

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА САМОДЕЗАКТИВАЦИИ

Машинистов В.Е.¹, Балакин В.Ф.¹, Коверя А.С.²

¹Национальная металлургическая академия Украины
просп. Гагарина, 4, 49600, г. Днепр

²Национальный технический университет «Днепропетровская политехника»
просп. Д. Яворницкого, 19, 49005, г. Днепр
nakover13@gmail.com, mashvic@i.ua

В работе предложен подход, позволяющий вернуть в промышленное производство в качестве вторичного сырья техногенные объекты, поверхность которых загрязнена радиоактивными веществами. Его основой является демонтаж таких объектов с последующим раздроблением образовавшихся фрагментов. В результате объект как поверхностный источник гамма-излучения преобразуется в объемный с равномерным распределением элементарных излучателей в нем. При этом создаются условия для получения радиационно безопасного сырья, поскольку гамма-излучение значительной части радионуклидов поглощается в веществе источника, то есть имеет место эффект, названный «самодезактивацией». Самодезактивация является основополагающим фактором в предложенном подходе к решению проблемы утилизации радиоактивно загрязненных объектов. При разработке изложенного в статье подхода использованы корпускулярные и волновые свойства гамма-излучения. Этот подход позволил адекватно описать процесс распространения гамма-излучения и взаимодействия его с веществом, а также закономерности формирования поля в точке. Находящийся в среде обитания человек подвергается облучению от всех внешних по отношению к нему источников гамма-излучения. Количественной оценкой вредного воздействия облучения является усредненная за год мощность эффективной дозы. Для оценки радиационной обстановки, созданной загрязненными радионуклидами объектами, в качестве критерия радиационной безопасности предложен естественный радиационный фон. Экспериментальная проверка предложенного подхода и отработка технологии его реализации могут быть проведены на небольших объемах загрязненных радионуклидами материалов и не потребует больших материальных затрат. Приведенный в статье пример показал, что предложенный подход может успешно использоваться для возврата больших территорий и материала в экологически безопасное состояние, что будет способствовать повышению доверия общества к ядерным технологиям. *Ключевые слова:* радиоактивно загрязненный объект, гамма-излучение, самодезактивация, утилизация, облучение.

Вирішення проблеми утилізації радіоактивно забруднених об'єктів на основі ефекту самодезактивації. Машиністов В.Є., Балакін В.Ф., Коверя А.С.

У роботі запропонований підхід, який дозволяє повернути в промислове виробництво в якості вторинної сировини техногенні об'єкти, поверхня яких забруднена радіоактивними речовинами. Основою підходу є демонтаж таких об'єктів із подальшим роздробленням фрагментів, які утворилися. В результаті об'єкт як поверхневе джерело гамма-випромінювання перетворюється в об'ємне з рівномірним розподілом елементарних випромінювачів у ньому. При цьому створюються умови для отримання радіаційно безпечної сировини, оскільки гамма-випромінювання значної частини радіонуклідів поглинається в речовині джерела, тобто має місце ефект, названий «самодезактивацією». Самодезактивація є основоположним фактором у запропонованому підході щодо вирішення проблеми утилізації радіоактивно забруднених об'єктів. При розробці викладеного в статті підходу використані корпускулярні і хвильові властивості гамма-випромінювання. Цей підхід дозволив адекватно описати процес поширення гамма-випромінювання і взаємодії його з речовиною, а також закономірності формування поля в точці. Людина, яка знаходиться в природному середовищі, піддається опроміненню від всіх зовнішніх по відношенню до неї джерел гамма-випромінювання. Кількісною оцінкою шкідливого впливу опромінення є усереднена за рік потужність ефективної дози. Для оцінки радіаційного стану, створеного забрудненими радіонуклідами об'єктами, як критерій радіаційної безпеки запропонований природний радіаційний фон. Експериментальна перевірка запропонованого підходу і відпрацювання технології його реалізації можуть бути проведені на невеликих обсягах забруднених радіонуклідами матеріалів і не буде потребувати великих матеріальних витрат. Наведений у статті приклад показав, що запропонований підхід може успішно використовуватися для повернення великих територій і матеріалів в екологічно безпечний стан, що буде сприяти підвищенню довіри суспільства до ядерних технологій. *Ключові слова:* радіоактивно забруднений об'єкт, гамма-випромінювання, самодезактивація, утилізація, опромінення.

Solving the problem of radioactively contaminated objects utilization based on the self-decontamination effect. Mashinistov V., Balakin V., Koveria A.

The paper proposes an approach that allows you to recycle a by-product objects whose surface is contaminated with radioactive substances as a secondary raw material. The basis of the approach is to dismantle the objects with their subsequent crushing. As a result, the object as a surface source of gamma radiation is converted into a volumetric source with a uniform distribution of radiation elements. This creates the conditions for obtaining radiation-safe raw materials, since the gamma radiation of a large part of the radionuclides is absorbed into the source material and there is an effect of "self-decontamination". Self-decontamination is a fundamental factor in the proposed approach to solve the issue of radioactively contaminated objects utilisation. The corpuscular and wave properties of gamma radiation were used in the development of the approach presented in the article. This

approach allowed adequately describe the spread of gamma radiation and its interaction with matter, as well as regularities of formation of a field at a point. A person who is in a natural environment is exposed to radiation from all external sources of gamma radiation. A quantitative assessment of the adverse effects of irradiation is the annual average effective dose rate. To evaluate the radiation influence created by contaminated radionuclide objects, as a criterion for radiation safety, a natural radiation background has been proposed. Test runs of the proposed approach and the fine-tuning of technology for its implementation might be carried out on a small volumes of contaminated radionuclide materials and significant material costs are not required. The example in the paper showed that the proposed approach can be successfully used to recycle the large areas and materials to an environmentally friendly state, which will help to increase public confidence in nuclear technology. *Key words:* radioactive contaminated object, gamma radiation, self-decontamination, utilisation, irradiation.

