

**О. Б. Андронов**

*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Кирова 36а, Чернобыль, 07270, Украина*

## **О НОВОМ ПРИНЦИПЕ МОКРОЙ АЭРОЗОЛЬНОЙ ОЧИСТКИ И ЕГО МЕСТЕ В РАЗВИТИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ**

Рассматривается конденсационный способ мокрой очистки, основанный на принципе адиабатической камеры. Оцениваются его преимущества, схема реализации и место в создании интегрированной системы обращения с радиоактивными отходами.

*Ключевые слова:* гибкая производственная система, аспирационные системы, скрубберная очистка, физика атмосферы, ядра конденсации, газоаэрозольные радиоактивные отходы, технологическая интеграция.

### **Введение**

Внедрение гибкой производственной (ГПС) и логистической (ЛС) систем в атомной энергетике – это современный путь решения проблемы радиоактивных отходов (РАО) АЭС. [1]. Структурным элементом ГПС является гибкая технология (ГТ), адаптированная к специфическим условиям применения и отвечающая задаче рационализации производственных процессов. В свою очередь, основой рационализации является интеграция и унификация технологических операций и управления ими. Расширение масштабов мокрой очистки при обращении с большими объемами воздушной среды АЭС позволит затворить в жидкую фазу значительную часть радионуклидов, содержащихся в воздушных (вентиляционных) потоках объекта. Это даст возможность вести их переработку по единой схеме кондиционирования жидких радиоактивных отходов (ЖРО). Кроме того, в жидкую фазу можно затворить радионуклиды дымовых газов, образующихся при сжигании (сухом крекинге) горючих твердых радиоактивных отходов (ТРО). Твердые продукты сжигания (зола) могут быть заключены в общую с ЖРО твердую матрицу. Так работает интегрированная универсальная система.

Разработка эффективной, широкомасштабной и недорогой технологии мокрой очистки газоаэрозольных радиоактивных отходов (ГРО) будет весомым вкладом в создание современной системы обращения с РАО.

### **Справка и общие положения**

1. На АЭС с реакторами ВВЭР в атмосферу выбрасывается примерно 90 изотопов радионуклидов широкого диапазона периодов полураспада, подлежащих годовому нормированию. При этом в целях защиты населения и охраны внешней среды вклад в предел дозы, обусловленный газообразными выбросами, для лиц категории В составляет 4 %, что соответствует вкладу в дозу 40 мкЗв в год. Это установленная квота предела дозы по выбросам АЭС. (Данные из ОАБ Хмельницкой АЭС.)

2. В атомной энергетике применение ГТ позволит: при любых изменениях физических и радиохимических характеристик исходного продукта переработки, вызванных ситуацией, обеспечить получение одинаково безопасного конечного продукта необходимого качества; внедрить прогрессивный модульный принцип формирования операционной систем обращения с ГРО и РАО в целом; обеспечить тактическую и стратегическую гибкость систем при решении как производственных текущих задач, так и задач развития; реализовать поэтапный и прогнозируемый переход на безлюдные технологии; обеспечить в дальнейшем внедрение новейших научно-технических достижений в рассматриваемой сфере по принципу аддитивности путем расширения модульного парка (в данном контексте модуль – это операционный блочный элемент узкоцелевого назначения с унифицированными внешними связями, работающий в диапазоне характеристик, где обеспечивается его наивысшая эффективность).

3. ГПС в целом - это интегрированная система, операционным элементом которой может стать производственный модуль мокрой очистки, работающий по принципу адиабатической камеры.

4. Проектные системы обращения с ГРО АЭС это, по сути, имплементация и адаптация к специфическим условиям применения аспирационных систем традиционных производств, где основная нагрузка приходится на пылеулавливающее оборудование, классифицируемое согласно ГОСТ 12.2.043-80. По принципу действия такое оборудование подразделяется на группы, а по конструктивным особенностям – на виды и действует по сухому и мокрому способу.

5. Аппараты мокрой очистки газов (АМОГ) отличаются высокой эффективностью улавливания взвешенных частиц и небольшой стоимостью по сравнению с аппаратами сухой очистки.

