

Принципы радиационной защиты, лежащие в основе правил перевозки МАГАТЭ, и опыт перевозок при нормальных и аварийных условиях

А. Н. Цзэ

ВВЕДЕНИЕ

Радиоактивные вещества широко используются в медицине, промышленности и при проведении исследований. В связи с таким использованием между предприятиями-изготовителями, перерабатывающими предприятиями, потребителями и предприятиями по удалению отходов осуществляются перевозки этих материалов. Так как радиоактивные вещества излучают радиацию, которая может причинить ущерб людям или окружающей среде, контроль за этими веществами должен производиться в течение всего цикла от изготовления до окончательного удаления, включая перевозку.

Ежегодно перевозятся миллионы упаковок радиоактивных веществ. Анализ, проведенный в 1975 году, показал, что в США перевозилось около 2,5 млн. упаковок в год [1]. Около одной трети упаковок содержало лишь очень небольшое количество радиоактивных веществ. Наиболее распространенными средствами транспортировки радиоактивных веществ в США были грузовые автомобили и пассажирские самолеты, причем последние использовались главным образом для перевозки короткоживущих радиофармацевтических препаратов. Федеративная Республика Германии сообщила о перевозке в 1975 году 150 000 упаковок [2]; в Италии в 1978 году одной из ведущих фирм, занимающихся использованием и перевозкой радиоизотопов, было перевезено 50 000 упаковок [3]; в Польше в 1978 году было перевезено около 100 000 упаковок с радиоактивными веществами [4].

ПРИНЦИПЫ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ, ЛЕЖАЩИЕ В ОСНОВЕ ПРАВИЛ ПЕРЕВОЗКИ

Принципы радиационной защиты, лежащие в основе правил перевозки МАГАТЭ, в основном были разработаны на базе рекомендаций Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ), которые применяются ко всем аспектам защиты от излучений. В Публикации № 9 МКРЗ [5] определено, что целями радиационной защиты является предотвращение острых радиационных поражений и ограничение опасности отдаленных последствий до приемлемого уровня. В ней рекомендованы пределы максимальных доз для населения и работников, которые подвергаются облучению в процессе своей работы. Так как любое облучение может быть связано с определенной степенью риска, МКРЗ также реко-

Г-н Цзэ работает в отделе перевозок и стандартов на продукцию Комиссии по регулированию ядерной деятельности США, Вашингтон, округ Колумбия, США.

мендовала *избегать любого не вызванного необходимостью облучения* и поддерживать все дозы на таком низком уровне, который можно разумно достигнуть с учетом экономических и социальных факторов. Правила перевозки МАГАТЭ призваны обеспечить адекватную защиту и безопасность населения и работников транспорта, занимающихся перевозками радиоактивных веществ.

Радиационный риск при перевозке радиоактивных веществ может быть разделен на две категории: риск, связанный с нормальными условиями перевозки, и риск, возникающий в результате аварий. Во время нормальной перевозки излучение, исходящее от упаковок с радиоактивными веществами, приводит к облучению работников транспорта, которые производят погрузочно-разгрузочные работы или перевозят эти упаковки. В результате внешнего излучения облучается также население, которое находится вблизи этих упаковок. Основными мерами по защите являются: 1) снижение уровня радиации на поверхности упаковок или вблизи них путем использования экранирующих материалов; 2) регламентирование минимального расстояния между упаковками и участками, где находятся люди; 3) сведение по мере возможности к минимуму времени облучения.

В случае аварий при перевозке упаковок с радиоактивными веществами целостность этих упаковок может быть нарушена и выход содержимого наружу может привести к облучению находящихся вблизи людей в результате прямого воздействия радиации или в результате вдыхания или поступления с пищей радиоактивных веществ. Основными мерами по защите являются: 1) заключение веществ в прочные упаковки, так чтобы радиоактивное содержимое не могло выйти из них или оказаться неэкранированным даже при аварийных условиях; 2) ограничение количества содержимого упаковки; 3) использование процедур обеспечения качества для сведения к минимуму вероятности высвобождения содержимого или создания чрезмерных уровней внешней радиации в результате ошибки человека.

