

УДК 62-733

К ВОПРОСУ ОБ ОЧИСТКЕ ВОЗДУХА ОТ РАДИОАКТИВНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ**¹Короткова В.Е., ²Кадо́мцев Г.М., ¹Черняев С.И.**¹*Калужский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Калуга, e-mail: fn2kf@bk.ru;*²*ЗАО «Филтр», пос. Товарково, Калужская область, e-mail: filtr@ftov.ru*

Настоящее исследование посвящено анализу применяемых методов очистки воздуха от радиоактивных аэрозолей на промышленных предприятиях. Образование газообразных радиоактивных отходов происходит на всех стадиях ядерного топливного цикла. Основным источником радиоактивного загрязнения от атомных электростанций являются газоаэрозольные выбросы. Характер выбросов зависит от типа реактора. Для их локализации, сбора и обработки используются системы вентиляции и газоочистки. Перед выбросом в атмосферу газообразные отходы подвергаются выдержке для уменьшения их активности. Для очистки от короткоживущих радионуклидов применяются хроматографические системы. Для очистки от радиоактивного йода применяются методы адсорбции. Для очистки от аэрозольных частиц используются высокоэффективные аэрозольные фильтры на основе ткани Петрянова и HEPA фильтры на основе ультратонкого стекловолокна.

Ключевые слова: газообразные радиоактивные отходы, очистка ГРО, выбросы АЭС, радиоактивные аэрозоли, HEPA-фильтры, фильтры Петрянова

TO THE QUESTION OF PURIFICATION OF AIR OF RADIOACTIVE AEROSOLS**¹Korotkova V.E., ²Kadomtsev G.M., ¹Chernyaev S.I.**¹*Kaluga Branch Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Kaluga, e-mail: fn2kf@bk.ru;*²*CJSC «Filtr», Tovarkovo, Kaluga region, e-mail: filtr@ftov.ru*

This research is devoted to the analysis of methods of purification of air of the radioactive aerosols applied on industrial enterprises. The formation of gaseous radioactive waste occurs at all stages of the nuclear fuel cycle. The main source of contamination is gas and aerosol emissions from the NPP. Emission character depends on the reactor type. Gas cleaning systems and ventilation systems are used for its localization, collecting and processing. Before release into the atmosphere gaseous waste are subjected to aging to reduce their activity. For the cleaning of short-lived radionuclides are used chromatographic system. To remove radioactive iodine adsorption methods are applied. To remove the aerosol particles used high-efficiency aerosol filters based on Petryanov fabric and HEPA-filters based on ultrathin fiberglass.

Keywords: gaseous radioactive waste, treatment of GRW, NPP emissions, radioactive aerosols, HEPA filters, Petryanov filters

В условиях ограниченности запасов органического топлива главным направлением развития мировой энергетики является поиск дополнительных источников энергии, среди которых лидирующие позиции занимает ядерная энергетика. Атомная энергетика в настоящее время рассматривается как реальный путь решения энергетических и экологических проблем 21 века. В свою очередь, развитие атомной энергетики ведет к повышению требований, предъявляемых к радиационной безопасности эксплуатации атомных станций. Атомные станции теплоснабжения (АСТ), например, должны размещаться в непосредственной близости от населенных пунктов, промышленных и сельскохозяйственных объектов. Это, соответственно, накладывает на АСТ еще более жесткие требования по надежности и безопасности всех систем по сравнению с АЭС [16, 23, 26].

Основным потенциальным источником загрязнения биосферы и облучения населения, проживающего вблизи АЭС, являются

газоаэрозольные отходы, образуемые в процессе эксплуатации станции. Следовательно, предотвращение выбросов радиоактивных веществ в воздушную среду является одним из основных факторов, определяющих экологическую и радиационную безопасность при работе радиохимических производств [5, 19, 20, 40].

Образование газообразных отходов происходит на всех стадиях ядерно-топливного цикла (ЯТЦ). Рассматривая ядерный топливный цикл на современном уровне развития ядерной энергетики, можно выделить следующие технологические составляющие: добыча и переработка урановой руды; получение урана в виде U_3O_8 ; конверсия U_3O_8 в газообразную форму UF_6 ; обогащение урана на заводе по разделению изотопов; конверсия UF_6 в UO_2 ; производство ТВЭльных оболочек, комплектующих деталей ТВЭЛов, сборка ТВЭЛов; производство энергии на АЭС; выдержка и транспорт отработавшего ядерного топлива; переработка отработавшего ядер-

