

Д.В. Аннопольский, к.т.н.; С.И. Бабушкина, м.н.с.; В.Ф. Клепиков, д.ф.-м.н., член-кор. НАН Украины, В.В. Литвиненко д.т.н.; Е.А. Мелякова, научн. сотр; Е.М. Прохоренко к.ф.-м.н., докторант; М.А. Сагайдачный – м.н.с. (Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины) г. Харьков, Украина

## Перспективы использования радиационных методов очистки дымовых газов и диагностики оборудования для топливоподготовки

*В работе рассмотрены перспективы использования методов очистки дымовых газов с использованием источников полей ионизирующего и электромагнитного излучения. Сделан анализ мирового опыта применения данных методов очистки. Предложен комплексный подход к дистанционной диагностике оборудования тепловых станций, основанный на тепловом методе неразрушающего контроля.*

**Ключевые слова:** радиационная технология, оксид серы, оксид азота, ускоритель, ТЭС, термограмма.

*В роботі розглянуто перспективи використання методів очистки димових газів з використанням джерел іонізуючого та електромагнітного випромінювання. Зроблено аналіз світового досвіду застосування даних методів очистки. Запропоновано комплексний підхід до дистанційної діагностики устаткування теплових електростанцій, що ґрунтується на термографічному методі неруйнівного контролю.*

**Ключові слова:** радіаційна технологія, оксид сірки, оксид азоту, прискорювач, ТЕС, термограма.

*Prospects of application of the fuel gas scrubbing technologies based on using of ionizing and electromagnetic fields sources are considered. Examination of world experience of such technologies applications has been carried out. Complex distant heat power plant equipment control technology based on the method of heat nondestructive control is proposed.*

**Keywords:** radiation technology, sulfur oxide, nitrogen oxide, accelerator, heat power plant, thermogram.

Очевидно, что развитие отраслей экономики влечет за собой обострение проблем воздействия на окружающую среду. Это особенно актуально для Украины с характерной для нее высокой долей сырьевого и энергетического секторов. Безусловно, перспективная тенденция замены импортного газа отечественным углем связана с необходимостью совершенствования систем очистки дымовых газов. Основным источником загрязнения атмосферы являются тепловые электростанции (ТЭС), работающие на угольном топливе. Валовой выброс загрязняющих веществ, поступающих в атмосферу вместе с отходящими газами от ТЭС, составляет порядка 85 млн. т/год. Это прежде всего золы, недогоревшие частицы топлива, сернистый и серный ангидриды, оксиды азота и углерода. Содержание этих компонент зависит, прежде всего, от марки топлива, а также соблюдения технологии подготовки и сжигания. Следует заметить, что при сжигании природного газа токсичные оксиды азота и углерода попадают в атмосферу в значительно меньшем количестве [1].

Для иллюстрации того, как зависят объемы выбросов оксида серы и

оксида азота при сжигании углей различных марок и газа рассмотрим на примере котлоагрегата ТП-100 (паропродуктивность 640 т/год). Данное сравнение приведено в табл. 1.

Здесь  $E$  – это специфический показатель эмиссии и является удельной величиной выброса, которая определяется для конкретной энергетической установки с учетом индивидуальных характеристик топлива, конкретных характеристик процесса сжигания и мероприятий по снижению выбросов загрязняющих веществ.

Очевидно, что сжигание углей более низкого качества требует использование более дорогостоящего очистительного оборудования. Таким образом, возникает задача поиска компромисса между ценой на горючее топливо, его рыночной доступностью, последствиями воздей-

ствия на окружающую среду (как экологическими, так и финансовыми) и системой мероприятий по снижению их последствий.