Те количества радиоактивных веществ, которые обладают большим потенциалом опасности, должны перевозиться в упаковках, способных выдержать аварию. Однако количества веществ с низким потенциалом опасности могут перевозиться в упаковках, спроектированных с учетом только условий нормальной перевозки. При определении потенциала опасности учитываются следующие факторы: радиоизотопы, которые будут перевозиться, их физическое и химическое состояние и количество радиоактивности в упаковке.

В дополнение к защите, обеспечиваемой упаковочным комплектом, от грузоотправителей и перевозчиков требуется применение процедур контроля, таких, как соблюдение установленного минимального удаления, с тем чтобы ограничить облучение работников транспорта и населения до приемлемого уровня. В целях предотвращения критичности должны учитываться конструкция упаковочного комплекта, требования ограничения количества содержимого, а при необходимости – процедуры контроля для ограничения числа упаковок делящихся веществ в партии груза.

ДАННЫЕ ОБ ОБЛУЧЕНИИ РАБОТНИКОВ ТРАНСПОРТА И НАСЕЛЕНИЯ ПРИ НОРМАЛЬНОЙ ПЕРЕВОЗКЕ

Большинство упаковок с веществами, излучающими проникающую радиацию, снабжено соответствующей защитой, так что уровни радиации вне упаковок очень малы. Однако часто оказывается непрактичным устанавливать требования о такой защите упаковок, чтобы уровни внешнего излучения были незна-

Таблица 1. Население: оценка годовых доз в результате перевозки радиоактивных веществ в США [6] (при нормальных условиях перевозки)

| Вид транспорта и подгруппа населения | | Годовая индивидуальная доза (мбэр) | Годовая коллективная доза в 1975 г. (чел. -бэр) |
|--------------------------------------|---------------------|------------------------------------|---|
| Воздушный: | пассажиры | 0,34 (сред.) * | 2330 |
| | | 108 (макс.) ** | |
| Автомобильный: | на магистрали | 1,9 (макс.) | 172 |
| | вне магистрали | 0,009 (макс.) | 348 |
| | во время стоянки | 1,3 (макс.) | 1000 |
| Железнодорожный: | на магистрали | не оценена | 0,012 |
| | вне магистрали | 0,017 (макс.) | 23 |
| Водный: | люди в районе порта | не оценена | 0,9 |
| | люди вблизи места | | |
| | складирования | не оценена | 0,4 |

* средняя
** максимальная

чительными. Следовательно, лица из числа населения или работники транспорта, которые подходят близко к этим упаковкам, могут получить определенную небольшую дозу облучения. Данные об облучении при нормальных условиях перевозки приведены ниже.

Население (без учета работников транспорта)

При перевозках радиоактивных веществ могут быть облучены определенные подгруппы населения: пассажиры пассажирского самолета, перевозящего партии радиофармацевтических препаратов; люди в наземных транспортных средствах, следующих по той же транспортной магистрали, что и груз (люди, находящиеся на магистрали); и люди, находящиеся вблизи транспортной магистрали (вне магистрали).

Уровень облучения населения, как ожидается, будет очень низким. В табл. 1 приводятся годовые эквивалентные дозы, оцененные для различных подгрупп населения, на основе исследования по оценке риска, проведенного в США [6]. Максимальная годовая доза 108 миллибэр (мбэр) для пассажиров самолетов была получена при консервативном предположении, что пассажир летает по 500 ч в год между двумя аэропортами США, в которых осуществляются самые напряженные перевозки радиоактивных веществ. На практике, однако, чрезвычайно мало вероятно, чтобы пассажир мог получить такую дозу. Для сравнения укажем, что средняя доза облучения отдельных лиц в США от природных источников фоновой радиации составляет около 100 мбэр в год, а годовая коллективная доза от природного фона в США составляет около 20 000 000 чел. бэр.

