

Профессиональная радиационная безопасность на урановых шахтах и заводах

Дж.У. Ахмед*

Уранодобывающая и уранообработывающая отрасли промышленности развиваются быстрыми темпами во многих странах, и эта тенденция, вероятно, будет сохраняться с увеличением спроса на ядерное топливо. Проблемы радиационной опасности, с которыми приходится сталкиваться в этом звене ядерного топливного цикла, стали привлекать к себе серьезное внимание в течение прошлых лет ввиду появления эпидемиологических данных о раке легких среди рабочих урановых шахт, главным образом курильщиков. Эти опасности присущи не только урановым шахтам: исследования показали, что аналогичные радиологические составляющие, которые привели к появлению рака легких у рабочих урановых шахт, т. е. радон и продукты его распада, обнаруживаются и в шахтах других типов; и в некоторых случаях концентрация этих составляющих достаточна для того, чтобы вызывать профессиональные заболевания.

В урановых шахтах радиационная опасность связана главным образом с наличием взвешенных в воздухе радионуклидов, которые состоят из радона и его короткоживущих дочерних продуктов — полония-218, свинца-214, висмута-214 и полония-214. Радон (радон-222) представляет собой инертный газ; следовательно, он свободно проходит в легкие и выходит из них при минимальном поглощении дыхательной системой. С другой стороны, дочерние продукты радона представляют собой твердые частицы, которые могут связываться с частицами пыли в воздухе. При вдыхании этих частиц дочерние продукты радона отлагаются преимущественно в тракте дыхательной системы, при этом место отложения зависит от размера частиц. Величина дозы излучения, которую получает дыхательная система, зависит от концентрации дочерних продуктов радона во вдыхаемом воздухе, размеров частиц пыли, с которой они поступают, и физиологических параметров.

Одиночные атомы, известные как несвязанные дочерние продукты радона, предположительно отлагаются преимущественно в верхних проходах дыхательного тракта, т. е. там, где развивается рак легких у большинства шахтеров. Доля несвязанных дочерних продуктов радона мала: исследования показали, что она может быть в диапазоне от 0,002 до 0,12; в более чем половине случаев эта величина составляет менее 0,03.

В состав взвешенных в воздухе шахты радиоактивных частиц входят также долгоживущие радионуклиды из семей изотопов уран-238 и уран-235. С точки зрения внутреннего радиоактивного заражения значение представляют изотопы уран-238, уран-234, торий-230, радий-226 и полоний-210. При производстве таких операций, как бурение и взрывы, образуется взвешенная в воздухе пыль, содержащая эти долгоживущие нуклиды, концентрация которых в большинстве руд близка к равновесной.

Опасность внешнего облучения в урановых шахтах обусловлена бета-и гамма-излучением, исходящим от рудных тел. Уровни внешнего излучения во многих шахтах обычно невелики и не вызывают серьезных проблем. В шахтах с относительно высоким качеством руды дозы внешнего облучения создают значительную опасность.

На ураноперерабатывающих заводах радон и его дочерние продукты обычно представляют лишь незначительную опасность при ингаляционном поступлении по сравнению с опасностями, которые создают рудная и урановая пыль; вместе с тем вблизи бункеров для хранения руды и машин для дробления и измельчения могут создаваться значительные концентрации радона. Типичными операциями, в которых образуется большое количество пыли, являются дробление и измельчение руды, а также подготовка конечного продукта. Концентрация долгоживущих радионуклидов на первоначальных стадиях — дроблении и грохочении — имеет тенденцию сохраняться равновесной, однако при последующих операциях это равновесие нарушается. На стадиях осаждения и извлечения используемые растворы и твердые вещества имеют богатое содержание урана, поэтому взвешенная в воздухе радиоактивность определяется преимущественно наличием урана. В технологических операциях по обработке хвостов взвешенными в воздухе радионуклидами преимущественно являются торий-230, радий-226 и полоний.