Постановка проблемы. В результате постоянно возрастающей интенсивности техногенного воздействия человека на среду его обитания остро стоят вопросы обеспечения его радиационной безопасности. Существует много ситуаций, которые могут вызвать дополнительное к природному радиационному фону облучение людей ионизирующей радиацией. Например, это излучение от природных радионуклидов, поступающих в биосферу вместе с полезными ископаемыми, извлеченными на поверхность Земли. Сюда же относятся и загрязняющие окружающую среду источники ионизирующего излучения (далее – ИИ) искусственного происхождения, возникающие в результате производственной деятельности или после радиационной аварии. При этом загрязняются объекты техногенного происхождения: жилые, административные, производственные здания и сооружения; транспортные средства, технологическое оборудование и техника, применявшаяся при ликвидации последствий аварий. Превышение показателей загрязнения их поверхности выше допустимого уровня делает невозможным их дальнейшее использование по прямому назначению. Следовательно, эти объекты должны выводиться из обращения, что требует решения ряда вопросов относительно организации их утилизации, хранения, захоронения, а также обеспечения радиационной безопасности населения и персонала объектов, недопущения дополнительного радиационного загрязнения природной среды в местах их нахождения. Все это сопряжено со значительными материальными и финансовыми затратами.

Актуальность исследования. Особую актуальность приобретает задача утилизации таких объектов, то есть обеспечение их дальнейшего применения в промышленности, строительстве и других сферах техногенной деятельности. Нельзя не учитывать и имеющий место негативный социально-психологический аспект указанной проблемы, во многом препятствующий дальнейшему развитию ядерной энергетики.

Анализ последних исследований и публикаций. Для того, чтобы вернуть в хозяйственный оборот загрязненные радионуклидами объекты или материалы, обеспечить возможность их повторного применения, необходимо создать условия, при которых они будут радиационно безопасными для человека и окружающей среды.

В настоящее время эта задача решается в основном путем дезактивации загрязненных объектов.

Причем непосредственно дезактивирующей обработке подлежат поверхности тех объектов, на которых находятся загрязняющие их радионуклиды. Дезактивация зданий, сооружений, транспортных средств, промышленного и технологического оборудования проводится физическими (механическими), химическими или физико-химическими способами.

Если снизить радиоактивность объектов до требуемого уровня невозможно, то загрязненные радионуклидами объекты переводят в отходы. Считается, что единственным окончательным решением проблемы отходов является полный естественный распад содержащихся в них радиоактивных продуктов [1]. В основном проблему отходов решают путем выдержки, когда предлагается хранить отходы до тех пор, пока почти все содержащиеся в них радионуклиды не распадутся.

Низкая эффективность известных методов обезвреживания загрязненных радионуклидами объектов требует поиска новых подходов к решению этой проблемы. Один из них представлен в [2], где изложена технология рециклинга загрязненного радионуклидами металла. Для обеспечения безопасности персонала, населения и окружающей среды принимают меры по снижению индивидуальных эффективных доз, создаваемых излучением с поверхности загрязненного металла, до уровней, не превышающих допустимые пределы. В рассматриваемом случае эта задача решается путем плавления радиоактивно загрязненного металла, не подвергавшегося предварительной дезактивации. В процессе плавления радионуклиды, находящиеся в расплаве, распределяются в его объеме равномерно. Таким же остается распределение радионуклидов и в выплавленном слитке. Уровень гамма-излучения, испускаемого с поверхности выплавленного металла, во много раз ниже его значения, которое было на поверхности загруженного в печь загрязненного металла, поскольку излучение значительной части радионуклидов поглощается в металле. Рассмотренный подход может быть также использован для утилизации тех объектов и материалов с загрязненной радионуклидами поверхностью, для которых существует возможность преобразовать их поверхностную радиоактивность в объемную.

Цель публикации – предложить пригодную для промышленного применения технологию утилизации техногенных объектов, загрязненных радионуклидами, на основе эффекта самодезактивации.

Поле гамма-излучения в среде обитания. В статье авторы рассматривают отдельные загрязненные радионуклидами техногенные объекты, которые находятся вне организма человека как источники ИИ. Как показано в [3], в этом случае вклад во внешнюю составляющую эффективной дозы вносит только гамма-излучение, испускаемое поверхностью этих объектов. Гамма-излучение как один из видов электромагнитного излучения, имеет корпускулярно-волновую природу, то есть одновременно имеет свойства как непрерывных электромагнитных волн, так и корпускул (квантов). По волновым представлениям основным параметром, которым описывается распространение квантов гамма-излучения и их взаимодействия между собой, является частота колебаний ν .

Процесс формирования поля гамма-излучения описывается законами распространения электромагнитных колебаний и характером их взаимодействия между собой. Поле гамма-излучения в каждой точке среды обитания обусловлено поступившим к ней излучением от распределенных в ней радионуклидов. В соответствии с принципом Гюйгенса каждая точка пространства, достигнутая волной, является вторичным источником электромагнитных колебаний. Поскольку эти не зависящие друг от друга источники гамма-излучения подчиняются закону аддитивности, то и результирующее поле в каждой точке пространства является суммой электромагнитных полей, создаваемых этими источниками гамма-излучения.