ного топлива; захоронение радиоактивных отходов (РАО) [16, 23, 35]. Таким образом, эксплуатация ядерных реакторов, заводов по переработке и захоронению ядерного топлива и других объектов, работа которых связана с использованием радиоактивных веществ, ставит многочисленные проблемы, обусловленные необходимостью защиты персонала, населения и окружающей среды в целом от радиоактивного заражения. Одна из этих проблем – очистка загрязненного радиоактивными элементами воздуха внутри указанных объектов перед выбросом его в атмосферу в процессе работы вентиляционных систем, как в режиме нормальной эксплуатации, так и в аварийных ситуациях. Основными источниками радиоактивного заражения воздуха являются радиоактивные изотопы йода и его соединения (в частности, наиболее трудноуловимое метилиодид), а также радиоактивные аэрозоли. Очистка воздуха от этих элементов необходима для обеспечения экологической безопасности объектов атомной энергетики. В настоящее время на атомных электростанциях очистку загрязненного радиоактивными веществами воздуха ведут раздельно от аэрозолей и йода и его соединений. Аэрозоли улавливают, в основном волокнистыми фильтрами, а йод – фильтрами на основе импрегнированного активированного угля. Таким образом, система высокоэффективной очистки состоит из трех блоков: высокоэффективный аэрозольный фильтр, угольный адсорбер и еще один вы-

сокоэффективный аэрозольный фильтр для улавливания частиц, источником которых является активированный уголь [18, 27].

Радиоактивными аэрозолями принято называть любые взвешенные частицы, находящиеся в воздухе и имеющие естественную (продукты распада урана, тория и радия) или искусственную (продукты деления урана, активационные радионуклиды и др.) природу. В зависимости от агрегатного состояния различают аэрозоли с твердой дисперсной фазой (пыль различных радиоактивных веществ, дым) и аэрозоли с жидкой дисперсной фазой (пар, туман или аэрозоли конденсации). Можно отметить два пути попадания аэрозолей внутрь организма. Первый – ингаляционный. Аэрозольные частицы, вдыхаемые с воздухом, осаждаются на внутренней поверхности органов дыхания, затем проникают в кровь и разносятся по организму. Радионуклиды селективно концентрируются в критических органах. Второй путь – так называемые пищевые цепочки. Попавшие в воздух, выбрасываемый через высотные вентиляционные трубы АЭС, радиоактивные аэрозоли оседают на землю, траву, листья, включаются в пищевые цепочки и могут оказаться в организме человека. Опасность внутреннего облучения заключается в длительности воздействия долгоживущих радиоактивных нуклидов, так как у многих из них период полураспада и, соответственно, полувыведения из организма человека достаточно большой [22, 37].



Рис. 1. Основные стадии обращения с радиоактивными отходами (МАГАТЭ) [37]

Целью обеспечения безопасности при обращении с газообразными радиоактивными отходами является предотвращение выброса радиоактивных веществ в окружающую среду в количествах, превышающих допустимые выбросы, установленные в соответствии с Федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии «Обращение с газообразными радиоактивными отходами. Требования безопасности» (НП-021-15). Для достижения данной цели на предприятиях ЯТЦ создаются системы вентиляции и газоочистки. Главными задачами систем вентиляции и газоочистки являются: снижение и поддержание уровня радиоактивного загрязнения рабочих помещений в безопасных допустимых пределах; поддержание минимальной концентрации пыли в рабочих помещениях и уменьшение поверхностного загрязнения; создание нормальных рабочих условий путем нагревания или охлаждения, а также увлажнения или осушения подаваемого воздуха; поддержание направления потока воздуха от объема с меньшим загрязнением к объему с большим загрязнением, что позволяет защитить помещения от неконтролируемого распространения загрязнения; очистка отходящих газообразных потоков перед выбросом в атмосферу [21, 30, 31, 33, 41, 42, 46].

В настоящее время технологические схемы АЭС сконструированы и эксплуатируются таким образом, чтобы обеспечить практически полную изоляцию радиоактивных веществ от биосферы, а возможные их утечки в окружающую среду свести до уровня, допустимого действующими санитарными нормами. Несмотря на это, в результате очистки воды в различных технологических системах реактора, ремонта или замены оборудования, проведения испытаний и других мероприятий на АЭС возникают выбросы и сбросы загрязняющих веществ и образуются отходы [23, 37–39].