Облучение рабочих на урановых обогатительных фабриках в связи с воздействием внешней бета- и гамма-радиации обычно сравнимо с уровнем облучения рабочих урановых шахт, однако в некоторых случаях уровень этого облучения может быть значительно более высоким. Уровни внешнего излучения могут быть различными на разных фабриках в зависимости от качества руды, типа и степени концентрации руды в продукте технологии обработки, однако в общем случае опасности внешнего облучения приобретают значимость главным образом на конечных этапах технологического процесса:

* Сотрудник секции радиационной безопасности, Отдел ядерной безопасности МАГАТЭ.



Работы внутри подземной урановой шахты в департаменте Вандея, Франция.

осаждение, фильтрация, упаковка и хранение концентрата. Только что выделенный уран представляет собой главным образом альфа-излучатель, однако по мере образования дочерних продуктов возрастает уровень как бета- так и гамма-радиации. Примерно через 24 дня достигается 50%-ный уровень равновесной бета-гамма-активности. Таким образом, в месте хранения продукта уровни радиации будут увеличиваться со временем хранения продукции.

Поверхностное загрязнение, если в целях борьбы с ним не применяются соответствующие меры по ограждению и регулярная уборка помещений, может способствовать росту аэрозольной активности в результате повторного поднятия частиц в воздух. Это загрязнение представляет собой серьезную проблему главным образом на тех участках технологического процесса, где приходится работать с концентратами, например, в цехах, где производится осаждение, фильтрация, взвешивание и упаковка продукции. Цеха, в которых производится обработка хвостов, также подвержены значительному поверхностному загрязнению.

Радиоактивные отходы — как жидкие, так и твердые — могут представлять собой другой источник радиационной опасности для рабочих урановых шахт и обогатительных предприятий. Особые меры предосторожности, предпринимаемые при работе с радиоактивными отходами, образующимися при

добыче и обработке руд, являются темой следующей статьи данного выпуска "Бюллетеня МАГАТЭ".

Пределы доз

При добыче и обработке урановых руд контроль доз облучения рабочих дочерними продуктами радона представляет чрезвычайную важность. Основой для определения предела дозы, получаемой от дочерних продуктов радона, является предел, устанавливаемый для эффективной эквивалентной дозы 50 мЗв (5 бэр) в год. Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) рекомендует предел ALI для поступления дочерних продуктов радона-222 ингаляционным путем. Этот предел МКРЗ выражается через потенциальную энергию, которую отдают вдыхаемые радиоактивные элементы, и равен 0,2 Дж в год. Соответствующая приведенная концентрация радоновых дочерних продуктов в воздухе, выраженная в практических единицах, которые широко применяются, тогда будет равна 0,4 рабочего уровня (РУ). Рабочий уровень представляет собой сумму энергий альфа-частиц, высвобождающихся в результате распада дочерних продуктов радона, которые находятся в равновесии с 3,7 Бк (100 пКи) радона. Это дает величину $1,3 \times 10^5$ МэВ/л. Таким образом, один рабочий уровень представляет любую комбинацию короткоживущих дочерних продуктов радона в одном литре воздуха, которая приведет к конечному излучению

$1,3 \times 10^5$ МэВ энергии альфа-частиц без учета радона. Если рабочий подвергается воздействию концентрации дочерних продуктов радона, равной одному 1 РУ в течение одного месяца работы, то доза может быть выражена как 1 рабочий уровень-месяц (РУМ). Годовой предел, выраженный в единицах РУМ, равен $0,4 \times 12 = 4,8$, т.е. 5 РУМ.