Принцип Гюйгенса дает возможность выбирать огибающую поверхность, на которой расположены условные источники вторичных волн, способом, который позволяет решить конкретно поставленную задачу. Эти закономерности допускают при оценке и прогнозировании радиационной обстановки не рассматривать первичные источники, излучение которых способно воздействовать на человека, а ограничиться исследованием созданных ими вторичных источников. Например, отдельный объект с объемным распределением радионуклидов в нем представляет собой первичный источник, а его поверхность – вторичный, характеристики которого могут быть измерены или рассчитаны и применены в качестве исходных данных для оценки радиационной обстановки, созданной этим объектом. При этом отпадает необходимость анализировать состав гамма-излучающих радионуклидов первичного источника. Здесь уместно провести такую аналогию. Например, для пользователя электрических сетей не имеет значения, что представляют собой источники, вырабатывающие электроэнергию. Важно, чтобы ее характеристики отвечали предъявляемым к ней требованиям в месте потребления.

Наличие у гамма-излучения корпускулярных свойств позволяет адекватно описать процесс испускания квантов и их взаимодействие с веществами.

Кванты гамма-излучения представляют собой локализованные в небольшом объеме порции энергии E_0 . Между E_0 и ν существует прямопропорциональная связь [4]:

$$E_0 = h \nu, \quad (1)$$

где h – постоянная Планка.

Энергия гамма-квантов, излучаемых радионуклидами, лежит в интервале 50 кэВ – 3 МэВ. При распространении гамма-излучения через вещество имеет место ослабление его интенсивности за счёт взаимодействия с веществом по экспоненциальному закону [4], что означает невозможность его полного ограничения. На практике при обеспечении радиационной безопасности достаточно уменьшить мощность гамма-излучения до уровня, сопоставимого с фоновым. В указанном интервале энергий основными процессами взаимодействия гамма-квантов с атомами среды распространения являются фотоэффект и комптоновское рассеяние.

При фотоэффекте энергия первичных фотонов (гамма-квантов) преобразуется в кинетическую энергию фотоэлектронов. Этот процесс является преобладающим при относительно небольших энергиях гамма-излучения ($E_0 < 0,5$ МэВ).

Комптоновское взаимодействие – это рассеяние фотонов на связанном в атоме электроны. При этом гамма-квант передает электрону только часть своей энергии и изменяет направление своего движения. Этот эффект является доминирующим при энергиях до 3 МэВ. При распространении гамма-кванта с энергией, при которой возникает комптон-эффект, в результате каждого одиночного акта его взаимодействия с атомом вещества энергия кванта уменьшается на величину энергии ионизации этого атома $\Delta E_0 = 34$ эВ [1]. В соответствии с формулой (1) при этом уменьшается и частота колебаний гамма-кванта. Этот процесс продолжается до полной потери его энергии. В результате по мере распространения гамма-квантов в веществе имеет место изменение в сторону уменьшения их энергетического и частотного спектров. Таким образом, корпускулярные и волновые свойства гамма-излучения, взаимно дополняя друг друга, позволяют исчерпывающе описать закономерности его распространения и взаимодействия с веществом, результатом которого является ионизация и возбуждение его атомов и молекул. Если эти процессы происходят в неживой материи, то они не приводят к изменению ее свойств.

При воздействии ИИ на биологическую ткань, в ней возникают первичные процессы, запускающие сложные и взаимосвязанные изменения, подчиняющиеся биологическим законам и нарушающие функционирование живого организма [1; 3]. Для исключения облучения людей сверх установленных пределов необходимо исследовать особенности действия внешнего гамма-излучения на человека.

Человек как объект внешнего облучения.

Степень воздействия на человека полей гамма-излучения определяется создаваемыми ими эффективными дозами внешнего облучения. Количественной оценкой вредного влияния ионизирующего излучения на человека является эффективная доза. Действующие международные и национальные документы по вопросам радиационной безопасности содержат ключевое предположение о линейной зависимости доза – биологический эффект [5–8]. Согласно ему при увеличении эффективной дозы облучения прямопропорционально увеличивается уровень биологического действия радиационных факторов. Такой подход является основой как для суммирования доз от отдельных внешних источников, так и для определения доз, формируемых конкретными источниками. Эффективные дозы рассчитываются для «условного человека», обладающего набором стандартных параметров тела [6].

Доза $E^{внеш}$ равна произведению мощности эффективной дозы $\dot{E}^{внеш}$ на время действия t :

$$E^{внеш} = \dot{E}^{внеш} t, \quad (2)$$

Для того, чтобы корректно оценивать и сопоставлять между собой степень радиационной опасности разных источников, расчет эффективной дозы выполняют для одного и того же интервала времени t . В нормативных документах это время принято считать равным одному году. В этом случае величина $\dot{E}^{внеш}$ приобретает смысл среднегодовой мощности индивидуальной эффективной дозы.