Таблица 2. Работники транспорта: оценка годовых доз в результате перевозки радиоактивных веществ (при нормальных условиях перевозки)

| Район | Вид транспорта и подгруппа населения | | Годовая индивидуальная доза (мбэр) | Годовая коллективная доза (чел.-бэр) |
|---|--------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| США [6] (полное число перевезенных в 1975 г. упаковок: около 2,5 млн.) | Воздушный: | пилоты | 0,53 (сред.) * | 16 |
| | | | 2,5 (макс.) ** | |
| | | другой летноподъемный состав | 6 (сред.), 13 (макс.) | 112 |
| | Автомобильный: | наземная команда | 85 (макс.) | 11 |
| | | экипаж хранения | 870 (макс.) 500 (макс.) | 2580 261 |
| | Железнодорожный: | экипаж хранения | 1,2 (макс.) 25 (макс.) | 0,9 0,7 |
| | | Водный: | экипаж портовые грузчики | 3,7 (макс.) не оценена |
| Франция [7] | | | | |
| Сакле | Автомобильный: | экипаж | | |
| | | 1976 г. (7 человек) | 25 (сред.) | 0,17 |
| | | 1977 г. (8 человек) | 22 (сред.) | 0,18 |
| | 1978 г. (8 человек) | 42 (сред.) | 0,34 | |
| Кадараш | Автомобильный: | экипаж | | |
| | | 1976 г. (21 человек) | 166 (сред.) | 3,48 |
| | | 1977 г. (33 человека) | 62 (сред.) | 2,06 |
| | 1978 г. (32 человека) | 254 (сред.) | 8,14 | |

* средняя

** максимальная

Работники транспорта

Доза облучения работника транспорта зависит от числа обработанных упаковок и уровня внешнего излучения вблизи от этих упаковок. Большинство работников транспорта, связанных с перевозками радиоактивных веществ, как ожидается, получают годовую дозу намного меньшую, чем предел дозы для отдельных лиц из числа населения, рекомендованный МКРЗ. Однако в некоторых случаях, когда на одном участке обрабатывается большое количество упаковок, определенные работники транспорта могут получить годовые дозы, превышающие пределы для населения. Таким работникам транспорта надлежит работать в рамках программы радиационной защиты, предусматривающей соответствующий инструктаж, обучение и дозиметрический контроль.

В США и других странах были проведены исследования для определения доз, полученных различными группами работников транспорта. Некоторые результаты этих исследований сведены в табл.2. Италия сообщила, что средняя годовая эквивалентная доза, полученная в 1978 году водителями, осуществлявшими автомобильные перевозки, составила около 160 мбэр, а максимальная — около 1300 мбэр [3]. Польша сообщила, что в 1978 году дозы пяти водителей, подвергнутых дозиметрическому контролю, находились в диапазоне от 50 до 530 миллирентген (мР) при среднегодовой дозе 270 мР [4].

СТАТИСТИКА ТРАНСПОРТНЫХ АВАРИЙ

За прошедшие 30 лет различными видами транспорта были перевезены миллионы упаковок радиоактивных и делящихся веществ различного типа, включая реакторные отходы и облученное топливо. Очень небольшое число этих упаковок попало в аварии и еще меньшее число явилось источником какого бы то ни было выделения радиоактивного содержимого и увеличения уровней радиации вне упаковок.

За пятилетний период (с 1971 по 1975 год), по сообщениям Управления перевозок США [8], произошли 144 аварии, связанные с перевозкой радиоактивных веществ. В 36 случаях имелись определенные свидетельства утечки содержимого или увеличения уровней радиации. Большинство утечек дало незначительное загрязнение и произошло из упаковок, содержащих малоактивные радиоактивные вещества.

В Соединенном Королевстве Радиохимический центр в Амершеме сообщил, что при отгрузке свыше 200 000 упаковок в год только одна упаковка попала в серьезную авиационную катастрофу [9]. Самолет загорелся и наружная картонная коробка упаковки была разрушена, но утечки радиоактивности не произошло. Каждый месяц в среднем происходило повреждение примерно одной упаковки из числа отправляемых из Амершема вследствие плохого обращения в аэропорту — обычно упаковки раздавливались транспортным средством при механизированной погрузке. Лишь в одном случае произошла утечка радиоактивного вещества и произошло значительное распространение загрязнения.

В Польше данные об авариях в период с 1971 по 1975 год свидетельствуют о восьми транспортных авариях, связанных с перевозкой радиоактивных веществ [10]. Ни одна из аварий не имела серьезных последствий с радиологической точки зрения. Только в двух случаях имело место загрязнение небольших площадей вокруг транспортных средств и в одном случае была загрязнена грузовая площадка внутри транспортного средства.