В процессе эксплуатации АЭС происходит выработка продуктов деления в топливе. Часть образующихся радиоактивных веществ во всех эксплуатационных режимах работы АЭС, включая проектные аварии, непрерывно или периодически выделяется в атмосферу в виде газообразных радиоактивных выбросов. Основные источники газообразных отходов – система байпасной очистки теплоносителя первого контура (АЭС с реакторами типа ВВЭР) и эжектор конденсатора турбины (АЭС с реакторами типа РБМК). Характер этих выбросов зависит от типа реактора и си-

стемы обращения с этими отходами. В их состав входят инертные радиоактивные газы (ИРГ) (радионуклиды Kr, Xe), пары ^3H и ^3H в газообразной форме, активационные газы (^{41}Ar , ^{14}C , ^{13}N , ^{16}N), галогены и радиоактивные вещества в твердой форме (продукты деления и активации). Дополнительным источником выбросов на АЭС служит вентиляция основных и вспомогательных помещений станции. Перед выбросом через трубу поток вентилируемого воздуха подвергается очистке на аэрозольных и йодных фильтрах [5, 16, 23, 38, 40].

Наиболее эффективным направлением в области защиты атмосферного воздуха от загрязнений является использование малоотходных ресурсо- и энергосберегающих технологических процессов с замкнутыми производственными циклами, исключаящими или резко снижающими выброс вредных веществ в окружающую среду. Однако не всегда удается разработать и внедрить малоотходные технологические процессы, обеспечивающие полную комплексную очистку вредных технологических выбросов в атмосферу, поэтому в настоящее время одним из основных средств предотвращения вредных выбросов остается разработка и внедрение эффективных систем очистки газов [6, 9, 25].

Выделяют два принципиально различных направления в работах по снижению загрязнения окружающей среды: активный и пассивный. Применительно к атомной энергетике активный способ заключается в предупреждении выбросов радиоактивных продуктов в окружающую среду в результате совершенствования технологических схем и оборудования; в создании замкнутого технологического процесса, исключающего выброс этих продуктов в окружающую среду; в отработке и совершенствовании топливных элементов; в создании высокоэффективных систем очистки. Пассивный способ основан на использовании эффекта рассеивания примесей радиоактивных веществ. Промышленные методы очистки газов можно свести к трём группам:

- 1) с помощью твёрдых поглотителей или катализаторов – «сухие методы» очистки;
- 2) с помощью жидких поглотителей (абсорбентов) – жидкостная очистка;
- 3) очистка без применения поглотителей и катализаторов.

К первой группе относятся методы, основанные на адсорбции, химическом взаимодействии с твёрдыми поглотителями и на каталитическом превращении примесей в безвредные или легко удаляемые соединения. Сухие методы очистки обычно

проводят с неподвижным слоем сорбента, поглотителя или катализатора, который периодически должен подвергаться регенерации или замене. В последнее время такие процессы осуществляются также в «кипящем» или движущемся слое, что позволяет непрерывно обновлять очищающие материалы. Жидкостные способы основаны на абсорбции извлекаемого компонента жидким сорбентом (растворителем). Третья группа методов очистки основана на конденсации примесей и на диффузионных процессах (термодиффузия, разделение через пористую перегородку). В зависимости от требуемой степени очистки газа различают грубую, среднюю и тонкую очистку. Однако количественные нормы, отвечающие такой классификации, меняются в зависимости от требований технологии. Требуемая степень очистки газа нередко достигается в несколько этапов, отличающихся условиями или способами проведения процесса [2, 12, 15, 17, 23, 44].

Основным источником выбросов загрязняющих веществ в атмосферу принято считать систему очистки теплоносителя первого контура и конденсатоочистки. Также выбросы возникают в результате дегазации протечек теплоносителя, выхода газов при водообмене в реакторе, при отборе проб воды и при дезактивационных операциях. Выбросы проходят сложную систему обработки: очистка от паров воды и водорода, от аэрозолей и от йода. Для уменьшения активности выбрасываемых газов на АЭС их задерживают на определенное время перед выбросом в трубу, в течение которого происходит распад короткоживущих радионуклидов. Дополнительным источником выбросов на АЭС служит вентиляция основных и вспомогательных помещений станции. Перед выбросом через трубу поток вентилируемого воздуха подвергается очистке на аэрозольных и йодных фильтрах. Для локализации, сбора и обработки газообразных отходов с целью максимального снижения выхода радиоактивных веществ, содержащихся в газообразных радиоактивных отходах АЭС, используется очистное оборудование по обращению с газообразными радиоактивными отходами: аппараты, устройства, фильтры, адсорберы, барботеры и др. Это оборудование устанавливается в вытяжных системах спецвентиляции помещений, в воздушную среду которых возможен выход газообразных радиоактивных отходов, а также в технологических линиях, по которым осуществляется контролируемый сброс газообразных радиоактивных отходов при работе оборудования. В результа-