Мощность внешней эффективной дозы, созданной гамма-излучающим источником в какой-либо доступной для человека точке пространства, определяется значением мощности, поглощенной в этой точке дозы. Доза в точке формируется поступающим в нее гамма-излучением со всех направлений и с разных расстояний, которая испускается от смеси радионуклидов, содержащихся во всех элементах окружающей среды. Поскольку на результирующее гамма-поле в точке влияет большое количество факторов, то оно практически не может быть рассчитано и контролируется с помощью приборов, измеряющих дозиметрические характеристики этого поля. Дозиметрические величины непосредственно не могут быть измерены, их значения определяются с помощью операционных величин, которые можно измерить и которые являются их консервативной оценкой [6].

На практике для определения мощности эффективной дозы внешнего облучения $\dot{E}^{внеш}$ с помощью дозиметра, шкала которого градуирована в единицах мкЗв/ч, измеряют мощность амбиентного эквивалента дозы. Значение этой операционной величины является оценкой мощности дозы в точке измерения $\dot{E}^{внеш}$. Термин «амбиентный» (с англ. – «окружающий, внешний») отражает тот факт, что прибор суммирует регистрируемые его детектором сигналы, кото-

рые поступают со всех направлений. Как следует из выражения (2), для оценки эффективной дозы, которую получил бы человек, находящийся в точке измерения, показания дозиметра умножаются на время пребывания человека в этой точке поля излучения.

Находящийся на поверхности Земли человек также как и другие живые организмы постоянно находится под воздействием естественного радиационного фона (далее – ЕРФ). Внешнее облучение человека, обусловленное космическим излучением, гамма-излучением от радионуклидов, содержащихся в земной коре, строительных материалах, атмосферном воздухе, составляет примерно третью часть от суммарного фонового воздействия, которому подвергается человек [1].

Благодаря интенсивной деятельности человека постоянно возрастает уровень ИИ от природных радионуклидов, поступающих в окружающую среду вместе с полезными ископаемыми, продуктами сгорания топлива. Также образуется искусственный радиационный фон, обусловленный отходами предприятий ядерной энергетики, авариями с выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду.

Природный радиационный фон также как и технологически измененный за редким исключением характеризуется относительно небольшими вариациями как в пространстве, так и во времени. Естественные радиоактивные вещества земного происхождения рассеяны в объеме Земли. Этот фактор является решающим в обеспечении радиационной безопасности людей, которые находятся на поверхности Земли, поскольку на них может воздействовать гамма-излучение только тех радионуклидов, которые находятся в верхнем слое почвы толщиной 0,3–0,5 м [9]. Ионизирующее излучение, испускаемое радиоактивными веществами, которые находятся ниже этого слоя, практически полностью поглощается в веществе Земли.

В результате аварий на АЭС, ядерных реакторах образуется облако, при перемещении которого загрязняются большие территории выпавшими из него на поверхность Земли радиоактивными веществами. Наземный радиоактивный след имеет пятнистый характер с большими перепадами уровней радиации. На загрязненной территории в результате атмосферных явлений происходит непрерывное вторичное перераспределение радиоактивности. Отдельные участки с расположенными на них техногенными объектами могут быть сильно загрязненными и находиться рядом с практически «чистыми». Объекты с повышенным уровнем загрязнения поверхности радионуклидами могут создавать ситуации существующего опасного хронического облучения населения.

Поскольку гамма-излучение при распространении ослабляется, то мощность индивидуальной эффективной дозы имеет наибольшее значение у излучающей поверхности источника. Очевидно, что в один

и тот же момент времени из всех людей, которые находятся в зоне действия излучения, испускаемого отдельным источником, наибольшему воздействию будут подвергаться те из них, которые находятся непосредственно у его поверхности. Отсюда следует, что если обеспечить их безопасность, то в безопасности будут находиться и все остальные лица. Таким образом, условием возвращения загрязненных объектов в хозяйственный оборот является снижение уровня гамма-излучения с их поверхности до допустимого. В соответствии с [5] этот подход является вмешательством, предусматривающим принятие мер по обеспечению радиационной безопасности.

В рассматриваемой ситуации в рамках вмешательства такими мерами являются дезактивация зданий, сооружений до гранично допустимого уровня годовой индивидуальной дозы облучения $E_{гр}^{внеш}$, создаваемой ими, и не превышающего значения 1 мЗв. Поскольку это расчетная величина, то на практике в качестве количественного критерия безопасности источника гамма-излучения устанавливается такой производный норматив как усредненная за год мощность эффективной дозы $\dot{E}_{гр}^{внеш}$, рассчитанная из значения эффективной дозы $E_{гр}^{внеш}$ [5]. Таким образом, если выполняется условие $E^{внеш} \leq E_{гр}^{внеш}$, то источник ИИ, создавший поле такой интенсивности, безопасен. При невыполнении этого условия, то есть при $E^{внеш} > E_{гр}^{внеш}$, проявляется опасный характер его влияния на здоровье человека. Изложенное справедливо не только для точечного изотропного излучателя, но и для протяженных с непрерывным спектром источников как естественного, так и искусственного происхождения с различными физическими и химическими характеристиками.

