

Научная статья
УДК 502.55
DOI 10.46698/z1666-0894-1240-1

Гидроаэроионный метод очистки газов промышленных предприятий

Марик Олегович Марзаев

Владикавказский научный центр Российской академии наук, соискатель, Владикавказ, Россия, ranmarzaev1@bk.ru

Алан Батразович Лолаев

Владикавказский научный центр Российской академии наук, профессор, доктор технических наук, Владикавказ, Россия, abl-2010@mail.ru

Александр Дзахотович Абаев

ООО «Экопром», главный инженер, Владикавказ, Россия, uanlang@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены известные методы очистки газов промышленных предприятий, определены недостатки методов. Представлен принципиально новый метод мокрой очистки дымовых газов промышленных предприятий с использованием высокого окислительно-восстановительного потенциала разноразряженных электролитов (католита и анолита) холодного мелкодисперсного тумана высокого давления.

Ключевые слова: окружающая среда, пылегазовая смесь, методы очистки газов

Для цитирования: Марзаев М.О., Лолаев А.Б., Абаев А.Дз. Гидроаэроионный метод очистки газов промышленных предприятий // Вестник Владикавказского научного центра РАН. 2025. Т. 25. № 4. С. 111–115. DOI 10.46698/z1666-0894-1240-1

Hydroaerionic method of gas purification in industrial enterprises

Marik O. Marzaev

Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Candidate, Vladikavkaz, Russia, ranmarzaev1@bk.ru

Alan B. Lolaev

Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Dr., Professor, Vladikavkaz, Russia, abl-2010@mail.ru

Alexander Dz. Abaev

Chief Engineer of Ecoprom LLC, Vladikavkaz, Russia, uanlang@mail.ru

Abstract. The article discusses well-known methods of gas purification in industrial enterprises, and identifies the disadvantages of the methods. A fundamentally new method of wet cleaning of flue gases of industrial enterprises using a high redox potential of multicharged electrolytes (catholyte and anolyte) of a cold fine-dispersed high-pressure mist is presented.

Keywords: Environment, dust-gas mixture, gas purification methods

For citation: Marzaev M.O., Lolaev A.B., Abaev A.Dz. Hydroaerionic method of gas purification in industrial enterprises // Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center of RAS. 2025. Vol. 25. No.4. P. 111–115. DOI 10.46698/z1666-0894-1240-1

ВВЕДЕНИЕ

С интенсификацией промышленного производства во всем мире, внедрением новых технологических процессов ежегодно в атмосферу Земли поступает более 700 млн т загрязняющих веществ [1, 2]. Согласно существующей классификации, большинство промышленных выбросов являются воздушно-дисперсными системами, дисперсную фазу которых составляют органические и неорганические пыли или туманы, а дисперсионную образует газозагрязненная смесь, включающая в среднем от двух до пяти газообразных компонентов [3, 4]. Их доля в общем количестве загрязняющих компонентов выбросов по массе составляет от 59 до 71 % [5, 6].

Относительный состав вредных веществ в атмосфере больших промышленных городов: CO – 45 %, SO_x – 18 %, C_xH_y – 15 %, пыль – 12 %, NO_x – 10 %. Превышения концентраций токсичных веществ в загрязненном атмосферном воздухе над фоновыми составляют: по оксиду углерода (CO) – в 80–1250 и более раз; по диоксиду серы (SO₂) – в 50–300 раз; по диоксиду азота (NO₂) – до 25 раз; по озону (O₃) – до 7 раз [19, 20].

Кроме CO, SO_x, NO_x, C_xH_y и пыли в атмосферу выбрасываются и другие более токсичные вещества. Так, например, вентиляционные выбросы заводов электронной промышленности содержат пары плавиковой, серной и других минеральных кислот, органические растворители и т. п. В настоящее время насчитывается более 500 вредных

веществ, загрязняющих атмосферу, их количество все увеличивается. К наиболее вредным веществам следует отнести аммиак (NH_3), сероводород и сероорганические соединения (H_2S , CS_2 , COS), цианистые соединения, акрилонитрил, метиловый эфир циан-муравьиной кислоты (HCN , C_2N_2 , $\text{CH}_2=\text{CHCN}$, CNCOOCH_3), галоиды и их соединения – фтор, хлор, бром, фтористый водород, хлористый водород, бромистый водород, фосген, хлорциан (F_2 , Cl_2 , Br_2 , HF , HCl , HBr , COCl_2 , CNCl), пары и аэрозоли ртути, серной, азотной и фосфорной кислот, пары легколетучих органических веществ и др. (таблица 1).

Значительная часть газообразных компонентов обладает способностью трансформации в вещества токсичнее исходных. В условиях фона, характерного для большинства промышленно развитых районов, это делает их опасными даже при относительно низких начальных концентрациях (таблица 2).

Тем не менее сложившаяся практика очистки промышленных выбросов ориентирована на нейтрализацию лишь одного из доминирующих компонентов, которым в большинстве случаев однозначно принимается пыль [7, 8].