те очистки газообразных радиоактивных отходов в аппаратах, предусматриваемых на АЭС, образуются твердые РАО – фильтроэлементы, сорбенты, элементы вентиляционных систем и др. Перед выбросом в атмосферу газообразные отходы вначале подвергаются выдержке, в течение которой их активность уменьшается за счет распада короткоживущих нуклидов; охлаждаются в теплообменниках, где отделяется большая часть влаги, содержащей радиоактивные примеси; очищаются в аэрозольных фильтрах; осушаются в цеолитовых фильтрах и освобождаются от радиоактивных примесей в фильтрах-адсорберах, заполненных активированным углем. Эти операции снижают радиоактивность газоаэрозольных выбросов в сотни раз (эффективность очистки – более 99%). Для очистки отходящих газов АЭС используется адсорбционный метод очистки, в частности способ динамической адсорбции радионуклидов криптона и ксенона в колонне, работающей в режиме непрерывного потока. Она обеспечивает очистку более чем в 100 раз, что позволяет поддерживать активность газовых выбросов АЭС значительно ниже норм, установленных санитарными правилами. Для очистки газообразных радиоактивных отходов, содержащих короткоживущие радионуклиды, применяются хроматографические системы, основанные на задержке радионуклидов в угольном адсорбере в течение времени, достаточного для их распада. Для очистки отходящих газов от радиоактивного йода применяют адсорбцию на активированном угле, а также изотопный обмен и химические реакции на импрегнированных углях. Для улавливания твердых аэрозольных частиц применяют высокоэффективные тонковолокнистые фильтры из синтетических волокон или из стекловолокна. Наиболее важными компонентами систем газоочистки являются аэрозольные фильтры и адсорберы [3, 8, 10, 16, 23, 29, 37–39, 46].

На предприятиях атомной отрасли, как правило, используются двухступенчатые системы очистки, состоящие из высокоэффективного аэрозольного фильтра и йодного фильтра-адсорбера. Фильтры-адсорберы в качестве ступени йодной очистки представляют собой, как правило, устройства, в которых сорбент помещен в камеру ящичного типа, разделенную на секции, заполненные гранулами сорбента. В качестве сорбента в большинстве случаев используются гранулы активированных углей размером около 1–2 мм, импрегнированные различными химическими соеди-

нениями, обеспечивающими хемосорбцию молекулярного йода и(или) органических форм йода [18, 28].

Для очистки газообразных РАО, содержащих короткоживущие радионуклиды таких как криптон, ксенон или радон, применяются хроматографические системы, основанные на задержке радионуклидов в угольном адсорбере в течение времени, достаточного для их распада. Коэффициент адсорбции криптона и ксенона на увлажненном угле существенно ниже, чем на сухом, поэтому в газоочистную систему включают узел сушки. Поведение угольных адсорберов имеет динамический характер и эффективность очистки падает со временем из-за продолжающегося осаждения нерадиоактивных компонентов воздуха (влаги, органических и неорганических паров и газов). Старение и отравление активированного угля могут также являться причинами деградации фильтров. Поэтому очень важно производить периодическое испытание фильтров [13, 38].

Для очистки отходящих газов от радиоактивного йода применяют адсорбцию на активированном угле, а также изотопный обмен и химические реакции на импрегнированных углях. Используют йодиды металлов, такие как KI, PbI₂ или Cu I₂, а также соединения, вступающие в химическую реакцию с йодом и метилиодидом, такие как AgNO₃ или триэтилендиамин [36, 38, 46].

Рассматривая фильтрование радиоактивных аэрозолей подробнее, следует отметить, что содержащиеся в промышленных газах взвешенные частицы чрезвычайно разнообразны по своему составу, агрегатному состоянию, а также дисперсности. Очистка газов от взвешенных частиц (аэрозолей) достигается механическими и электрическими средствами. Механическую очистку газов производят: воздействием центробежной силы, фильтрацией сквозь пористые материалы, промывкой водой или же другой жидкостью; иногда для освобождения от крупных частиц используют их силу тяжести. Механическую очистку газов обычно проводят методами сухой газоочистки (аппарат циклон), фильтрации и мокрой газоочистки. Электрическая очистка газов применяется для улавливания высокодисперсных частиц пыли или туманов и обеспечивает, при известных условиях, высокий коэффициент очистки. Осаждение аэрозолей осуществляется электрическим полем высокого напряжения (до 50000 вольт), что вызывает ионизацию газа; частицы аэрозолей получают дополнительный заряд

и осаждаются на противоположно заряженном электроде. Также для фильтрации запылённых газовых потоков используются различные ткани из натуральных или искусственных волокон (хлопок, шерсть, асбест, стекловолокно, базальтовое волокно, лавсан и др.). Фильтры такого типа называются тканевыми (рукавными) фильтрами. Размеры осаждённых частиц пыли в порах ткани и на её поверхности часто во много раз меньше среднего диаметра пор фильтровальной ткани. Это объясняется тем, что осаждение частиц в основном происходит в результате их столкновения с элементами ткани под действием сил инерции, электрических зарядов и других факторов. Однако пока фильтр частично не забит пылью, он мало эффективен по отношению к мелким частицам. Тканевые фильтры служат для улавливания весьма тонких фракций пыли и имеют высокий коэффициент очистки [7, 17, 29].