Для принятия мер по обеспечению радиационной безопасности конкретного объекта определяется мощность дозы излучения в точке, удаленной от его поверхности на 0,1 м. Показания дозиметра $\dot{E}_{изм}$ представляют собой сумму мощности дозы излучения с поверхности объекта $\dot{E}_o^{внеш}$ и присущей для такой местности средней мощности дозы естественного радиационного фона $\dot{E}_ф$:

$$\dot{E}_{изм}^{внеш} = \dot{E}_o^{внеш} + \dot{E}_ф^{внеш}, \quad (3)$$

Фактическое значение мощности дозы $\dot{E}_o^{внеш}$ рассчитывают по формуле:

$$\dot{E}_o^{внеш} = \dot{E}_{изм}^{внеш} - \dot{E}_ф^{внеш}, \quad (4)$$

Если эта величина превышает гранично допустимую мощность дозы $\dot{E}_{гр}^{внеш}$, являющуюся критерием радиационной безопасности объекта, то необходимо принимать меры к обеспечению его безопасности. Значение этого критерия определяется путем установления количественной связи между уровнем внешнего облучения человека гамма-излучением и эффектом от его воздействия.

Естественный радиационный фон как критерий радиационной безопасности. Внешняя состав-

ляющая естественного радиационного фона не является постоянной величиной. Ее изменения связаны прежде всего с вариациями концентрации радионуклидов на разных участках земной коры, а также в строительных материалах и зависят как от глобальных, так и от местных геологических процессов.

Количественно уровень опасности радиационного фона, также как и любого гамма-излучения, оценивают таким условным показателем как годовая индивидуальная эффективная доза. Поскольку распределение изменяющейся в течение года дозы не регламентируется [5], то она является усредненной за год величиной. На земном шаре имеются отдельные территории, на которых получаемая эффективная доза до десятка раз превышает усредненное по миру значение. Эти более высокие значения дозы обусловлены повышенным уровнем концентрации радионуклидов в земной коре. Люди на таких территориях живут тысячи лет, но, несмотря на тщательно проведенные исследования, нет доказательств связи между повышением уровня радиационного фона и ростом биологических нарушений в организме человека. Это можно объяснить тем, что все живые организмы способны существовать при широком диапазоне значений, действующих на него факторов окружающей среды, в том числе и радиационного фона. Живой организм снабжен эффективными механизмами адаптации к изменениям как естественных, так и несвойственных природе искусственных факторов. Вполне закономерно, что организм может адаптироваться к воздействию на него и гамма-излучения, созданного радионуклидами не только естественного, но и техногенного происхождения. Из изложенного следует, что для того, чтобы вновь образуемые источники как естественного, так и искусственного происхождения были безопасными, необходимо обеспечить, чтобы уровень создаваемого ими ИИ был сопоставим с уровнем естественного радиационного фона. Следовательно, естественный радиационный фон является критерием радиационной безопасности в существующей ситуации воздействия как техногенных, так и природных источников излучения на людей.

Во многих случаях выбор граничного значения мощности эффективной дозы, по которому оценивается сложившаяся радиационная обстановка, зависит от конкретной ситуации существующего облучения. Например, в Украине, а также во многих других странах допустимый уровень мощности поглощенной дозы в помещениях жилых и промышленных зданий устанавливается равным 0,26 мкЗв/ч и 0,44 мкЗв/ч с учетом природного фона [5]. Директивой 2013/59 EURATOM [7] определено, что для оборудования, которое имеет в своем составе закрытый источник, этот уровень равен 1 мкЗв/ч на расстоянии 0,1 м от его ближайшей поверхности. В «Основных санитарных правилах Украины» [8] установлено, что твердые материалы с неизвестным

радионуклідним составом и неизвестной удельной активностью не относятся к радиоактивным отходам, если мощность поглощенной дозы, измеренная на расстоянии 0,1 м от их поверхности не превышает значения 1 мкГр/ч.

Самодезактивация – основной фактор в обеспечении радиационной безопасности. Загрязнение различных объектов радиоактивными веществами может быть поверхностным или объёмным. Для выявления закономерности и особенностей формирования мощности дозы гамма-излучения с поверхности какого-либо объекта радионуклидами авторы наводят рисунок 1, на котором представлены фрагменты бесконечных в пространстве источников излучения S с различными видами распределения в них радионуклидов. Поле излучения каждого источника определяется в точке P , которая находится в непосредственной близости от излучающей поверхности.

Рисунок 1, а соответствует ситуации, когда радиоактивными веществами равномерно загрязнена поверхность бесконечной плоскости. В этом случае все радионуклиды, представляющие собой элементарные изотропные источники, находятся в одинаковых условиях и вносят равный вклад в формирование поля электромагнитного гамма-излучения, которое испускается этой поверхностью. Мощность этого излучения $\dot{E}^{пов}$ будет определять степень опасности для человека, находящегося в зоне его действия. Значение этой мощности в точке P может быть найдено из соотношения [10]:

$$\dot{E}^{пов} = 2\pi q_{пов} K_{\gamma} \quad (5)$$

где $q_{пов}$ – поверхностная активность, Бк/м²; K_{γ} – обобщенный дозовый коэффициент, характеризующий количественную зависимость мощности дозы гамма-излучения от активности создающих его радионуклидов, (Зв/ч) / (Бк/м²).

На рисунке 1, б показан источник в виде полубесконечного излучающего пространства с равномерным распределением активности по его объему. Такое распределение радионуклидов по сравнению с поверхностным существенно изменяет условия формирования суммарного радиационного излучения с поверхности этого источника, поскольку имеет место явление поглощения ИИ, создаваемого радионуклидами, находящимися в объеме вещества объекта. Степень ослабления излучения каждого эле-

ментарного источника зависит от его удаленности от излучающей поверхности. Чем дальше от этой поверхности находятся элементарные излучатели, тем больший путь необходимо преодолевать излучению в веществе источника ИИ, тем большая доля его энергии будет поглощаться этим веществом.