Известно [3], что на ТЭС применяются различные способы очистки – электрофильтры, батарейные циклоны, полые вихревые аппараты, очистка с помощью мембран и др. Вместе с тем, для очистки дымовых газов на молекулярном уровне, обеспечивающем удаление оксидов серы и азота, требуются дополнительные технические средства, принцип работы которых основан на наноразмерном воздействии. К таким средствам относят источники излучения различного спектра и реализуемые на их основе радиационные технологии очистки дымовых газов [4]. Не смотря на то, что такой подход является сравнительно новым, в мире происходит его апробация на действующих промыш-

**Таблица 1. Выбросы оксидов серы и оксидов азота при сжигании различных видов топлива без учета очистительного оборудования [2]**

Название топлива	$E_{SO_2}, m / год$	$E_{NO_2}, m / год$
Уголь марки АШ	5109,2	1542,0
Уголь марки ТР	4684,4	1060,5
Природный газ	101,9	365,3

ленных объектах и оптимизация в рамках научно-исследовательских работ. Поскольку существует ряд проблем, препятствующих достижению максимальной степени очистки и, соответственно, широкого применения. К ним относятся: установление значения поглощенной дозы, достаточной для радиационно-химических превращений, управление параметрами зоны радиационного воздействия (пространственное распределение температуры отходящих газов после их охлаждения). Кроме того, ускорители электронов со значениями мощности порядка сотен кВт изготавливаются в ограниченном числе стран, либо же могут производиться под заказ. Внедрение технологий на основе источников ионизирующих излучений строго регулируется государственными органами надзора в сфере ядерной и радиационной безопасности согласно международным и национальным нормам. Таким образом, возможность использования радиационных технологий в той или иной отрасли предполагает наряду с научно-техническими составляющими необходимость анализа ряда аспектов нормативной базы, сырьевых ресурсов, научно-исследовательской базы, кадрового потенциала и др., которые характерны для конкретной страны. Следует заметить, что радиационные технологии являются одними из наиболее активно развивающихся в мире, темпы роста их внедрения составляют порядка 10% в год, поэтому данное направление безусловно актуально для Украины

### **Принципы радиационной очистки газовых выбросов**

Существенный потенциал для повышения эффективности радиационных методов представляет использование появивающихся источников ультрафиолетового излучения, а также внедрение средств контроля производственного процесса на основе регистрации ИК-излучения.

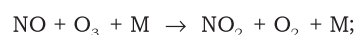
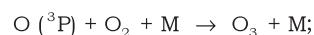
Наиболее очевидной иллюстрацией отрицательных последствий выбросов в атмосферу оксида серы и оксида азота может служить явление, получившее название кислотный дождь. Его механизм состоит в том, что в результате цепочки физико-химических превращений под действием солнечного ультрафиолета и последующего взаимодействия возбужденных молекул с парами атмосферной воды, образуется дисперсная кислотная среда. Разработанная в Японии в 80-х годах прошлого столетия радиацион-

ная технология очистки дымовых газов [4], можно сказать, являлась моделью естественных процессов очистки атмосферы от окислов серы и азота. В качестве источника излучения использовался линейный ускоритель электронов (1-2 МэВ, 1.2 кВт). При проведении опыта в камеру, где проводилось облучение дымовых газов, впрыскивалась диспергированная вода. Отличием от естественных процессов было то, что образовавшиеся пары кислот осаждались не на поверхности земли, а конденсировались на твердых частицах отходящих газов и в результате химической реакции образовывались вещества на основе сульфатов и нитратов, пригодные для использования в качестве минеральных удобрений.

Позже этот процесс был исследован в США, Германии, Японии, Польше, Болгарии и Китае [3]. Новые технические решения и способы были разработаны в течение последних двух десятилетий. В ряде стран (Япония, Китай, Польша, Германия) эксплуатируются несколько пилотных установок производительностью 10-20 тыс. м<sup>3</sup> газов в час и 6 промышленных установок производительностью более 100 тыс. м<sup>3</sup> в час. Известно, что общая проблема повышения эффективности радиационных технологий состоит в оптимизации условий облучения, обеспечении равномерности распределения поглощенной дозы в объеме облучаемого объекта. Эта задача особенно остро возникает в случае облучения перемешиваемых сред, к которым относятся потоки отходящих газов. Равнозначна также задача обеспечения однородности температуры и степени увлажнения газовой смеси – факторов, определяющих глубину радиационно-химических превращений при облучении электронным пучком, и, следовательно, эффективность удаления оксидов серы и азота. Вместе с тем была достигнута достаточно высокая эффективность удаления оксидов серы и оксидов азота (до 95% для серы и до 70% для NO<sub>x</sub>) при этом стоимость затрат частично компенсировалась получаемыми высококачественными минеральными удобрениями.