Помимо тканевых, применяются фильтры из специального картона, пористой бумаги, ваты, пористой керамики, металлокерамики и др. Конструкции их весьма разнообразны. Некоторые из них не имеют приспособлений для периодического удаления пыли, и при достижении определённой величины гидравлического сопротивления фильтрующий материал заменяется. Удаление пыли из некоторых фильтров производится периодической обратной продувкой или промывкой, чаще всего водой. Для повышения эффекта пылеулавливания фильтры с насадкой из крупных материалов (керамических и металлических колец, гофрированной стальной сетки и др.) смачивают минеральным маслом. Промышленные фильтры подразделяются на аппараты периодического и непрерывного действия, а также по признаку направлений движения фильтра и действия силы тяжести. Эти направления могут совпадать, быть противоположными или взаимно перпендикулярными [1, 12, 29, 32].

Наиболее простым, надёжным и экономичным способом очистки воздуха и технологических газов от радиоактивных аэрозолей являются волокнистые фильтры. Они получили повсеместное распространение. Разработаны и применяются фильтры из волокон целлюлозы, лавсана, полипропилена, полиакрилонитрила, из стеклянных и кварцевых волокон, базальта и т.п. Особое место среди полимерных материалов занимают фильтры Петрянова (ФП). Их отличает высокая эффективность задержки мельчайших, в том числе наиболее проникающих частиц при сравнительно низком гидродинамическом сопро-

тивлении. Выпускаются различные сорта материалов ФП, обладающих, радиационной стойкостью, наличием электрических зарядов, стойких к воздействию кислот, щелочей, органических растворителей, выдерживающих высокие температуры и механические нагрузки. Альтернативой до сих пор применяемым ФП-фильтрам являются аэрозольные фильтры на основе стекловолокон. Фильтры, использующие стекlobумагу из ультратонких стекловолокон, имеют более высокий класс по эффективности. Они термо- и огнестойки и сохраняют показатель эффективности при относительно высокой влажности фильтруемой среды и наличии в ней паров щелочей и кислот [20, 38].

Для улавливания твердых аэрозольных частиц применяют высокоэффективные тонковолокнистые фильтры из синтетических волокон или из стекловолокна, называемые НЕРА или «абсолютные фильтры». Существует большое число модификаций абсолютных фильтров, удовлетворяющих самым разнообразным требованиям. Как правило, время службы фильтра определяется ростом его сопротивления по мере увеличения количества улавливаемых аэрозолей, а не уменьшением эффективности удержания частиц. Так как абсолютные фильтры имеют ограниченную ёмкость по пыли, перед ними часто устанавливаются предварительные фильтры грубой очистки, улавливающие пыль [13, 38, 46].

Типичный прямоугольный фильтр для аэрозолей показан на рис. 2. Чтобы обеспечить очистку больших потоков воздуха,

такие фильтры обычно объединяют, параллельно, в блоки, состоящие из нескольких экземпляров.

Фильтрация аэрозолей основана не только на механическом удержании сравнительно крупных частиц, но и на улавливании субмикронных частиц с помощью сил адгезии. Известно как минимум шесть различных механизмов захвата аэрозольных частиц волокнами – отсеивание, зацепление, диффузионный, инерционный, электрический и гравитационный. Эффективность фильтрации является сложной функцией распределения частиц по размерам, скорости воздушного потока и других параметров [14, 15].

Преимущества материалов ФП, обусловленные эффективной управляемостью и всеядностью технологии электроформования к составу сырья в исходных системах полимер – растворитель, проявляются в их микроструктурных, механических, физико-химических и, как следствие, – в функциональных, конструкционных и эксплуатационных свойствах, а также в возможности их оптимизации по целям высокоэффективной очистки газовых аэрозолей (ВОГА). Благодаря разнообразию волокнообразующих полимеров и их физико-химических характеристик, материалы ФП значительно легче, чем другие их волокнистые аналоги, адаптировать к различным, часто весьма жестким условиям эксплуатации – повышенным или пониженным температурам, химически агрессивной среде, ионизирующему излучению, гидродинамическим нагрузкам и особенно к совместному воздействию этих факторов [4].