Некоторые типы АМОГ способны очищать газы от частиц размером до 0,1 мкм. Такие аппараты по эффективности очистки не только успешно конкурируют с лучшими образцами оборудования сухого пылеулавливания, но и используются в тех случаях, когда названное оборудование не может быть применено вследствие высокой температуры, повышенной влажности или взрывоопасности очищаемых газов.

В АМОГ одновременно со взвешенными частицами можно улавливать парообразные и газообразные компоненты. Аппараты мокрой очистки часто используют в газоочистных системах для одновременного охлаждения и увлажнения газов. В настоящее время применяются аппараты следующих групп: полые и насадочные, барботажные и пенные, аппараты ударно-инерционного типа, центробежного типа, динамические и турбулентные промыватели.

6. Наиболее просто и эффективно на сегодняшний день мокрый метод реализуется в скрубберных очистителях. Это, прежде всего, скруббер Дойля (ударный способ) и скруббер Вентури (инжекционно-смесительный способ). Скруббер Вентури при сопоставимых со скруббером Дойля показателях эффективности конструктивно проще, удобней в эксплуатации и дешевле, поэтому он нашел более широкое применение. В атомной энергетике, например, он успешно используется на зарубежных АЭС для очистки газовоздушной среды внутри защитной оболочки реакторной установки.

### Кратко о мокрой очистке

Мокрая очистка, как известно, основана на взаимодействии частиц аэрозолей (твердой фазы) с поверхностью жидкой фазы. При этом действует механизм абсорбции, в результате чего твердая частица ассоциируется с некоторым объемом жидкости.

Процесс взаимодействия различного рода загрязнений воздушной среды с жидкостью является объектом интереса широкого круга специалистов [2].

Очевидно, эффективность мокрой очистки зависит от величины поверхности сорбирующей фазы. В конкретном случае площадь поверхности  $S$  будет зависеть от степени (качества) дробления жидкости:

$$S = 6V/d_{cp},$$

где  $V$  – объем жидкости;  $d_{cp}$  - средний диаметр капли.

Скруббер Вентури - это реализация инжекционного способа дробления жидкости, который осуществляется в высокоскоростной орошаемой камере смешения. Известно, что в механизме движения двухфазных систем числа подобия могут быть представлены как мера отношения сил, действующих на единицу площади поверхности (гравитационных или архимедовых, инерции, вязкости, поверхностного натяжения). Для краткой характеристики процесса интерес представляет отношение силы инерции к силе поверхностного натяжения – число Вебера:

$$We = \rho\omega^2L/\sigma,$$

где  $\rho$  плотность рабочей среды;  $\omega$  - характерная скорость;  $L$  - характерный размер системы;  $\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения.

Установлено, что при  $We = (7 - 10)$  [3] происходит дробление капель. Это условие отвечает предельному диаметру капель

$$D_{np} = (2 - 3)b,$$

где  $b$  – капиллярная постоянная, которая в земных условиях для жидкостей лежит в пределах (1 - 3) мм.

Капли жидкости сохраняют сферическую форму до их критического размера

$$d_{кр} = We/U^2\rho'',$$

где  $U$  – относительная скорость капли (относительно скорости газа);  $\rho''$  - плотность газа (воздуха).

В процессе разгона жидкости в инжекционном смесителе скорость жидкой фазы изменяется от нуля до скорости газа.

Скорость потока в горловине (смесителе) трубы Вентури, в зависимости от типа аппарата, лежит в диапазоне (30 – 200) м/с, а плотность орошения - в диапазоне (0,1 – 6) дм<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Фракционный состав жидкой фазы будет иметь размерный ряд в диапазоне средних размеров капель  $d_{cp}$  от (0,44 – 0,66) мм до (10 – 15) мкм. Увеличение рабочей площади контакта фаз в двухфазном потоке сопро-

вождается ростом гидравлического сопротивления. По данному признаку скрубберы Вентури разделяются на два основных типа: низконапорные (гидравлическое сопротивление до 5 кПа), улавливающие частицы  $d_{cp} > 20$  мкм, и высоконапорные (гидравлическое сопротивление до 100 кПа), способные улавливать частицы  $d_{cp} > 0,5$  мкм.