Основные компоненты дымовых газов – N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub>. NH<sub>3</sub> – как компонент, способствующий удалению оксидов азота и серы. После увлажнения и снижения температуры дымовых газов, они направляются в реакционную камеру, где происходит облучение

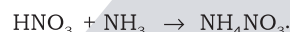
электронным пучком. В результате облучения быстрые электроны взаимодействуют с газом, создавая различные радикалы, ионы, вторичные электроны, которые также способны инициировать каскад реакций. Основные сформированные активные частицы включают: e, N<sub>2</sub><sup>+</sup>, N<sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>, O<sup>+</sup>, H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, OH<sup>+</sup>, H<sup>+</sup>, CO<sub>2</sub><sup>+</sup>, CO<sup>+</sup>, N<sub>2</sub><sup>\*</sup>, O<sub>2</sub><sup>\*</sup>, N, O, H, OH, и CO. В случае высокой концентрации паров воды окислительные радикалы OH<sup>\*</sup>, HO<sub>2</sub><sup>\*</sup> и ионы O(<sup>3</sup>P) являются наиболее важными продуктами. Эти частицы принимают участие в различных ионно-молекулярных реакциях, реакциях нейтрализации, димеризации [5]. SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> и NH<sub>3</sub> вступают в реакцию с радикалами N, O, OH, и HO<sub>2</sub>. Аммиак вводится перед облучением камеры. Там происходит несколько видов окисления NO [6]:



После окисления NO<sub>2</sub> преобразуется в азотную кислоту, взаимодействуя с OH<sup>\*</sup>, в соответствии с реакцией [6,7]:

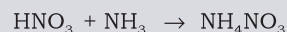


HNO<sub>3</sub> реагирует с NH<sub>3</sub>, в результате чего получается аммиачная селитра:

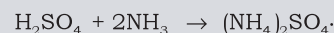
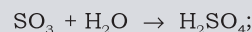
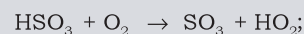


Небольшое количество NO снижается до атмосферного азота. Происходит по различным механизмам окисление SO<sub>2</sub> в зависимости от условий.

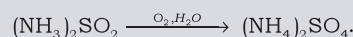
Радиационно-термические реакции протекают через окисление SO<sub>2</sub> в реакции [6,7]:



Затем HSO<sub>3</sub> образует сульфат аммония:



Тепловая реакция основана на следующих процессах:



Полный выход  $\text{SO}_2$  может быть записан в таком виде [6-8.]:

$$\eta^{SO_2} = \eta_1(\varphi, T) + \eta_2(D, \alpha^{NH_3}, T).$$

Очевидным является, присутствие двух факторов, определяющих радиационно-химический выход: поглощенной дозы и температуры. Следует заметить, что определение поглощенной дозы, которую получает элементарный объем в газовом потоке, как и определение временной динамики распределения температуры в объеме, заполненном потоком газа, являются сложными техническими задачами, решение которых требует использования как специализированных средств измерения, так и расчетных методов.

#### **Выбор источника излучения для радиационно-химических реакций**

Расчет оптимальной мощности источника излучения для реакции радиационно-химических процессов очистки дымовых газов основывается на данных о содержании загрязняющих веществ. Для того чтобы объемы выбросов оксидов серы и оксидов азота при работе котла паропродуктивностью 640 т/год были на допустимом уровне, при дозе излучения в 10 кГр мощность будет 1,6 кВт (уголь АШ) для оксида серы и 0,49 кВт для оксида азота. Для угля марки ТР: 1,5 кВт – оксид серы и 0,34 кВт для оксида азота. При дозе в 50 кГр: для оксида серы – 8,1 кВт, 2,4 кВт – для оксида азота (уголь АШ); для оксида серы – 7,4 кВт, для оксида азота 1,7 кВт. На сегодняшний день наиболее доступными и адаптированными к технологическим требованиям являются ускорители типа ЭЛВ (производства Института ядерной физики имени Г.И. Будкера, Новосибирск).

