

ВВЕДЕНИЕ

Согласно Энциклопедии **эманирование** - выделение радиоактивных изотопов радона (историческое название - эманация) из твердых веществ, содержащих изотопы радия. В этом определении есть неточности. Эманировать могут не только твёрдые тела, но и расплавы, жидкости, растворы и даже газы. Присутствие в исследуемом материале непосредственно источников эманаций - изотопов радия, естественно, обязательно, но сами изотопы радия могут быть дочерними нуклидами тория и радия, так что, например, минерал, содержащий уран-238, может прекрасно эманировать. Само слово *эманация* происходит от позднелатинского *emanatio* - истечение, исхождение. Этим термином был в своё время назван элемент *радон*, Em (теперь Rn). Но истекать из вещества может не только радон, но другие газы и пары. Поэтому некоторые авторы применяют термин эманирование для описания любых процессов газовой выделения (особенно - для выделения радиоактивных газов: ^{85}Kr , ^{133}Xe и др.).

В данной работе под эманированием мы понимаем выделение изотопов радона (радона, ^{222}Rn , торона, ^{220}Rn и актинона ^{219}Rn) из веществ в любом агрегатном состоянии, содержащих изотопы радия (^{226}Ra , ^{224}Ra , ^{223}Ra , соответственно) (или их дальние материнские нуклиды). Другие изотопы радона (их всего 12) нас интересовать не будут, не будет нас интересовать и судьба радона, введённого образец без материнского нуклида (например, диффузией из газовой фазы или ионной бомбардировкой). Для нас главным будет наличие в исследуемом веществе материнского нуклида – постоянного источника радиоактивной эманации.

Замечание 1. Поскольку мы занимаемся математическим аппаратом диффузии при наличии источников и стоков, то в сферу нашего внимания попадают такие процессы, как выделение криптона и ксенона в условиях реакторного эксперимента (изотопы радиоактивных благородных газов образуются в процессе деления урана в ходе реакций с нейтронами), выделение трития под действием тепловых нейтронов из материала, содержащего изотоп литий-6 и др.

Замечание 2. Обычно процесс эманирования относят исключительно к газам. Это, естественно, не так. Такие продукты распада радона, как полоний, таллий, свинец и др. прекрасно могут «эманировать» за счёт эффекта отдачи, а при высоких температурах – и за счёт диффузии.

Количественно процесс эманирования характеризуется коэффициентом эманирования, или эманлирующей способностью. Коэффициент эманирования - отношение количества эманации, выделяющейся из вещества, к общему количеству эманации, образующейся в данном веществе за определенный промежуток времени, т. е. отношение скорости выделения эманации к скорости ее образования в исследуемом образце. Эманлирующая способность данного твердого вещества зависит от его состава, кристаллической структуры, удельной поверхности, температуры, периода полураспада радиоактивного газа и т. д. Она складывается из составляющей, обусловленной процессом энергии отдачи, которую приобретает атом в результате α -распада материнского изотопа радия, а также составляющих, обусловленных процессами диффузии и адсорбции атомов эманации. Коэффициент эманирования обычно выражается в процентах и меняется в широких пределах (от 0 до 100%) для различных веществ в зависимости от их структуры.

Эманирование зависит от состава и строения вещества, его удельной поверхности, температуры и других факторов. При увеличении температуры эманирование, как правило, возрастает.

Замечание 3. Выделение радона из природных объектов (например, из почвы) в окружающую среду состоит из двух последовательных этапов: вначале происходит эманирование радона, т.е. выделение его из кристаллической решетки материала в поры почвы, строительного материала и т.п. Эманирование обусловлено энергией отдачи, приобретаемой атомами в результате альфа-распада, а так же процессами диффузии и адсорбции атомов радона. На втором этапе радон распространяется за счёт диффузии по порам и микротрещинам материала и выделяется в окружающую среду (за счёт испарения, выделения с поверхности, обмена почвенного и атмосферного воздуха и т.п.). Эксхалация сильно зависит от перепада давления, скорости ветра, влажности атмосферы и т.п. Обычно под *эксхалацией* понимают выделение газов (любых!) из горных пород, почвы, вулканов, поверхностей морей и океанов и т.п. При изучении выхода эманации из тел небольших размеров (например, из зерен порошков) используют термин эманирование, при изучении выхода эманации из обширных геологических структур, из слоя почвы или строительных конструкций предпочитают термин эксхалация (эксгалиция). Мы в данном обзоре будем заниматься исключительно эманированием, а эксхалацию рассмотрим в отдельном обзоре.