Система ограничения доз, рекомендуемая МКРЗ, требует учета доз облучения, получаемых от внешнего излучения и поступления радиоактивных веществ. В случае с урановыми шахтами этот дополнительный учет требует поддержания поступления радона и его дочерних продуктов через дыхательный тракт на уровне, который ниже рекомендованного предела на величину, зависящую от дозы, получаемой от внешнего излучения и воздействия рудной пыли. Общая формула имеет следующий вид:

$$\frac{H_E}{50 \text{ мЗв}} + \frac{E_{RnD}}{0,02 \text{ Дж}} + \frac{E_{OD}}{1,3 \text{ Бк} \cdot \text{ч} \cdot \text{л}^{-1}} < 1,$$

- где H_E — доза от внешнего излучения, выраженная в эффективной эквивалентной дозе (мЗв);
 E_{RnD} — доза от дочерних продуктов радона в джоулях;
 E_{OD} — доза от рудной пыли (исключая дочерние продукты радона), бекерель-час на литр.

Знаменатели представляют собой соответствующие годовые пределы. Годовой предел поступления ингаляционным путем вдыхаемой рудной пыли равен 1,3 бекерель-часа на литр ($\text{Бк} \cdot \text{ч} \cdot \text{л}^{-1}$).

В практических целях в дополнение к первоначальным пределам эквивалентной дозы часто устанавливаются другие пределы. Разрешенные пределы устанавливаются компетентным органом или дирекцией и обычно ниже уровня первоначальных или производных пределов. В том случае, когда разрешенные пределы устанавливаются дирекцией, они обозначаются как рабочие пределы. Для любой из величин, определенных в ходе осуществления программ радиационной защиты, независимо от того, имеются ли установленные пределы для этих величин или нет, компетентный орган может устанавливать контрольные уровни. Контрольный уровень не является пределом, однако он является полезным параметром при определении мер в случае, когда значение величины превышает контрольный уровень или предполагается, что оно может превысить его. Наиболее общераспространенными формами контрольных уровней являются: уровень регистрации, уровень исследования и уровень вмешательства. Уровень регистрации представляет собой эквивалентную дозу или уровень поступления, при превышении которого результаты контроля представляются достаточно интересными для регистрации. Уровень исследования представляет собой результат контроля, показывающий потенциальную эквивалентную дозу или предел поступления, при превышении которых результат считается достаточно важным и оправдывающим проведение последующего исследования.

Уровень вмешательства — это заранее установленный уровень, при превышении которого должны приниматься меры к снижению уровня излучения или эвакуации персонала из зоны облучения с таким уровнем до тех пор, пока не будут предприняты корректирующие действия, способные снизить уровень до приемлемой величины.

Контроль

Основными целями контроля являются оценка профессиональных доз облучения по сравнению с действующими стандартами, а также получение данных для принятия соответствующих мер к снижению уровня излучения. В связи с последним назначением контроль может служить выполнению следующих задач: обнаружение и оценка основных источников излучения; оценка эффективности дозоограничительных устройств; обнаружение отклонений от нормы при эксплуатации; прогноз в отношении воздействия будущих операций на уровни загрязнения.

Относительное значение, придаваемое различным типам контроля, зависит от степени и вида опасности. В урановых шахтах основную опасность создают дочерние продукты радона, поэтому необходим непрерывный контроль. Следующими по значимости видами опасности являются внешняя радиация и рудная пыль. На обогатительных фабриках уровень опасности зависит от конкретной фазы процесса. В зонах, где производится хранение, дробление и классифицирование руды, рудная пыль представляет собой доминирующий источник излучения, дочерние продукты радона встречаются в концентрации, которая колеблется от низкой до средней, и уровень внешнего излучения является минимальным. В зонах, где производится работа с конечным продуктом, основным источником излучения является пыль концентрата, хотя наряду с этим мощность внешнего излучения может быть достаточно высокой и обуславливать необходимость осуществления мер по контролю и наблюдению; дочерние продукты радона присутствуют в незначительных концентрациях или отсутствуют вовсе. В промежуточных зонах обработки обнаруживаются как источники внешнего излучения, так и взвешенные в воздухе радионуклиды, однако в общем случае они не представляют существенной важности.