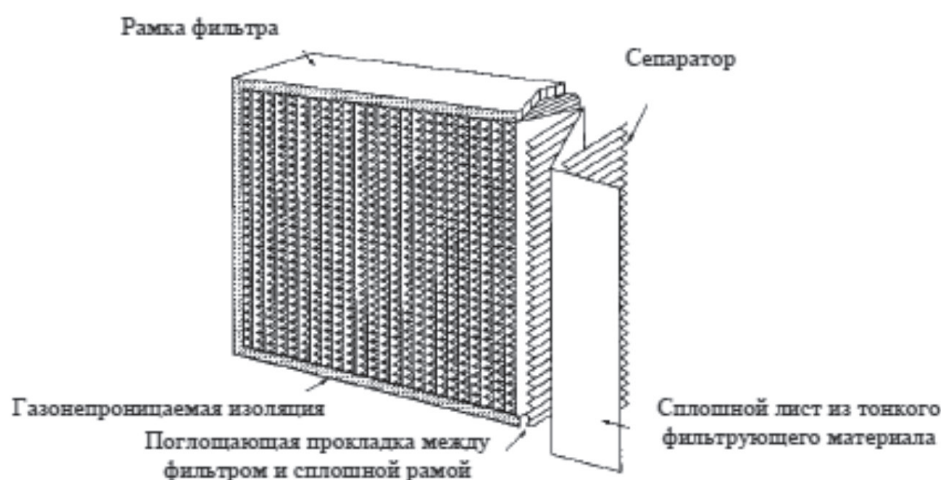


Рис. 2. НЕРА-фильтр для аэрозолей [45]

К недостаткам материалов ФП следует отнести прежде всего малый срок службы, обусловленный стеканием электростатического заряда и, как следствие, уменьшение эффективности фильтрации. Срок службы фильтров на основе материалов ФП поэтому не превышает 2000 часов. Также к недостаткам можно отнести общую для всех высокоэффективных фильтрующих материалов неизотропность их микро-структуры. Следствием является взаимное влияние волокон на характер обтекания их потоком газа, что в конечном счете приводит к уменьшению гидродинамического сопротивления волокнистого материала и эффективности улавливания им аэрозольных частиц. Индивидуальным недостатком материалов ФП является ограничение нижнего предела диаметра волокон величиной 0,3 мкм [4, 11, 24, 47].

Проблема обращения с радиоактивными отходами АЭС, в том числе и газовыми, оказывает существенное влияние на развитие ядерной отрасли. В настоящее время используются различные методы очистки газовых сдувок АЭС, такие как фильтрование, осаждение, однако создание безопасных и экономичных установок для обезвреживания радиоактивных технологических газов АЭС является задачей комплексной. Решать ее нужно не только за счет совершенствования таких установок, но и совершенствования и создания основного и вспомогательного оборудования АЭС, имеющих минимум технологических сдувок радиоактивных газов [34]. Следует отметить, что подобные меры, безусловно, позволяют, на современном этапе, получить максимальный эффект от процесса экологизации хозяйственной деятельности за счет постоянного и неуклонного внедрения систем управленческих, технологических и других решений, позволяющих повышать эффективность использования естественных ресурсов при улучшении или хотя бы при неизменности качества окружающей природной среды [43].