В целом скрубберы Вентури достаточно эффективное средство очистки воздушной среды. Они способны улавливать частицы малых (субмикронных) размеров в широком диапазоне их концентраций в газе (от 0,05 до 100 г/см<sup>3</sup>).

Непрерывно возрастающие требования к глубине очистки газоздушных выбросов сделали скруббер Вентури доминирующим видом мокрых пылеуловителей.

Однако есть признаки того, что на сегодняшний день скрубберная очистка, вероятно, достигла разумного предела своих технических возможностей, и дальнейшее ее совершенствование становится экономически нецелесообразным. Можно, например, повысив скорость потока в инжекционном смесителе в два раза, увеличить рабочую площадь взаимодействия фаз в четыре раза, но энергозатраты при этом вырастут в восемь раз.

Если принять  $\omega = 2\omega$ , то  $S_i/S = (\omega_i/\omega)^2 = 4$ . Представим формулу затрачиваемой мощности на прокачку воздуха в виде

$$N = \zeta \omega^3 F \rho / 2 \cdot 0,102 \cdot \chi,$$

где  $\zeta$  - коэффициент гидравлического сопротивления;  $F$  - площадь гидравлического сечения;  $\rho$  - динамическая плотность прокачиваемой среды;  $\chi$  - коэффициент полезного действия воздуходувки. Тогда при прочих равных условиях

$$N_i/N = (\omega_i/\omega)^3 = 8.$$

При обращении с радиоактивными аэрозолями главенствует качественная сторона вопроса, которая характеризуется степенью отбора из воздушной среды радионуклидов (они могут быть ассоциированы и не ассоциированы с частицами пыли, находиться в ионной, нейтральной форме и пр)

В этой связи при развитии технологии мокрой очистки интерес представляет природная модель самоочистки атмосферы, которая достаточно хорошо изучена и описана в работах по физике атмосферы Земли.

### **О теоретической основе нового способа мокрой очистки**

Идея способа основана на использовании принципа адиабатической камеры. В природе такой принцип реализуется при формировании облаков, туманов, дождей и рос [4 - 8].

Атмосферная влага, в зависимости от условий, может находиться в состоянии паров или конденсационных аэрозолей. Конденсация означает переход системы на более низкий энергетический уровень (энтропия системы уменьшается).

Конденсация паров происходит на так называемых ядрах конденсации, которые представляют собой гигроскопические частицы в нейтральной или ионной форме, содержащие хлориды, сульфиты, сульфиды, нитраты и нитриты, размерами (0,001 – 0,1) мкм.

Гигроскопичностью обладают все гидрофильные (смачиваемые водой) материалы капиллярно-пористой (фрактальной) структуры.

Концентрация гигроскопических частиц: над океаном  $10^9$ , над сушей вне городов  $10^{10}$  и в городах  $1,5 \cdot 10^{11}$  част./м<sup>3</sup>. Количество ядер конденсации в единице объема определяется с помощью счетчика. Наиболее распространен счетчик Шульца, основанный на принципе адиабатической камеры.

По рассматриваемой теме объектом особого внимания является структура облаков.

Известно, что облака состоят из облачных элементов, т.е. мельчайших капелек воды (при  $t > -10$  °С) или кристалликов льда (при  $t < -15$  °С). В указанном диапазоне температур может быть и смешанный состав. Укрупнение облачных элементов происходит в результате броуновской, турбулентной, электрической и гравитационной коагуляции. Коагуляция облачных элементов (КОЭ) - самопроизвольный процесс, который в соответствии с законом термодинамики является следствием стремления системы перейти в состояние с более низкой свободной энергией. По своей сути КОЭ – это слипание частиц коллоидной системы при их столкновении, в результате которого образуются агрегаты (более крупные вторичные частицы, состоящие из более мелких первичных частиц). Возможна как гомокоагуляция (слипание однородных частиц), так и гетерокоагуляция (слипание разно-

родных частиц). Очевидно, что коагуляция затруднена или невозможна в том случае, когда система агрегативно устойчива, т.е. способна противостоять укрупнению частиц.

Описанные процессы образуют природный механизм очистки атмосферы. Загрязнения, выброшенные в атмосферу, возвращаются на землю с дождями и росами (известны, например, кислотные дожди, радиоактивные росы и пр.).