Облучение от дочерних продуктов радона ингаляционным путем является доминирующей профессиональной опасностью в урановых шахтах, и контролю этого вида облучения в программах контроля должно отводиться наиболее значительное место. В шахтах практически вся деятельность по контролю сводится к сбору проб вручную через короткие промежутки времени. Такой отбор проб позволяет определить концентрацию радионуклидов только в момент сбора и в зоне, в которой непосредственно отбираются пробы, поэтому отбор проб должен периодически повторяться в тех случаях, когда необходимо определить средние концентрации.

Недавно были разработаны индивидуальные мониторы дочерних продуктов радона, принцип работы которых основан на методе травления

следов; однако эти приборы еще не используются в широких масштабах.

Концентрация рудной пыли в большинстве случаев зависит от типа работ, производимых в шахте, и доза облучения рабочего шахты от рудной пыли может сильно зависеть от того, насколько близко располагаются источники излучения. Следовательно, пробы воздуха необходимо отбирать на участках, которые располагаются на очень близком расстоянии от того места, где работает данный рабочий, в целях точного измерения получаемой им дозы, однако концентрация рудной пыли в шахтах бывает довольно низкой, поэтому эта мера предосторожности не всегда является необходимой.

Контроль воздуха на обогатительных предприятиях также производится главным образом посредством общего отбора проб, однако для измерения индивидуальных доз облучения, получаемых от рудной пыли и пыли, образующейся от концентрата, можно использовать индивидуальные пробоотборники. На обогатительных предприятиях основная часть взвешенных в воздухе загрязнителей поступает от локализованных источников, поэтому вблизи точек выброса создаются высокие градиенты концентрации. Следовательно, месторасположение точек общего отбора проб на обогатительных предприятиях при проведении дозиметрического контроля более критично, чем в шахтах, и ввиду более резкого разброса в уровнях концентрации требуется более частое проведение повторных измерений. В зонах высокой запыленности, например, там, где выполняются операции по опорожнению пылеуловителей, загрузке сырья в барабаны, обработке руды и отбору проб концентрата, при отсутствии индивидуальных пробоотборников воздуха может потребоваться применение стационарных пробоотборников на рабочих местах.

Внешнее излучение контролируется с помощью специальных приборов и индивидуальных дозиметров.

Защитные меры

Методы поддержаний безопасных рабочих условий в урановых шахтах в основном такие же, как и в обычных шахтах, однако особые свойства радона и дочерних продуктов радона обуславливают применение особых требований, в частности в отношении вентиляции. При данной концентрации радона концентрация дочерних продуктов, а следовательно и опасности, быстро возрастают со временем из-за короткого периода полураспада дочерних продуктов радона. Поэтому чем быстрее удаляется загрязненный воздух из рабочих помещений и зон, тем ниже будет концентрация дочерних продуктов радона в данном месте. Основные методы контроля по порядку их значимости являются: механическая разбавительная вентиляция; ограждение источника излучения; индивидуальная защита и периодическая смена рабочих мест. Очистка воздуха с целью удаления дочерних продуктов радона используется ограничительно в дополнение к принудительной вентиляции.



Конвейер, доставляющий руду на перерабатывающий завод "Экарпьер" в департаменте Вандея, Франция.

Первичные и вспомогательные системы механической вентиляции используются для снижения концентрации радона и дочерних продуктов радона в воздухе шахты. Первичная система вентиляции направляет разбавительный воздух в шахту, прогоняет его через шахту и выводит наружу через систему стволов посредством мощных вентиляторов, обычно устанавливаемых на поверхности. Дополнительные системы обеспечивают распределение воздуха, поступающего из основных каналов распределения, в подземные участки шахты посредством малогабаритных вентиляторов и гибких воздухопроводов. Вспомогательные системы расширяются, модифицируются или изменяются с изменением схем выработки в шахте.