Радон и торон присутствуют во всех строительных материалах и горных породах. Образующийся в процессе распада инертный газ тотчас же диффундирует через капилляры грунта, микротрещины горных пород, захватывается потоками других газов и, несмотря на ограниченное время жизни, может транспортироваться на значительные расстояния в земной коре и земной атмосфере. Причем естественная убыль этих газов за счет выделения из материалов (процессы эманации - выделения из кристаллической решетки и эксхалации - испарение или выделение с поверхности) и естественного распада постоянно компенсируется за счет распада радия и тория, присутствующих в данном материале.

В геологии эманирование иногда также характеризуют количеством радона, выделяемого 1 г горной породы за определённое время; в этом случае при прочих равных условиях эманирование тем выше, чем больше радия в образце. Поэтому, сравнивая эманирование исследуемой породы и образца, концентрация радия в котором известна, можно оценить содержание радия в анализируемой горной породе.

Понятие эманирования применяется в радиоактивных методах поисков полезных ископаемых, руд и

минералов, при определении абсолютного геологического возраста, изучении строения и поверхности веществ и т. д. Но для нас важно использование этого термина в эманационно-термическом анализе твёрдых тел и минералов.

Эманационный метод в химии, физико-химический метод изучения свойств твёрдых веществ, основанный на измерении их эманирования. Идея эманационного метода впервые была высказана Л. С. Коловрат-Червинским, работавшем в 1904-06 гг. в лаборатории М.Кюри в Париже. Для целей химии твёрдого тела и материаловедения эманационный метод был применён О.Ханом в 30х годах 20-го века. Термин эманационно-термический анализ предложен В.Балеком при его работе в МГУ в лаборатории К.Б.Заборенко (как один из вариантов термического анализа). Во второй трети 20-го века И.Бекман включил эманационно-термический анализ в группу методов диффузионно-структурного анализа, используемых для целей диффузионного материаловедения.

Эманационный метод является старейшим методом диффузионного материаловедения. Сущность его заключается в изучении процесса выделения из образца радиоактивного инертного газа, образующегося с постоянной скоростью в ходе распада материнского изотопа, предварительно введенного в исследуемое вещество. Поскольку кинетика выделения эманации определяется двумя процессами: отдачи и диффузии, эманационный метод позволяет рассчитывать удельную поверхность образца и коэффициент диффузии эманации, а также регистрировать изменения свойств твердого тела при различного рода воздействиях. Эманационный метод с успехом применяется для изучения таких процессов, как кристаллизация, плавление, полиморфные превращения, спекание, твердофазные реакции и др. [1,2].

Создание математического обеспечения эманационного метода представляет собой серьезную проблему, поскольку требует решения дифференциальных уравнений в частных производных с учетом сложных процессов накопления и распада радионуклидов, обеднения поверхностных слоев образца за счет отдачи, временной и координатной зависимости коэффициента диффузии [3, 4]. Для линейных ситуаций такие решения может быть и не сложны по своей сути, но необычайно громоздки. Из-за наличия в расчётных формулах плохо сходящихся рядов и многопараметричности задачи, обработка результатов эманационно-термического анализа затруднена. Трудности неимоверно возрастают при наличии в твёрдом теле твердофазных реакций, сложным образом эволюционирующих во времени и пространстве, а также в случае нелинейных ситуаций, например, при диффузии радона в дефектных средах, содержащих ловушки инертного газа неограниченной ёмкости. Отсутствие в этом случае аналитических решений делает количественную обработку эманограмм практически невозможной.

В данном обзоре мы рассмотрим феноменологическую теорию эманирования твёрдых тел по радону, торону и актинону с учетом процессов отдачи и диффузии, в том числе при термических, химических, радиационных и механических воздействиях на изучаемый материал. Серьёзное внимание уделим эманированию неоднородных (дефектных, наполненных и слоистых сред) и эманированию материалов в которых происходят твердофазные превращения (спекание, растрескивание, изменение рельефа поверхности, топохимических реакций, реакций газ-твёрдое тело и т.п.). Здесь мы ограничимся лишь основными этапами решений диффузионных уравнений. При необходимости предварительную информацию по используемой в обзоре арифметике можно найти в курсе лекций МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ДИФФУЗИИ, приведённом на сайте <http://profbeckman.narod.ru>.