За пределы источника может выйти гамма-излучение только тех радионуклидов, которые находятся в его приповерхностном слое, толщина которого зависит от плотности вещества источника, а также от вида и уровня ИИ, испускаемого радионуклидами. Излучение остальных радионуклидов поглощается в веществе источника полностью. Следовательно, не все элементарные источники ИИ, которые находятся в его объёме, вносят вклад в излучение с его поверхности. Мощность гамма-излучения, создаваемая в точке P полубесконечным излучающим пространством (рис. 2, б), определяется по формуле [10]:

$$\dot{E}^{об} = \frac{2\pi q_{об} \cdot K_{\gamma} \cdot d_{0,5}}{0,693}, \quad (6)$$

где $q_{об}$ – объемная активность, Бк/м³; $d_{0,5}$ – толщина слоя половинного ослабления вещества объемного источника, м.

При рассмотрении вопросов радиационной безопасности необходимо принимать во внимание то, что у объекта с поверхностным загрязнением все содержащиеся в нем радионуклиды вносят свой вклад в эффективную дозу облучения, формируемую его поверхностью, а объект с объемным распределением радионуклидов является источником внешнего облучения и экраном для создаваемого им излучения. Причем для каждого радионуклида, находящегося в объеме объекта, толщина экрана своя, и она равна расстоянию от этого радионуклида до излучающей поверхности.

Влияние вида распределения загрязняющих объект радионуклидов на величину мощности дозы излучения с его поверхности проиллюстрировано с помощью рисунка 2.

На рисунке показан изготовленный из изотропного вещества объект в виде параллелепипеда длиной d и площадью одной из сторон S . На рис. 2, а представлен объект, у которого сторона S равномерно загрязнена активностью Q . Поскольку в этом случае поверхностная активность $q_{пов} = Q/S$, Бк/м², то, исходя из выражения (5), мощность дозы гамма-излучения с этой плоскости будет равна:

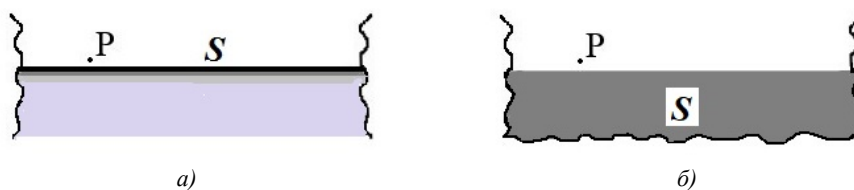


Рис. 1. Источники излучения: а) источник в виде бесконечной плоскости S с равномерным распределением радионуклидов по его поверхности; б) источник в виде полубесконечного излучающего пространства S с равномерным распределением радионуклидов по его объему

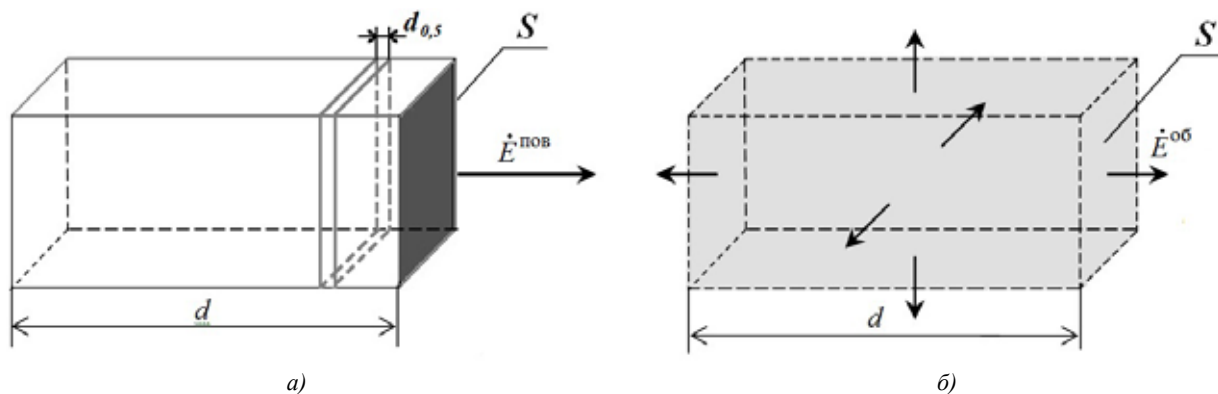


Рис. 2. Иллюстрация зависимости мощности гамма-излучения с поверхности объекта от вида распределения загрязняющих его радионуклидов: а) поверхностное загрязнение; б) объемное загрязнение

$$\dot{E}^{нов} = \frac{2\pi \cdot K_{\gamma} \cdot Q}{S}, \quad (7)$$

Если эту же полную активность Q распределить равномерно в объеме $V = S \cdot d$, м³, то $q_{об} = Q / (S \cdot d)$, Бк/м³, то выражение для мощности дозы излучения с поверхности этого объекта, в том числе и с плоскости S , в соответствии с (6) имеет вид:

$$\dot{E}^{об} = \frac{2\pi \cdot K_{\gamma} \cdot Q \cdot d_{0,5}}{0,693 \cdot S \cdot d}, \quad (8)$$

Это выражение справедливо при условии, которое практически всегда выполняется: $d > 4d_{0,5}$.