### Использование природного механизма в новой технологии мокрой очистки

Вопрос использования природного механизма очистки атмосферы – это вопрос создания условий его эффективной реализации. Принципиальное отличие рассматриваемого способа от существующих приемов мокрой очистки в том, что реагентом (сорбентом или детергентом) является загрязнитель (ядра конденсации), а реагирующей субстанцией – вода (пары воды).

В искусственных условиях действие природного механизма самоочистки воздушной среды как локальное явление может наблюдаться в закрытых пространствах. В данном случае закрытое пространство функционирует как адиабатическая камера. Пример – объект «Укрытие», где атмосферная влага обуславливает сезонное поступление воды внутрь 4-го энергоблока [9].

Для разработки новой технологии и начальной оценки ее эксплуатационных преимуществ необходимо исследование кинетики очистки. Для снятия кинетических кривых можно использовать счетчик Шульца.

Очевидно, что динамика процесса будет зависеть от влагосодержания очищаемой среды, а это параметр, который можно регулировать.

Если за время процесса  $\tau$  удельная активность очищаемой среды снижается от  $a_{вх}$  до  $a_{вых}$ , то при данном влагосодержании входного воздушного потока получим следующие характеристики: степень очистки  $\beta = (a_{вх} - a_{вых})/a_{вх}$ ; коэффициент очистки  $K = a_{вх}/a_{вых} = 1/(1 - \beta)$ ; коэффициент распределения  $D = a_{вых}/a_{вх} - 1 = K - 1 = \beta/(1 - \beta)$ ; удельная активность конденсата  $a_{жро} = a_{вх}\beta/\varphi_{р(т)}$ , где  $\rho_{(т)}$  – абсолютное влагосодержание воздуха при температуре процесса и  $\varphi$  – относительная влажность.

Если принять, что все ядра конденсации имеют одинаковые физико-химические свойства и имеют равную вероятность взаимодействия с частичками паров воды, то процесс очистки с достаточной для практики точностью может быть описан изотермой адсорбции

$$\beta = b\tau/(1 + b\tau)$$

или формулой химической кинетики

$$\beta = 1 - e^{-b\tau},$$

где  $\beta$  – степень очистки;  $b$  – сорбционный коэффициент или константа химической реакции 1-го порядка;  $\tau$  – время процесса.

Показателем динамики процесса здесь является параметр  $b$ , который рассчитывается по кинетическим кривым, получаемым экспериментальным путем.

### Теоретическая модель и принцип ее построения

В основу теоретической модели процесса положена двухкамерная схема. Первая камера по направлению движения потока – «теплая», вторая – адиабатическая или «холодная». Камеры включены последовательно.

Задача «теплой» камеры – обеспечение теплофизических условий массообмена между источником влаги и воздушным потоком. Используется известная зависимость влагосодержания от равновесной температуры процесса (температуры по «мокрому» термометру). Такая зависимость в табличной форме представлена в работах [10, 11].

Задача «холодной» (адиабатической) камеры – создание условий сгущения паров воды на ядрах конденсации (аэрозольных частицах) с последующим коагуляционным агрегатированием и образованием ЖРО (радионуклиды из двухфазного воздушного потока переводятся в жидкость).

Тепловой баланс системы имеет вид

$$Q_{вх} + Q_{раб} = Q_{охл} + Q_{пот} + Q_{вых},$$

где  $Q_{вх}$  – тепло, вносимое воздушным потоком;  $Q_{раб}$  – тепло, вносимое от внешнего источника (рабочее тепло);  $Q_{охл}$  – тепло, отбираемое хладагентом (уносимое из системы);  $Q_{пот}$  – потери тепла во внешнюю среду;  $Q_{вых}$  – тепло отходящего воздушного (газового) потока.

Экономически выгодно и технологически целесообразно иметь  $Q_{вх} = Q_{вых}$ . Термический КПД системы в этом случае

$$\eta = Q_{охл}/Q_{раб} = 1 - Q_{пот}/Q_{раб}.$$

Исходя из статистических данных по эффективности теплоизоляции промышленных котлов, можно принять  $Q_{пот} = (1 - 2) \%$  от теплотрат. Тогда коэффициент полезного использования тепла будет  $(98 - 99) \%$ .