В основе метода радиационной очистки лежит создание максимально эффективного метода очистки дымовых газов, но при этом составляющие системы очистки должны быть независимыми друг от друга, чтобы при необходимости была возможность использовать только часть этапов очистки. Независимость друг от друга составляющих системы очистки позволяет снизить расходы на электронно-лучевые средства, что позволит радиационному методу очистки конкурировать в экономическом аспекте с другими методами очистки.

Поставленная задача решается благодаря тому, что для очистки дымовых газов используется ряд звеньев – очистителей, некоторые из

них могут использоваться отдельно друг от друга. Это может быть необходимо при использовании разного топлива. Например, при сжигании природного газа затрачивается значительно меньше энергии, и используются менее интенсивные приборы, нежели при сжигании угля. При таком рациональном использовании стоимость удельной единицы установленной мощности излучения зависит от общей мощности ускорителя. Чем выше общая мощность ускорителя, тем выше цена единицы установленной мощности, но тем дешевле 1 кВт мощности.

Очистка дымовых газов с использованием облучения включает в себя следующие этапы [9]: очистка с помощью циклона (улавливаются зола), откуда твердые частицы могут быть выведены из пылесборника на непрерывной или периодической основе, в зависимости от качества топлива. После циклона поток газов попадает в дымоход, где насыщается влагой и азотом и попадает в реакционную камеру облучения. Далее, в зависимости от качества топлива (например, используется малотоксичный природный газ или более токсичный каменный уголь) происходит либо ультрафиолетовое облучение, либо облучение электронным пучком. Основной задачей облучения, как в первом так и во втором случае является эффект возбуждения электронных оболочек молекул вредных веществ, которые содержатся в дымовых газах.

Образованные в реакционной камере соли сульфата, нитратные соли и аммиак выходят в виде водного раствора. В трубопроводе форсунки для распыления воды расположены так, чтобы можно было смыть накопленные нитраты аммония и сульфаты в камере.

Последним этапом очистки дымовых газов является электрофильтр. Между двумя плоскими осаждающими электродами расположен ряд коронирующих проводов. В промежуток между коронирующими электродами поступает запыленный газ и в поле коронного разряда, который возникает при подаче напряжения, частицы заряжаются, а далее под действием поля двигаются в полость для накопления осадка. После электрофильтра, поток, уже очищенного газа попадает в дымоход и в атмосферу.

Важнейшую роль в радиационных технологиях играет техника безопасности. Основную радиационную опасность в установках представляют: выведенный пучок электронов; рассеянные электроны;

тормозное излучение; фотонейтроны; наведенная  $\beta$ - и  $\gamma$ -активность окружающих веществ (появляется в заметных количествах лишь при энергии ускоренных электронов свыше 5 МэВ). Для максимально возможного сокращения негативного воздействия на персонал необходимо руководствоваться соответствующими правилами и нормами радиационной безопасности на предприятии.

#### **ИК-радиометрия оборудования для подготовки и сжигания топлива**

Для исправного функционирования оборудования ТЭС (котлоагрегатов, оборудования для подготовки сжигания топлива, емкостей для хранения топлива и др.), нужно проводить диагностический контроль. К наиболее перспективным методам диагностики относят метод инфракрасного (ИК) – радиометрического контроля. Этот метод позволяет выявить дефект на ранних стадиях его развития в процессе эксплуатации оборудования без снятия напряжения и прекращения подачи энергоносителей. Использование ИК-радиометрического контроля дает возможность получить результаты максимально быстро и точно, что позволяет сократить эксплуатационные затраты и повысить безопасность и надежность работы оборудования.

Метод диагностики с использованием ИК-радиометрического контроля пригоден не только для контроля состояния основного оборудования ТЭС, но и для диагностического обслуживания дорогостоящего оборудования (такого как ускоритель).

