уранового пушечного ЯВУ, как компактность, наверняка заинтересует ядерных мерзавцев. А ведь известно, что в военно-ядерной технике уран-235 как раз и применяется в специальных конструкциях, где малогабаритность важнее большого расхода расщепляющегося материала и относительно низкого энерговыделения.

Несомненно, одним из главных препятствий на пути создания террористической группой такого ЯВУ является весьма значительное количество необходимого для этого урана-235. С учетом неизбежных технологических потерь потребуется не менее 40–45 кг в пересчете на чистый материал, а это очень много. Хотя, разумеется, и процедура проектирования и изготовления пушечного уранового ЯВУ также имеет много коварных «подводных камней». Но вот обсуждать их здесь (и вообще обсуждать открыто) автор, во-первых, не желает сам и, во-вторых, категорически против того, чтобы это делали другие. Надо отчетливо понимать, что секретность технологий создания ЯВУ и их конкретных конструкций является сейчас одним из главных препятствий, стоящих перед ядерными террористами. Никакие требования и призывы к рассекречиванию этих сведений не должны приниматься во внимание – слишком серьезными (если не сказать страшными) последствиями чреват такой «ядерный стриптиз». Да и специалистам, пишущим на «ядерные» темы, ни в коем случае нельзя переступать ту грань, за которой образовательный или информационный материал может превратиться в пособие для начинающих террористов.

Кстати, о специалистах. Вот еще одна проблема для ядерных террористов – не будут специалисты сотрудничать с ними. И не только потому, что фундаментальная внутренняя взаимосвязь между культурой, образованием и моралью, по существу, исключает для высококлассных профессионалов (а другие тут не нужны) возможность «поступления на службу» к кровожадным ядерным мерзавцам. Даже помимо сказанного, абсолютное большинство профессионалов прекрасно понимают, что сотрудничество с террористами рано или поздно будет иметь для любого из них одинаковый конец – на дне какого-нибудь болота с камнем на шее и девятью граммами свинца в умной, но недалекой голове. Неплохо зная среду российских атомщиков, автор берет на себя смелость утверждать: в ней террористам «нечего ловить». А ведь, кроме ядерщиков, нужны химики, электронщики, металлурги, материаловеды, конструкторы, технологи – и не просто россыпью, а в виде сплоченного коллектива со способным руководителем, безупречной организацией дела, работоспособной внутренней иерархией и др. И совсем не бесспорно, что этот коллектив долго будет лоялен к своим криминальным хозяевам.

Обо всем этом следует помнить, когда в газете или эфире появляется очередной жуткий рассказ о сборке ЯВУ в старом сарае по соседству с собачьей будкой двумя гениальными студентами под надзором бородатого лица кавказской национальности.

Такова физика ядерного терроризма (хотя, конечно, далеко не вся). Она в изложении автора не лишена некоторых субъективных оттенков в оценках и суждениях. Иначе, наверное, и быть не могло при анализе событий, которые никогда не происходили (очень хочется надеяться, что и не произойдут).

Автор позволит себе и еще более субъективное суждение, выходящее за пределы собственно физики. Именно: при оценке кампаний, заявлений и публикаций необходимо в первую очередь отсечь «политические уши», за которыми отчетливо просматриваются не желание бороться с ядерным терроризмом (он в данном случае играет роль заклинания), а весьма эгоистические политические и экономические интересы вполне конкретных лиц, организаций и кругов. Другими словами, если со ссылкой на опасность ядерного терроризма выдвигаются, например, требования поставить под международный контроль именно российский военно-ядерный комплекс, остановить строительство объектов атомной энергетики в России и за ее пределами силами именно российских организаций, задавить именно российский ядерный экспорт и т.п., то не надо быть излишне наивным. Ядерный терроризм тут не более чем сатана у старых богословов: никто его не видел, но очень страшно, а потому сопутствующие рекомендации лучше выполнить, не очень вникая в их смысл и суть.

Что тут сказать? Наблюдая, как явление с потенциально действительно высокой всеобщей опасностью начинает использоваться в качестве расхожей карты в своекорыстных политических играх, поневоле вспоминаешь слова великого американца: «Если мы будем бороться порознь, то, несомненно, будем висеть вместе».

По существу же, из того факта, что ни одного достоверного факта ядерного терроризма до сих пор не зафиксировано, следует важнейший вывод: барьер противодействия ему в настоящее время выше, чем возможности потенциальных террористов. Будь это не так, нелюди, готовые не только помахать самодельной ядерной дубинкой, но и, не колеблясь, опустить ее на головы миллионов людей, наверняка нашлись бы. Слишком уж сильно прогресс науки и техники в современном мире обогнал развитие морали и нравственности. А поэтому причин для нагнетания паники и истерии вокруг проблемы ядерного терроризма нет, кто бы и как бы ни пытался это делать. Кстати, паника и истерия – вообще наихудшие советчики, решения, продиктованные ими, никогда не бывают продуктивными.

Другое дело, что высота этого барьера ни в коем случае как минимум не должна снижаться. Конечно, во многом он обусловлен неумолимыми законами природы и объективными закономерностями развития науки, техники и общества, о чем и рассказывалось в этой статье. Однако значительная его часть построена многотрудными и благородными усилиями людей – ученых и инженеров, политиков и социологов, специалистов по системному анализу и сотрудников силовых и специальных служб.

Ослаблять эти усилия нельзя. В условиях, когда мы не можем сколько-нибудь точно оценить разницу между барьером противодействия ядерным террористам и их реальными возможностями, риск слишком велик.