Индия сообщила, что из более 70 000 упаковок с радиоактивными веществами, отправленных из Тромбея, только четыре упаковки попали в аварию [11]. Три были раздавлены транспортными средствами в аэропорту во время перегрузки. Хотя снаружи упаковки и жестяные контейнеры были деформированы, содержащие вещества емкости остались целыми, и на поверхности поврежденных упаковок не было обнаружено загрязнения. Четвертый случай произошел с гамма-излучателем. Упаковка во время аварии упала с грузовика в ручей глубиной 15 футов. При этом не произошло увеличение уровня излучения на внешней поверхности защитного контейнера и не были повреждены внутренние механические части.

Недавно произошло несколько аварий. Три аварии, две из которых имели место в США и одна — в Канаде, вкратце обсуждаются ниже. В сентябре 1977 года тракторный прицеп, груженный 40 000 фунтов концентрата природного урана (желтый брикет), находящегося в 55-галлонных стальных барабанах, перевернулся после столкновения с тремя лошадьми в сельскохозяйственном районе штата Колорадо [12]. Тридцать два барабана из пятидесяти вывалились через борт прицепа вблизи его передней части, и в общей сложности около 12 000 фунтов концентрата высыпалось из барабанов. Для предотвращения рассеивания вещества ветром грузовик и место, где был просыпан концентрат, были вначале накрыты тяжелыми листами пластика. Операция по очистке была выполнена

за 10 дней. Измерялись дозы излучения, получаемые работающим персоналом, и концентрации в воздухе вблизи места проведения работ по очистке. Результаты показали, что поступление урана в организм людей из числа населения и персонала, занятого на работах по очистке, было намного меньше уровня, способного вызвать неблагоприятные последствия для здоровья.

В поезде, который сошел с рельсов 21 марта 1977 года вблизи Рокингхэма, штат Северная Каролина [13], находились четыре стальных цилиндра (вмещающих 8500 кг урана каждый), с природным гексафторидом урана. Цилиндры были установлены на стальных рамах-люльках, которые были прочно прикреплены к прицепам, установленным, в свою очередь, стандартным образом на железнодорожных платформах. Все четыре прицепа и цилиндры были повреждены во время аварии. Три цилиндра вывалились и лежали отдельно от обломков поезда. Четвертый цилиндр остался в обломках и подвергся воздействию огня в результате воспламенения цистерны с нитратом аммония. Утечки, разрушения контейнеров и радиоактивного загрязнения не произошло. Стальные контейнеры были помяты, но не пробиты.

В декабре 1976 года в Латерьере, провинция Квебек, грузовой автомобиль, грузивший 40 000 литров бензина, столкнулся с неподвижным грузовиком, перевозившим измеритель плотности с радиоактивным источником — цезием-137 [14]. Начался пожар, который продолжался около 90 мин. Свинцовая защита измерителя была полностью разрушена — свинец, по-видимому, вытек через отверстие в результате расплавления во время пожара; это привело к образованию максимального поля излучения в 3 бэр в час на поверхности. Радиоактивного загрязнения не произошло.

Утечка радиоактивного вещества или увеличение уровней внешнего излучения во время транспортировки может произойти в результате ошибки человека или неудовлетворительной процедуры контроля качества. Два таких случая, происшедшие в США, описаны ниже. В декабре 1971 года пассажирский самолет подвергся загрязнению в результате утечки из упаковки молибдена-99; прежде чем загрязнение было обнаружено, на борту самолета побывало 917 пассажиров [15]. Самолет был снят с эксплуатации и впоследствии дезактивирован. Пассажиры, которые летали на загрязненном самолете, были извещены по телефону и через прессу. В десяти городах, в которых приземлялся самолет, были установлены исследовательские контрольные станции. Результаты исследований показали, что ни пассажиры, ни служащие не пострадали с точки зрения ущерба для их здоровья. Было выявлено небольшое загрязнение большого количества багажа. Багаж был дезактивирован и возвращен владельцам.