Список литературы

1. Атомная промышленность и наука в атомной сфере [Электронный ресурс] // Проблемы обеспечения безопасного хранения ОЯТ. – Режим доступа: http://matkb.ru/pauka_atom/promatom90.htm (дата обращения: 26.12.2016).
2. Атомная энергетика. Проблема снижения выбросов АЭС [Электронный ресурс] // Физика: портал – Режим доступа: http://ingraft.ru/atom_stan/reaktor71.htm (дата обращения: 26.12.2016).
3. АЭС ВВЭР [Электронный ресурс] // Важная экология: сайт – Режим доступа: <http://www.rightecology.ru/giescos-679-2.html> (дата обращения: 17.10.2016).
4. Басманов П.И., Кириченко В.Н., Филатов Ю.Н., Юров Ю.Л. Высокоэффективная очистка газов от аэрозолей фильтрами Петрянова. – М.: Наука, 2003. – 271 с.
5. Бекман И.Н. Ядерная индустрия. Курс лекций / И.Н. Бекман. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 867 с.
6. Буренин В.В. Защита атмосферного воздуха от производственной пыли, токсичных паров и газов // Экология и промышленность России. – 2004. – № 9. – С. 25–29.
7. Выбросы атомными станциями радиоактивных веществ [Электронный ресурс] // Физика: портал – Режим доступа: <http://kurspro.ru/oshistka/vibros85.htm> (дата обращения: 26.12.2016).
8. Газоаэрозоли на АЭС – что это? [Электронный ресурс] // сайт «Атомная энергетика и экология» – Режим доступа: http://www.ecoatominf.aanet.ru/publishs/VAES/VAES_27.htm (дата обращения: 25.02.2017).
9. Гигина О.С. Методы и технические средства защиты атмосферного воздуха от загрязнения и очистки отходящих газов / О.С. Гигина. – Уфа, 2010. – 78 с.
10. Киров В.С. Атомные электрические станции: Учебное пособие. – Одесса: ОНПУ, 2010. – 216 с.
11. Кириш А.А., Будыка А.К., Кириш В.А. Фильтрация аэрозолей волокнистыми материалами ФП // Российский химический журн. – 2008. – Т. 52. № 5. – С. 97–101.
12. Короткова В.Е. Анализ промышленных методов очистки воздуха от радиоактивных аэрозолей / В.Е. Короткова, С.И. Черняев // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в ВУЗе: материалы ВНТК. – 2016. – Т. 2. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. – С. 35–38.
13. МАГАТЭ. Технологические и организационные аспекты обращения с радиоактивными отходами: Учебное пособие. Вена: Международное агентство по атомной энергии, IAEA-TCS-27, 2005. – 230 с.
14. Маркелова Н.П., Кадомцев Г.М., Черняев С.И. Анализ технологии высокоэффективной фильтрации воздуха и ключевых особенностей ее обеспечения // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 3–2. – С. 263–267.
15. Маркелова Н.П., Кадомцев Г.М., Черняев С.И. Некоторые особенности контроля высокоэффективных воздушных фильтров // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 11. – С. 156–161.
16. Матушкина Е.В., Сажин В.Б., Козляков В.В., Хайри А.Х., Терещук В.С., Панфилов А.С., Попов И.А., Селдинов И. Особенности воздействия на окружающую среду различных стадий ядерного топливного цикла и проблемы безопасности АЭС // Успехи в химии и химической технологии. 2011. Т. 25. № 7 (123). с. 104–121. [Электронный ресурс] Открытый доступ на E-library <http://elibrary.ru/item.asp?id=20230065> (дата обращения: 25.02.2017).
17. Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности: Конспект лекций [Электронный ресурс] // Хелпикс.Орг – Интернет помощник. – Режим доступа: <http://helpiks.org/5-48054.html> (дата обращения: 03.12.2016).
18. Меркушкин А.О. Сравнительная оценка эффективности улавливания СНЗ композиционным сорбентом на основе пенополиуретана с различными формами углерода / А.О. Меркушкин, А.В. Обручиков, Й.А. Мин // Успехи в химии и химической технологии. – 2013. – № 6. – С. 42–46.
19. Методы спецгазоочистки радиоактивных газов и аэрозолей на АЭС [Электронный ресурс] // Электронная библиотека студента: сайт «Библиофонд» – Режим доступа: <http://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=728590> (дата обращения: 25.01.2017).
20. Новое фильтрационное оборудование для АЭС [Электронный ресурс] // АэроФилтр: сайт – Режим доступа: <http://aerofiltr.ru/company/publishing/novoe-filtracionoe-oborudovanie-dlja-ayes.html> (дата обращения: 01.12.2016).
21. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций ОПБ 88/97, НП-001-97 (ПНАЭ Г-01-011-97). – Москва, 1998.
22. Основные пути проникновения радионуклидов в организм [Электронный ресурс] // Учение.net: Портал для

студентов-медиков – Режим доступа: <http://uchenie.net/19-osnovnye-puti-proniknoveniya-radionuklidov-v-organizm/>. (дата обращения: 12.12.2016).

23. Особенности воздействия на окружающую среду различных стадий ядерного топливного цикла и проблемы безопасности на АЭС / Е.В. Матушкина и др. // Успехи в химии и химической технологии. – 2011. – № 7(123). – С. 104-121.

24. Отраслевой стандарт «Фильтры аэрозольные с фильтрующим материалом ФП» (ОСТ 95 4-80).

25. Очистка отходящих газов от паров органических растворителей [Электронный ресурс] // Электронная библиотека студента: сайт «Библиофонд» – Режим доступа: <http://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=579580> (дата обращения: 25.01.2017).

26. Пайметов И.В. Разработка текстильных фильтров специального назначения, применяемых в ядерной энергетике: дис. ... канд. тех. наук: 05.19.02 / И.В. Пайметов. – Дмитровград, 2015. – 154 с.

27. Патент 2036698 Рос. Федерация, МПК6 B01D 53/02, G21F 9/02. Адсорбирующий фильтрующий материал, способ его получения и способ очистки газов от радиоактивных веществ / Дука А.В., Григорьев А.Ю., Виленский М.Г.; Акционер, о-во закр. типа «Научно-производственный комплекс «Матекс». – № 93049173/26; заявл. 21.10.1993; опубл. 09.06.1995, Бюл. 16.