Проведение ИК-радиометрического контроля позволяет выполнить проверку герметичности. Сюда включаются: герметичность различных вакуумных линий и трубопроводов, находящихся под давлением, проверка вакуумных уплотнений, контроль функционирования вентиляционных систем. Изменение температуры в зоне дефекта основывается на изменении скорости движения газа или жидкости. Вторым фактором, который способствует повышению эффективности обнаружения дефектов герметичности, является расширение газа, сопровождающееся понижением температуры при попадании газа из области с высоким давлением в область с более низким давлением. Даже при незначительных дефектах трубопровода, наполненного жидкостью, изменяются излучательные свойства



поверхности, что фиксируется на термограмме. При помощи тепловизионной техники определяется термоаномальная зона, в которой присутствует градиент температуры [10]. Полная энергетическая светимость тела определяется по закону Стефана-Больцмана:

$$W_{\lambda} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot \cos \alpha, (1)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент излучения,  $\sigma=5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>К<sup>4</sup> – постоянная Стефана-Больцмана,  $T$  – температура в градусах Кельвина,  $\alpha$  – угол между тепловизором и нормалью к плоскости исследуемого объекта.

Задача повышения герметизации требует пристального внимания. Из опыта практической деятельности известно, что для повышения производительности, например, шаровых барабанных мельниц (ШБМ) на 10-15%, достаточно малозатратных мероприятий по герметизации системы приготовления пыли. Снижение подсоса холодного воздуха в систему транспортировки и подачи угольной пыли уменьшает потребление высокоактивного топлива подсветки (газ или мазут) и способствует более полному сгоранию пылеугольной смеси, что еще повышает эффективность работы на 7%.

Для проверки состояния работоспособности было проведено термографическое обследование ШБМ в области расположения системы подачи смазки и крышки подшипников оси. Путем анализа термограммы мы можем провести экспресс диагностику (скрининг) поверхности ШБМ на основании градации температур по цвету (градация указана на термограмме). Для того чтобы сделать выводы об исправности либо же неполадках оборудования необходимо знать оптимальные температуры при нормальном его функционировании.

Фотография ШБМ и термограммы, представлены на рис. 1.

Термограммы, представленные на рис. 1, позволяют сделать вывод о том, что точки с аномальными температурными зонами отсутствуют. На рис. 1 изображена система подачи смазки, которая значительно холоднее чем сама мельница, в данном случае это не является отклонением от нормы. Дополнительно, проводилась обработка термограмм при помощи численных методов, предложенных в работе [11]. Анализ полученных результатов дает возможность сделать вывод, что ШБМ исправна и нормально функционирует.

Дополнительно был произведен ИК-радиометрический контроль ШБМ с другого ракурса в районе крепления. Фото тела мельницы и термограммы представлены на рис. 2.

Анализ дефектов проводился так же, как и в предыдущем случае. На термограмме обнаружены точки, в которых температура имеет достаточно высокое значение. Они на термограмме имеют более светлый цвет. Максимальный нагрев объекта наблюдается в области крепления. Как на термограмме рис. 1, так и на термограмме рис. 2 наблюдаем, равномерный спад температуры от крепления к корпусу, что объясняется более высокой температурой окружающего воздуха и менее интенсивным теплообменом.

В целом, из однородности температуры сегментов следует, что тело ШБМ не имеет повреждений. Также внутри нет утолщений, вызванных неравномерностью движения перемалываемой смеси.

Заполнение объема мельницы однородно.

Важным является также в предлагаемом комплексе мероприятий контроль за состоянием труб ТЭС, а именно, нарушением сплошности кладки, возникновении отложений на внутренних поверхностях и др. [12]. Как и в случае с ШБМ, возможно использование термографического исследования. На рис. 3 представлено фото трубы и ее термограмма.

Согласно термограмме, на теле трубы нет участков с недопустимой разностью температур, что свидетельствует об отсутствии дефектов, способных влиять как на прочность конструкции, так и на режим отвода дымовых газов.