С целью сопоставления между собой значений мощности дозы гамма-излучения с плоскости S одного и того же по объему V источника, создаваемой активностью Q для поверхностного и объемного распределения в объекте длиной d (рис. 2), авторы рассматривают такое полученное после несложных преобразований соотношение:

$$\frac{\dot{E}^{нов}}{\dot{E}^{об}} = 0,693 \frac{d}{d_{0,5}}. \quad (9)$$

Как видно из (9) перевод загрязняющих поверхность какого-либо объекта радионуклидов в его объем приводит к уменьшению мощности дозы гамма-излучения с этой поверхности в $0,693d/d_{0,5}$ раз.

Обеспечить радиационную безопасность источника ИИ, находящегося за пределами организма облучаемого им человека, можно не только путем уменьшения количества радионуклидов на его излучающей поверхности (дезактивацией), так и изменением условий распространения к человеку ИИ путем перевода радионуклидов с поверхности объекта в его объем. Поскольку конечным результатом этих действий является уменьшение мощности эффективной дозы облучения человека, то целесообразно оба эти вида воздействия объединить одним понятием: «дезактивация», под которым имеется ввиду эффект поглощения ИИ радионуклидов, находящихся в объеме источника излучения, веществом этого же источника.

По своим последствиям такое действие эквивалентно уменьшению количества радионуклидов на излучающей поверхности объекта, что приводит к уменьшению уровня создаваемого ею излучения и уровня его опасности. Применение в широком смысле единого понятия «дезактивация» позволяет использовать его в целях получения объективной оценки количественного вклада различных факторов в суммарную мощность дозы внешнего облучения человека, созданной отдельным источником. Наглядной иллюстрацией роли эффекта самодезактивации в обеспечении радиационной безопасности является сам факт существования жизни на Земле, в коре которой содержится большое количество радионуклидов. Если бы не было поглощения ИИ в земном веществе, то под действием губительно высокого уровня радиации человек не смог бы выжить.

Явление поглощения ионизирующего излучения в материале источника может быть эффективно использовано для получения из объектов и материалов с загрязненной радионуклидами поверхностью безопасного в радиационном отношении сырья. Для этого достаточно снижать уровень излучения с загрязненной радионуклидами поверхности объекта до уровня естественного радиационного фона. Следовательно, эффект самодезактивации является основополагающим фактором в решении проблемы утилизации радиоактивно загрязненных техногенных объектов.

Оценка возможности утилизации радиоактивно загрязненных техногенных объектов на основе эффекта самодезактивации. В результате Чернобыльской катастрофы радиоактивно загрязнению подверглось большое количество зданий и сооружений, ныне находящихся в зоне отчуждения. По данным системы контроля радиационной обстановки средняя мощность дозы гамма-излучения на территории города Припять в настоящее время в несколько раз превышает фоновый уровень. Поздний период аварии на ЧАЭС характеризуется чрезвычайно сложной радиационной обстановкой.

Это делает невозможным в обозримом будущем возвращение в хозяйственный оборот как загрязненных радионуклидами территорий, так и расположенных на них техногенных объектов, пусть даже и в качестве вторичного сырья.

Утилизация объектов, находящихся в зоне отчуждения, возможна путем их демонтажа или сноса с последующим измельчением фрагментов до размеров щебня или гравия, их перемешивания и дальнейшего использования полученной массы для изготовления бетонных блоков, проведения бетонных работ непосредственно на стройплощадках, плотинах, в качестве отсыпки полотен автомобильных и железнодорожных магистралей. Принципиальная возможность реализации такого способа обеспечивается преобразованием поверхностного загрязнения этих объектов в равномерное распределение радионуклидов по всему объёму создаваемого при дроблении материала.

Наиболее приемлемым способом сноса зданий и сооружений может быть их разрушение с помощью направленного взрыва. Опыт применения этого способа в современном строительстве в наше время значительный, его применение достаточно простое, не требует значительных материальных и временных затрат, использования специального сложного оборудования, техники и инструмента. На практике измельчение полученных фрагментов разрушенных зданий и сооружений осуществляется с помощью специальных передвижных мельниц, камнедробилок или на стационарном аналогичном оборудовании.

На разных этапах работ по утилизации загрязненных радионуклидами зданий может подниматься пыль. Однако она не будет повышать уровень опасности для персонала, поскольку ее удельная активность такая же, как и средняя удельная активность веществ, из которых состоит среда на участке работ по утилизации. Все работы, связанные со сносом радиоактивно загрязненных зданий, сортировкой полученных фрагментов по типу материала, их измельчением относятся к работам с низкоактивными отходами и должны выполняться персоналом, имеющим соответствующую подготовку. Безопасность персонала обеспечивается обычными техническими, медико-санитарными и организационными мероприятиями. Таким образом, рассматриваемый в статье подход может применяться для утилизации материала, полученного в результате демонтажа радиоактивно загрязненных зданий, сооружений и других объектов с последующим измельчением его до размеров гравия или щебня.

Авторы рассматривают возможности предложенного подхода на примере. Так, строительный блок, имеющий форму куба с ребром $d = 1$ м, изготовлен из бетона, имеющего плотность $\rho = 2,35$ г/см³. Одна из его сторон загрязнена цезием-137. Необходимо определить, каким может быть максимально допустимое значение мощности $\dot{E}^{\text{нов}}$ на загрязненной

поверхности, обеспечивающее непревышение допустимого значения мощности $\dot{E}^{\text{об}}$, равное 0,5 мкЗв/ч, с поверхности изделия той же формы, полученного из материала исходного блока, но с равномерным распределением радионуклидов по всей его массе.