Радон и дочерние продукты радона в выработанных зонах можно ограждать от распространения с целью предотвращения их попадания в рабочие зоны посредством заградительных барьеров, обеспечивающих максимальную герметичность закрытия. Поскольку радон растворим в воде и эманурует из истоков при воздействии атмосферы шахты, применение труб для заключения в них или отвода вод является еще одним эффективным методом ограждения. Подавление радоновой эманации с поверхностей внутри шахты путем наддува атмосферы представляется технически осуществимым, если порода является пористой. Для закупорки пор и

трещин открытых поверхностей породы оказалось эффективным использование покрытий.

Защитные приборы индивидуального пользования, как, например, респираторы, используются по усмотрению в зонах, где содержание взвешенных в воздухе частиц высоко. В шахтах, имеющих зоны с высоким уровнем внешнего излучения, когда практически не осуществимы другие меры ограничения доз, рекомендуется периодически производить смену рабочих мест.

На обогатительных предприятиях контрольные меры, призванные обеспечивать защиту охраны здоровья рабочих, отличаются по степени эффективности и типу от тех, которые применяются при подземных работах. Первичное ограничение доз достигается путем применения ограждений, хотя местная вытяжная вентиляция используется в широких масштабах для предотвращения утечек пыли, газов и дыма из зон, в которых ведутся работы. Технологические процессы на предприятиях в основном автоматизированы, благодаря чему прямой контакт рабочих с материалами сводится до минимума. Технологические операции разрабатываются таким образом, чтобы они снижали вероятность загрязняющих выбросов, и в рабочих помещениях производится регулярная уборка с целью удаления загрязняющих веществ, оседающих на поверхностях.

Для всех работников, работающих в контакте с урановыми концентратами, необходимо тщательное соблюдение личной гигиены. Мытье рук перед едой или курением, а также прием душа в конце каждой рабочей смены должны быть обязательны. Рабочий персонал должен одевать перчатки в каждом случае при необходимости контакта с концентратами. Столовые, комнаты для отдыха, а также раздевалки должны быть изолированы от рабочих помещений, при этом необходимо обеспечивать удобный доступ к душевым и рукомойникам. Ношение индивидуальных респираторов является лишь дополнением к инженерным методам ограничения доз. Основное внимание должно всегда уделяться поддержанию концентрации радионуклидов в воздухе рабочих помещений в пределах допустимых норм. Однако применение респираторов или других дыхательных аппаратов является необходимым в некоторых, обычно исключительных, случаях, например, при

выходе из строя системы вентиляции или при выполнении ремонтных работ и работ по техническому обслуживанию, когда должная вентиляция не обеспечивается. Использование респираторов не совместимо с работой, в которой требуется применение постоянных физических усилий или полная свобода движений.

Все лица, занятые на работах по добыче или переработке урановых руд, должны подвергаться медицинскому обследованию при поступлении на работу и через регулярные интервалы во время работы. Медицинские обследования перед приемом на работу, а также периодические медицинские обследования должны проводиться должным образом и обеспечивать получение информации об общем состоянии здоровья работающего, предупреждать и обнаруживать изменения состояния здоровья, которые могут быть связаны с профессиональным облучением.

Медицинское обследование, проводимое перед приемом на работу, должно быть очень тщательным. В общем случае периодические обследования должны проводиться каждый год, если работник подвергается облучению. В ходе периодических обследований должно проверяться общее состояние здоровья работающего, при этом особое внимание должно уделяться некоторым конкретным органам и системам организма. Медицинское обследование также должно проводиться по окончании работы работника на производстве.

Необходимость в улучшении контроля

Современная технология контроля вполне обеспечивает поддержание безопасных рабочих условий как на предприятиях по добыче, так и на предприятиях по переработке урановой руды. Если сравнивать ее с другими технологиями, применяемыми в атомной промышленности, в области дозиметрического контроля на уранодобывающих и ураноперерабатывающих предприятиях, был выполнен небольшой объем научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. За последние годы этим работам начали уделять значительное внимание; однако все вопросы, связанные с дозиметрическим контролем, нуждаются в дальнейшей доработке.