В апреле 1974 года сменный гамма-источник, содержащий иридий-192, перевозился пассажирским самолетом из Вашингтона, округ Колумбия, в Атланту, штат Джорджия, а затем был перегружен на другой самолет, совершавший рейс в Луизиану [16]. В месте назначения было обнаружено, что упаковка не была достаточно защищена, что привело к высоким уровням внешнего излучения. Оценки наиболее неблагоприятных вариантов, выполненные на основе изучения картины передвижения во времени, показали, что работники транспорта могли получить дозу излучения от минимальной до примерно 134 рентген (R) на одного человека. Были проведены измерения с целью получения модели наихудшего случая облучения пассажиров во время происшествия. Результат показал, что максимальная мощность дозы на уровне пассажирских мест составила около 4,6 R/ч.

ОЦЕНКА РИСКА

Оценка риска транспортировки радиоактивных веществ выполняется с целью определения возможных последствий такой транспортировки для людей и окружающей среды, а также с целью прогнозирования последствий от будущих перевозок. Эти последствия могут включать в себя облучение при нормальных условиях перевозки и при авариях. Основное внимание уделяется радиологическому воздействию на здоровье, но учитываются все виды воздействия на окружающую среду, как радиологические, так и нерадиологические. Результаты оценки могут дать информацию об адекватности действующего регулирующего контроля. Эта методология также может использоваться при анализе затрат и результатов альтернативных вариантов.

В различных странах было проведено большое количество оценок риска, связанного с транспортировкой радиоактивных веществ. Ниже кратко рассматриваются в целях иллюстрации две оценки риска, выполненные в США, причем одна из них завершена, а другая еще не закончена. Одна оценка касается общего воздействия на окружающую среду транспортировки радиоактивных веществ; при ввозе в США, при перевозке в пределах территории США и при вывозе из США [6]. Величины радиологических и иных видов воздействия были определены на основе данных о перевозках, собранных в ходе обследования, проведенного в США в 1975 году. Данные обследования были экстраполированы до 1985 года и была определена предполагаемая доза облучения работников транспорта и населения. Риск от аварий при транспортировке был оценен на основе вероятностей аварий и постулированного облучения для каждой из восьми категорий тяжести аварий. Были рассмотрены альтернативные условия перевозки и оценены изменения риска.

Результаты оценки показали, что радиологический риск от радиоактивных веществ мал. Последствия больших утечек плутония или полония в районах с большой плотностью населения могли бы быть значительными, однако вероятность такого события чрезвычайно мала. Некоторые индивидуальные и коллективные дозы, полученные в результате оценки, представлены в табл. 1 и 2.

В продолжение упомянутой выше общей оценки второе исследование было предпринято в США для получения информации о транспортировке радиоактивных веществ в городских районах. Рабочий вариант оценки был опубликован в 1978 году [17]. В исследовании городских перевозок учитываются особенности городских условий, такие, как высокая плотность населения и ее суточные колебания, защитное действие зданий, местные метеорологические и микрометеорологические эффекты, пересечения транспортных потоков. При разработке модели используются городские условия Нью-Йорка, однако применяемая методология пригодна и для других городов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт, накопленный за последние 30 лет, показывает, что при перевозке радиоактивных веществ обеспечивается высокий уровень безопасности. При нормальных условиях перевозки индивидуальные дозы, как было показано, не выходят за пределы доз, рекомендованных МКРЗ. Статистика аварий показывает, что, хотя аварии случались, возникающие в результате их радиологические последствия не были серьезными. Из этого следует вывод, что правила перевозки являются в основном адекватными и эффективными.

Однако, с тем чтобы учесть опыт эксплуатации, технические достижения и продолжающийся рост числа перевозок радиоактивных веществ, правила перевозки и их эффективность время от времени анализируются. МАГАТЭ планирует проводить всесторонний пересмотр своих правил перевозки каждые 10 лет. Следующий пересмотр планируется на 1983 год, работа уже начата. Целью такого пересмотра является обеспечение того, чтобы правила с технической точки зрения отвечали современным требованиям и ограничивали дозы облучения всех облучаемых индивидуумов до такого низкого уровня, который можно разумно достигнуть, а также позволяли избегать любого не являющегося необходимым облучения и обеспечивали дальнейшее уменьшение и без того малого риска аварий с учетом эффективности затрат.