Для указанной плотности бетона слой половинного ослабления гамма-излучения, созданного цезием-137, составляет $d_{0,5} = 3,5$ см [10]. В соответствии с выражением (9) искомое максимально допустимое среднее значение мощности поглощенной дозы с поверхности строительного блока, взятого в качестве примера, составит $\dot{E}^{\text{нов}} \leq 9,9$ мкЗв/ч, то есть почти в 20 раз выше допустимого уровня $\dot{E}^{\text{об}}$. Следовательно, строительное сырье, полученное после переработки такого загрязненного блока и изделия из него, будут радиационно «чистыми», поскольку при этом концентрация радиоактивных веществ в них обеспечивает безопасный уровень гамма-излучения с их поверхности.

Одним из преимуществ предлагаемого способа утилизации радиоактивно загрязненных зданий и сооружений является то, что при этом не возникает дополнительного загрязнения окружающей среды радионуклидами, удаляемыми с поверхности загрязненного объекта в процессе его дезактивации. Фактически радионуклиды не удаляются, а переводятся в другой вид распределения (из поверхностного в объёмный), и их количество в загрязненном объекте остается неизменным. При этом, как было показано выше, интенсивность ИИ с поверхности переработанного материала снижается в десятки раз, чем создаются условия для получения материалов с уровнем излучения с их поверхности не превышающим допустимый.

Со временем уровень радиации будет снижаться за счёт распада содержащихся в этих материалах радионуклидов. Применение такого подхода может быть примером успешного возврата больших территорий и материалов в экологически безопасное состояние, что будет способствовать повышению доверия общества к ядерным технологиям. Кроме того, бетонные изделия, изготовленные из раздробленных фрагментов радиоактивно загрязненных объектов, являются источниками ИИ закрытого типа, поскольку радионуклиды в их массе находятся в связанном жестко фиксированном состоянии и не могут естественным путем мигрировать в окружающую среду, приводя к ее дополнительному загрязнению, а могут стать в последующем возможной причиной внутреннего поражения людей.

Экспериментальные исследования рассмотренного подхода и оценку радиационной обстановки, складывающейся при его применении, можно проводить на небольших объемах материалов с невысоким уровнем загрязнения. Такой эксперимент не потребует больших финансовых и материальных затрат и позволит за короткое время отработать приемлемую для промышленного применения

технологии утилизации материалов с повышенным уровнем загрязнения радионуклидами их поверхности.

Главные выводы. В статье показана принципиальная возможность возвратить в хозяйственный оборот в качестве вторичного сырья в промышленном производстве техногенные объекты, поверхность которых загрязнена радионуклидами. Основой рассмотренного подхода является демонтаж таких объектов с последующим раздроблением образовавшихся фрагментов до небольших размеров. При этом радионуклиды с загрязненных поверхностей переводятся в объем полученной массы и распределяются в нём равномерно. В результате техногенный объект как источник ИИ с поверхностным загрязнением радионуклидами преобразуется в источник с равномерным распределением элементарных излучателей в его объеме. Это создает условия для получения радиационно безопасного сырья, поскольку гамма-излучение значительной части радионуклидов поглощается

в объеме источника, то есть имеет место эффект, названный «самодезактивацией».

Для оценки радиационной обстановки, созданной загрязненными радионуклидами объектами, в качестве критерия радиационной безопасности предложен естественный радиационный фон. Экспериментальные исследования предложенного подхода и отработка технологии его реализации могут быть проведены на небольших объемах материалов, имеющих относительно невысокий уровень загрязнения, которые не потребуют больших финансовых и материальных затрат.

Перспективы использования результатов исследования. Применение этого подхода позволит возвратить в промышленность большие объемы радиоактивно загрязненных материалов и будет способствовать существенному улучшению экологической обстановки, а также создаст в обществе благоприятный социально-психологический климат, который будет способствовать дальнейшему эффективному развитию ядерной энергетики.

Литература

1. Ильин Л.А., Кириллов В.Ф., Коренков И.П. Радиационная гигиена. М. : ГЭОТАР-Медиа, 2010. 384 с.
2. Балакин В.Ф., Машинистов В.Е., Коверя А.С. Перспективная технология рециклинга радиоактивно загрязненного металла на основе его плавления. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2018. № 2 (78). С. 43–48.
3. Бекман И.Н. Радиохимия : Учебное пособие в 7 т. Том 6. Экологическая радиохимия и радиозоология. М. : Издатель Маркотин П.Ю., 2015. 400 с.
4. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. М. : Наука, 1972. 256 с.
5. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). Державні гігієнічні нормативи. К., 1998. 135 с.
6. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ) / Пер. с англ. под ред. М.Ф. Киселева и Н.К. Шандалы. М. : Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. 344 с.
7. Директива Ради 2013/59/EURATOM від 5 грудня 2013 року про встановлення основних норм безпеки для захисту від загроз, зумовлених впливом іонізуючого випромінювання, і скасування директив 89/618/Євратом, 90/641/Євратом, 96/29/Євратом, 97/43/Євратом і 2003/122/Євратом. Європейська комісія, Брюссель. 2013. 89 с.
8. Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України № 54 від 02.02.2005.
9. Моисеев А.А., Иванов В.И. Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене. М. : Энергоатомиздат, 1990. 252 с.
10. Кимель Л.Р., Машкович В.П. Защита от ионизирующих излучений. Справочник. Изд. 2. М. : Атомиздат, 1972. 312 с.