### Социальные аспекты внедрения радиационных технологий

Принципы гражданского демократического государства и действующее законодательство предусматривает предварительное обсуждение среди территориаль-

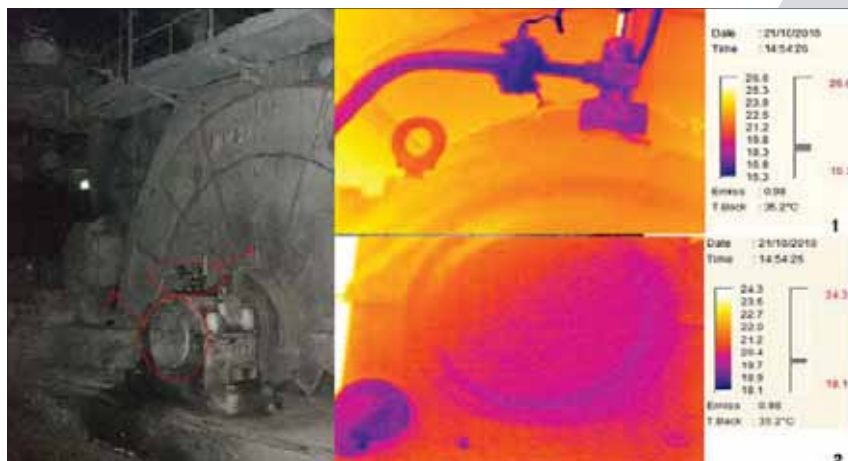


Рис. 1. Фото шаровой барабанной мельницы и термограммы системы подачи смазки (1) и крышки подшипников оси (2)

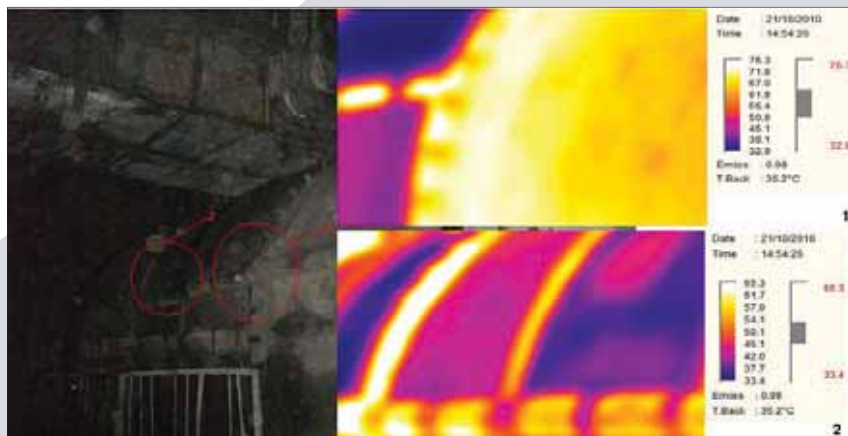


Рис. 2. Фото шаровой барабанной мельницы и термограммы швов и стяжек на теле мельницы



Рис. 3. Фото трубы ТЭС и ее термограмма

ных громад размещения ядерных объектов, к которым относятся и электрофизические источники ионизирующего излучения [13]. Наличие источника радиации может усложнить набор персонала на предприятие, где используются радиационные технологии. Параллельно с проведением научных исследований необходимо информировать общественность, привлекать специализированные социологические службы. Важным является привлечение прикладных социально-коммуникационных технологий. Это современное направление предполагает необходимость подготовки объективных пресс-релизов, информирующих людей о социально-экономической значимости данных технологий. В основу используемой аргументации следует положить следующие постулаты:

- практическая значимость радиационного метода очистки заключается в том, что появляется возможность использовать более дешевое, но высокотоксичное местное топливо при значительном снижении выбросов в окружающую среду;

- установки с радиационной очисткой газов позволяют снизить выплаты за выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ, а экономленные средства инвестировать в социально значимые проекты;

- снизиться риск заболеваний людей, которые проживают возле источника загрязнения, а также профзаболеваний работников предприятия.

Данный метод находится на активной внедренческой-исследовательской стадии во многих странах. Несмотря на общие принципы протекания радиационно-химических процессов, имеются различия для каждой страны, обусловленные рядом факторов, таких как законода-

тельство в природоохранной отрасли, наличие источников излучения и специализированной аппаратуры, наличие кадров соответствующей квалификации и др.