Расход энергоресурса складывается из энерготрат на обслуживание «теплой» ( $N_t$ ) и «холодной» ( $N_x$ ) камер.

$$\sum N = N_t + N_x$$
$$N_t = KV_{возд}[i_p \rho_p - i_{вх} \rho_{вх} + C_{рв}(t_p - t_{вх})] \quad N_x = KV_{охл} C_p (t_2 - t_1),$$

где  $K$  – коэффициент пересчета;  $V_{возд}$  – объем прокачиваемого воздуха;  $V_{охл}$  – объем хладагента (прокачиваемой охлаждающей воды);  $i_p$  – энтальпия рабочей влаги;  $i_{вх}$  – энтальпия входящей влаги;  $C_{рв}$  – удельная теплоемкость воздуха;  $C_p$  – удельная теплоемкость хладагента (воды);  $t_p$  – рабочая (равновесная) температура процесса тепломассообмена;  $t_{вх}$  – температура воздуха на входе в камеру,  $t_1$  и  $t_2$  – температура входа и выхода охлаждающей жидкости соответственно;  $\rho_p$  – влагосодержание воздуха (газа) на выходе из «теплой» камеры;  $\rho_{вх}$  – влагосодержание потока на входе в «теплую» камеру.

Полезная тепловая мощность и характеристики системы теплосъема при теплопередаче через разделительную стенку связаны между собой формулой

$$P = K_{тп} F \Delta t,$$

где  $P$  – полезная тепловая мощность;  $K_{тп}$  – коэффициент теплопередачи;  $F$  – площадь теплопередающей поверхности;  $\Delta t$  – температурный напор.

Баланс активности:

$$A_{вх} = A_{ак} + A_{вых},$$

где  $A_{вх}$  – входная активность;  $A_{ак}$  – аккумулялированная системой активность;  $A_{вых}$  – выходная активность.

$A_{ак} = \beta A_{вх}$ . Эта активность формирует конечный продукт переработки в виде ЖРО. Если в системе находится  $V_p$  воды, то при объемной скорости воздушного потока  $G_v$  время формирования ЖРО  $\tau$  будет:  $\tau = V_p / G_p (\rho_p - \rho_{вх})$ .

Такова в кратком изложении математическая модель конденсационного принципа аэрозольной очистки, на основе которой формируется инструмент инженерных расчетов.

### Заключение

1. Предложена идея и концепция ее реализация. Технические решения не рассматривались.
2. Для развития данного направления требуется проведение экспериментально-исследовательской работы.
3. Рассматриваемый метод хорошо совместим с модульной системой благодаря: хорошей адаптивности к специфическим требованиям и условиям применения; возможности достижения высокого показателя отношения производительности к массе оборудования; простоте технической реализации и автоматизации; обеспечению возможности работы в автономном режиме и т.д.
4. Цель статьи – информация профильных специалистов о возможностях и преимуществах природного, термодинамического метода мокрой очистки воздушной среды в решении задачи совершенствования и рационализации систем обращения с РАО.
5. Приведенный принцип очистки был проверен автором в 1982 г. на лабораторной установке сухого крекинга в системе газоочистки при концентрировании органических твердых РАО. Результаты проверки позволили сделать вывод о необходимости развития технологии обращения с ГРО с использованием природного механизма очистки атмосферы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Блехерман М.Х.* Гибкие производственные системы: организационно-экономические аспекты. - М.: Машиностроение, 1988.
2. *Одинцов А.А., Огородников Б.И.* Изучение растворимости аэрозолей объекта «Укрытие» в жидкостях различного химического состава // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. – 2011. – Вип. 5. – С. 85 – 95.
3. *Тепло - и массообмен.* Теплотехнический эксперимент: Справ. - Кн. 2 / Под общей ред. В. А. Григорьева и Н. М. Зорина. - М.: Машиностроение, 1982.
4. *Хргиан А. Х.* Физика атмосферы. - М., 1962.
5. *Зверев А. С.* Туманы и их предсказания. - Л., 1954.
6. *Фукус Н. А.* Механика аэрозолей. - М., 1956.
7. *Физика облаков* / Под ред. А. К. Хргиана. - Л., 1961.
8. *Грабовский Р. И.* Атмосферные ядра конденсации. – Л., 1956.
9. *Богатов С. А., Корнеев А. А., Креницын А. П. и др.* Проблемы воды в объекте «Укрытие». – Чернобыль, 1999. – 28 с. – (Препр. / НАН Украины. МНТЦ «Укрытие»; 99-5).
10. *Соснин Ю. П.* Контактные водонагреватели. – М.: Стройиздат, 1974.
11. *Промышленная теплоэнергетика и теплотехник:* Справ. - Кн. 4 / Под общей ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