Библиография

- [1] US Nuclear Regulatory Commission, "Transport of Radioactive Material in the US," NUREG-0073, Washington, D.C. (May 1976).
- [2] Hartwig, S. et al., "Weak-Point Analysis and Risk Assessment in the Transportation of Radioactive Materials in Germany" (Proc. of the 5th Int. Symp. on Packaging and Transportation of Radioactive Materials, Las Vegas, 1978), II, pp. 968–975, Sandia Laboratories, Albuquerque, New Mexico (1978).
- [3] Swindell, G.E., "Synopsis of Some Transport Studies in Member States," AG-225 Paper 2, pp. 8–11, IAEA, Vienna (May 1979).
- [4] Musialowicz, T., "Personal Monitoring of Transport Workers in Poland," AG-225, Paper 17, IAEA, Vienna (July 1979).
- [5] Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication No. 9, Pergamon Press, Oxford (1966).
- [6] U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Final Environmental Statement on the Transportation of Radioactive Material by Air and Other Modes," NUREG-0170, Vol.1, Washington, D.C. (December 1977).
- [7] Hamard, J., "Radiation Doses Received by One Category of Transport Personnel in C.E.A." AG-225, Paper 18, IAEA, Vienna (July 1979).
- [8] Grella, A.W., "A Review of Five Years (1971–1975) Accident Experience in the USA Involving Nuclear Transportation" (Proc. of Sem. on Transport Packaging for Radioactive Materials, Vienna, 1976), pp. 225–240, IAEA-SR-10/5, Vienna (1976).
- [9] Taylor, C.B.G., "Packaging and Transport of Radioisotopes" (Proc. of Sem. on Transport Packaging for Radioactive Materials, Vienna, 1976), pp. 71–89, IAEA-SR-10/45, Vienna (1976).
- [10] Dyz, S., et al., "Transport Experience with Type A and Type B Packages in Poland" (Proc. of Sem. on Transport Packaging for Radioactive Materials, Vienna, 1976), pp. 241–248, IAEA-SR-10/40, Vienna (1976).
- [11] Deshpande, R.G., et al., "Design and Construction of Packages for the Transportation of Radioisotopes," (Proc. of Sem. on Transport Packaging for Radioactive Materials, Vienna, 1976), pp. 91–102, IAEA-SR-10/38, Vienna (1976).
- [12] Hornsby, R.T., et al., "A Highway Accident Which Involved a Spill of Natural Uranium Oxide Concentrate" (Proc. of the 5th Int. Symp. on Packaging and Transportation of Radioactive Materials, Las Vegas, 1978), II, pp. 623–630, Sandia Laboratories, Albuquerque, New Mexico (1978).
- [13] Teer, B.R., "Uranium Hexafluoride Cylinders Survive Train Derailment," (Proc. of the 5th Int. Symp. on Packaging and Transportation of Radioactive Materials, Las Vegas, 1978), II, pp. 612–614, Sandia Laboratories, Albuquerque, New Mexico (1978).
- [14] McLellan, J.J., et al., "Damage and Thermal Exposure of a Radioactive Material Package in an Accident and Gasoline Fire," (Proc. of the 5th Int. Symp. on Packaging and Transportation of Radioactive Materials, Las Vegas, 1978), II, pp. 615–622, Sandia Laboratories, Albuquerque, New Mexico (1978).
- [15] National Transportation Safety Board, "Special Study of the Carriage of Radioactive Materials by Air," NTSB-AAS-72-4, Washington, D.C. (April 1972).
- [16] Louisiana Division of Radiation Control, "Report of Shipping Incident Involving Gamma Industries Model C-10 Source Exchanger Sent From Value Engineering to Gamma Industries Via Delta Air Lines and Quick Delivery Service, April 5–8, 1974," Baton Rouge, Louisiana (June 1974).
- [17] DuCharme, A.R., "Transport of Radionuclides in Urban Environs: Working Draft Assessment," SAND 77-1927, Sandia Laboratories, Albuquerque, New Mexico (May 1978).