Радиационная очистка газовых выбросов мощных котельных установок ТЭЦ и ТЭС может уменьшить выбросы в атмосферный воздух оксидов азота и серы не менее чем на 95%. Кроме того, образованные продукты переработки могут быть использованы в качестве минерального удобрения или возвращены в технологический процесс. Важным также является профилактическое обслуживание, которое продлит срок службы не только дорогостоящего очистительного оборудования, но и упростит техническое обслуживание основного оборудования на ТЭС.

#### Выводы

Разработка и внедрение методов радиационной очистки дымовых газов позволит существенно улучшить экологическую обстановку в Украине. Несмотря на имеющийся международный опыт внедрения данных методов, существует потенциал для его совершенствования и адаптации к условиям Украины. Решение проблемы радиационной очистки газовых выбросов целесообразно проводить путем комплексного внедрения радиационных методов, как на стадии диагностики оборудования топливоподготовки, так и на стадии непосредственной очистки дымовых газов. Разработку и внедрение радиационных методов необходимо проводить с учетом социально-правовых аспектов, устанавливаемых законодательством Украины в области использования ядерной энергии.

#### Список литературы:

1. Злобин Ю.А. Основы экологии. – К.: Лібра, 1998. – 258 с.

2. Справочник по содержанию малых элементов в товарной продукции угледобывающих и углеобогатительных предприятий Донецкого бассейна. – Днепропетровск, 1994, 187с.

3. Дмитриев А.В. Очистка газовых выбросов ТЭС, работающих на серосодержащем топливе / А.В. Дмитриев, Д.Н. Латыпов, Н.А. Николаев // Промышленная энергетика, 2005. – №5. – С. 42-45.

4. Abramson I. G. The Design of Pilot Line for Cement Clinker Production by RT-technology./ I.G.Abramson, G. B Egorov. and Yu. V Nikiforov. The 5th International Symposium on Cement & Concrete. Shanghai, 2002

5. Person, J.C., Ham D.O., 1988. Removal of SO<sub>2</sub> and NOX from stack gases by electron beam irradiation. Radiat. Phys. Chem. 31, 1–8.

6. MaË tzing, H., Paur, H.R., 1992. Chemical mechanisms and process parameters of flue gas cleaning by electron beam. In: Nriagu, J.O. (Ed.), Gaseous Pollutants: Characterization and Cycling. Wiley, New York, pp. 307–331.

7. MaË tzing, H., Namba, H., Tokunaga, O., 1993. Kinetics of SO<sub>2</sub> removal from flue gas by electron beam technique. Radiat. Phys. Chem. 42 (4-6), 673–677.

8. Chmielewski, A.G., 1995. Technological development of EB flue gas treatment based on physics and chemistry of the process. Radiat. Phys. Chem. 46, 1057–1062.

9. Заявка на патент № и 2013 09148; дата подання заявки 22.07.2013 Пристрій для очистки димових газів; заявник Інститут електрофізики та радіаційних технологій НАН України.

10. Вавилов В.П. Тепловой контроль. – В кн.: Неразрушающий контроль./ Справочник. // Под ред. В.В Ключева.Т.5. – М: Машиностроение. 2006. – с. 9-368.

11. Прохоренко Е.М. Способ численной обработки контрастных термоизображений для идентификации дефектов. / Е.М. Прохоренко, Б.Б. Бандурян, Н.И. Базалеев, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко, В.С. Рихвицкий, В.Н. Робук, М.А. Сагадочный. // Восточно Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – №1/10(49). – с.15-20.

12. Методика тепловизионной диагностики дымовых труб и газопроводов. Свидетельство об аттестации Госстандарта РФ №11/442-2002. ВЕЕМО 06.00.00.000 ДМ.

13. Сушков С.Н. Радиационно-химические процессы и установки за рубежом./ С.Н.Сушков, Л.В. Бандерова – М.:Мысль, 1986. – 198 с.