28. Патент 2192914 Рос. Федерация, МПК7 B01D39/16, G21F9/02. Аэрозольный сорбирующий фильтр и способ его изготовления / Басалаев Н.А., Бережной В.М., Зубарев В.В., Иванов В.Д., Плотников В.Г., Рыбкин Н.И., Земсков А.А., Клинин Е.Н., Облогин В.А., Решетников Е.А., Слепоскоп Ю.И.; Закрытое акционерное общество «Прогресс-Экология». – № 2000132698/12; заявл. 27.12.2000; опубл. 20.11.2002, Бюл. 32.

29. Предотвращение загрязнения окружающей среды выбросами АЭС [Электронный ресурс] // Введение в экологию энергетики: сайт – Режим доступа: <http://adlingva.ru/energo.html> (дата обращения: 04.12.2016).

30. Приказ Ростехнадзора от 05 августа 2014 г. № 347 «Об утверждении федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. Общие положения».

31. Приказ Ростехнадзора от 25.06.2015 № 244 «Об утверждении федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Обращение с газообразными радиоактивными отходами. Требования безопасности».

32. Прикладная ядерная космофизика: Учебное пособие / К.А. Боярчук и др.; под ред. А.М. Гальпера. – М.: МИФИ, 2007. – 216 с.

33. Пронкин Н.С. Обеспечение безопасности обращения с радиоактивными отходами предприятий ядерного топливного цикла / Н.С. Пронкин. – М.: Логос, 2012. – 420 с.

34. Пути дальнейшего совершенствования систем отчистки технологических газов АЭС [Электронный ресурс] // Важная экология: сайт – Режим доступа: <http://www.rightecology.ru/riecos-680-1.html> (дата обращения: 25.02.2017).

35. Радиационная гигиена: учеб. для вузов / Л.А. Ильин, В.Ф. Кириллов, И.П. Коренков. – 2010. – 384 с.

36. Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие» (обзор). Часть 5. Средства улавливания и анализа аэрозолей. Радиоактивные аэрозоли в легких / Б.И. Огородников, Э.М. Пазухин. – Чернобыль, 2006. – 56 с.

37. Радиоактивные отходы АЭС и методы обращения с ними: монография / А.А. Ключников, Э.М. Пазухин, Ю.М. Шигера, В.Ю. Шигера; под ред. Ю.М. Шигеры. – Чернобыль: ИПБ АЭС НАН Украины, 2005. – 485 с.

38. Радиоактивные отходы АЭС: информационный бюллетень / ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны» НАН Беларуси. – 2010. – №10-11. – 8 с.

39. Радиоактивные отходы АЭС: источники, классификация и обработка [Электронный ресурс] // Информационный портал: сайт – Режим доступа: <http://anastasia-myskina.ru/ekologiya/okruzhayushchaya-sreda/61/5107-5-2-radioaktivnye-otxody-aes-istochniki-klassifikaciya-i-obrabotka-nbsp.htm> (дата обращения: 25.02.2017).

40. Сравнительный анализ газоаэрозольных выбросов АЭС и ВВЭР и РБМК [Электронный ресурс] // Студенческая библиотека онлайн: сайт «Studbooks.net» – Режим доступа: http://studbooks.net/1243077/ekologiya/sravnitelnyy_analiz_gazoazernolnyh_vybrosov_aes_i_vver_i_rbm_k (дата обращения: 25.02.2017).

41. Федеральный закон от 11 июля 2011 г. N 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» Российская газета – Федеральный выпуск №5529 (153) 15 июля 2011 г.

42. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Обращение с газообразными радиоактивными отходами. Требования безопасности» (НП-021-15) [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс: сайт – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_183507. (дата обращения: 12.12.2016).

43. Черняев С.И. Развитие экологического маркетинга в России и за рубежом [Текст] / С. И. Черняев // Экономика. Управление. Право. – М., 2013. – № 5. – С. 3–6.

44. Электрофильтры. Классификация. Схемы. Сухие и мокрые электрофильтры. Конструкции. Узлы и детали [Электронный ресурс] // Интернет помощник: сайт Хелпикс.Орг – Режим доступа: <http://helpiks.org/5-48054.html> (дата обращения: 25.02.2017).

45. НЕРА-фильтр для аэрозолей [Электронный ресурс] // Конспекта.Нет: сайт – Режим доступа: <http://konspekta.net/studopediainfo/baza10/1581170486977.files/image312.jpg> (дата обращения: 25.12.2016).

46. Treatment of Radioactive Gaseous Waste / International Atomic Energy Agency. – IAEA, Vienna, 2014. – 66 p.

47. Zhonglin X. Fundamentals of Air Cleaning Technology and Its Application in Cleanrooms / X. Zhonglin. – Beijing, China: People's Republic, 2014. – 881 p.