**О. Б. Андронов**

*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова 36а, Чорнобиль, 07270, Україна*

**ПРО НОВИЙ ПРИНЦИП МОКРОГО АЕРОЗОЛЬНОГО ОЧИЩЕННЯ  
ТА ЙОГО МІСЦЕ В РОЗВИТКУ ВИРОБНИЧОЇ СИСТЕМИ ПОВОДЖЕННЯ  
З РАДІОАКТИВНИМИ ВІДХОДАМИ**

Розглядається конденсаційний спосіб мокрого очищення, оснований на принципі адіабатичної камери. Оцінюються його переваги, схема реалізації та місце в створенні інтегрованої системи поводження з радіоактивними відходами.

*Ключові слова:* гнучка виробнича система, аспіраційні системи, скрубберне очищення, фізика атмосфери, ядра конденсації, газоаерозольні радіоактивні відходи, технологічна інтеграція.

**O. B. Andronov**

*Institute for NPP safety problems of Ukraine's NAS, 36a, Kirova str., Chornobyl, 07270, Ukraine*

**OF NEW PRINCIPLE FOR WET AEROSOL CLEANING AND ITS  
PLACE IN DEVELOPING INDUSTRIAL RADWASTE MANAGEMENT SYSTEM**

A condensation wet cleaning method based on adiabatic chamber principle is considered. Its advantages, implementation scheme and place in creating an integrated radwaste management system are evaluated.

*Keywords:* flexible manufacturing system, aspiration systems, scrubber cleaning, atmospheric physics, condensation nuclei, gas-aerosol radwaste, technological integration.

REFERENCE

1. *Bleherman M. Kh.* Flexible manufacturing systems: organizing and economic aspects. - Moskva: Mashinostroyeniye, 1988. (Rus)
2. *Odintsov A.A., Ogorodnikov B.I.* Study of solvency of «Shelter» object aerosols in liquids of different chemical composition // Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy і Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl). – 2011. – Iss. 5. – P. 85 – 95. (Rus)
3. *Heat- and mass exchange.* Heat engineering experiment; Ref. - Vol. 2 / Under general edition of V. A. Grigoriev and N. M. Zorin. - M.: Mashinostroyeniye, 1982. (Rus)
4. *Khrgian A. Kh.* Atmospheric physics. - Moskva, 1962. (Rus)
5. *Zverev A. S.* Fogs and their forecast. – Leningrad, 1954. (Rus)
6. *Fuks N. A.* Aerosol mechanics. – Moskva, 1956. (Rus)
7. *Cloud physics* / Under edit. of A. Kh. Khrgian. - Leningrad, 1961. (Rus)
8. *Grabovskiy R. I.* Atmospheric condensation nuclei. – Leningrad, 1956. (Rus)
9. *Bogatov S. A., Koreneyev A. A., Krinitsin A. P. at al.* Problems of water in «Shelter» object. – Chornobyl, 1999. – 28 p. – (Prepr. / NAS of Ukraine. ISTC «Ukryttya»; 99-5). (Rus)
10. *Sosnin Yu. P.* Contact water heaters. – Moskva: Stroyizdat, 1974. (Rus)
11. *Industrial heat-power engineering and heat technology:* Ref. - Vol. 4 / Under general edit. of V. A. Grigoriev and N. M. Zorin. – Moskva: Energoatomizdat, 1983. (Rus)

Надійшла 16.09.2013  
Received 16.09.2013