Решение проблемы очистки выбросов от нескольких компонентов, находящихся в различном фазовом состоянии, основывается на использовании многоступенчатых установок, в которых путем последовательного подключения соответствующих газоочистных аппаратов раздельно осуществляются процессы селективной нейтрализации или извлечения целевых компонентов. Практика санитарной очистки технологических и дымовых газов в многоступенчатых установках определила область их экономически обоснованного применения – это многотоннажные выбросы со стабильным составом, свойствами и возможностью утилизации целевых компонентов в промышленных масштабах [13]. Отличающиеся высокой энергоемкостью, сложные в аппаратном оформлении, обслуживании и эксплуатации, такие установки при изменении состава, свойств или объемов выбросов становятся малоэффективными и требуют переоборудования, связанного с капиталоемкой заменой составляющих их устройств [17, 18].

Технологии очистки газовых сред, использующие принцип комплексного ведения управляемых процессов извлечения целевых компо-

Таблица 1
Основные источники загрязнения воздуха и типичные загрязнители

Источник	Основные загрязнители	Характеристика воздействия
Промышленные предприятия	SO_2 , NO_x , CO , тяжёлые металлы, пыль, ЛОС	Воздействие на дыхательную и нервную системы
Транспорт	CO , NO_x , C_2H_4 , сажа, бензапирен, $\text{PM}_{10/2.5}$	Смог, онкологические и сердечные заболевания
Энергетика (ТЭС, котельные)	SO_2 , NO_x , CO_2 , зола	Глобальное потепление, кислотные осадки
Сельское хозяйство	NH_3 , CH_4 , N_2O	Парниковый эффект, загрязнение почв и воды
Бытовые источники	CO , NO_x , сажа, дым	Повышение заболеваемости в зимний период

нентов путем агрегирования средств их реализации в форме единого аппарата, показывают, что совмещение в одном устройстве потенциально эффективных процессов значительно расширяет его функциональные возможности, позволяя упростить аппаратное оформление и условия обслуживания газоочистных установок, снизить их энерго- и материалоемкость, достичь меньшей себестоимости очистки при обеспечении высокой степени извлечения или нейтрализации целевых компонентов [16, 17].

Из сравнительного анализа функциональных возможностей основных методов извлечения и нейтрализации компонентов газодисперсных сред следует, что наиболее оптимально эта задача может быть решена в аппаратах мокрой очистки, где универсальная возможность совмещения и турбулентной интенсификации физико-химических процессов в газожидкостных системах позволяет создавать на основе механизмов мокрой очистки принципиально новые технологии [9, 15], а также эффективно регенерировать теплоту выбросов, дает возможность сократить до минимума число агрегируемых в одном аппарате технологических средств, минимизируя стоимостные показатели, а также условия автоматизации управления технологическими параметрами.

Установки для очистки газов при сжигании топлива в энергетике чаще всего включают абсорберы, в которых расположены оросительные устройства и беспровальные газораспределительные решетки с псевдоожиженным слоем орошаемой насадки,

Таблица 2
Воздействие отдельных загрязнителей на компоненты экосистем

Загрязнитель	Источник	Влияние на среду	Последствия для человека
Диоксид серы (SO_2)	Сжигание топлива, металлургия	Кислотные дожди, закисление почв	Раздражение дыхательных путей
Оксиды азота (NO_x)	ТЭС, транспорт	Смог, кислотные дожди	Бронхиты, обострение астмы
Углерод (CO , CO_2)	Транспорт, энергетика	Глобальное потепление	Гипоксия, сердечно-сосудистые болезни
Тяжёлые металлы	Металлургия, химпром	Загрязнение почв, водоемов	Отравление, онкология, тератогенез
Пыль, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$	Промышленность, транспорт	Загрязнение воздуха	Астма, болезни сердца и сосудов

циркуляционные насосы, соединенные с анодной и катодной камерами электролизера, соединенные трубопроводами для подачи анолита и католита с соответствующими оросительными устройствами. Газораспределительные решетки соединены с регенератором, соединенным с циркуляционными насосами, а также с трубопроводами для сбора прореагировавших анолита и католита, кроме того, последовательно соединены со средствами компрессирования и осушки воздуха, озонатора, подсоединенного через эжекторы к входным трубопроводам циркуляционных насосов, а конденсационно-абсорбционная установка и сборники продуктов десорбции подсоединены к выходу регенератора для удаленных из газов окислов, потребляя 4 500 л воды в час, с низкой степенью очистки газа 60–70 %, полученной при электрохимической активации воды в электролизере, при производительности установки 1 500 м³/час печного газа, а количество воды, которую необходимо очищать, становится на порядок дороже самой очистки газов [10, 11].

Однако практика показывает, что принципиальные способы очистки дымовых газов при использовании в промышленных масштабах неэффективны, потому что скорость дымовых потоков в газоходах 10–20 м/с, во избежание забивания сечения газохода вследствие оседания и выпадения в осадок смога и пыли, количество дымовых газов, подлежащих очистке, – 100–150 м³/с, или 360 000–540 000 м³/час, причем в окружающую среду поступает магния в 1,5 раза, молибдена – в 3, мышьяка – в 7, урана, титана – в 10, алюминия, йода, кобальта – в 15, ртути – в 50, лития, ванадия, стронция, бериллия, циркония – в сотни раз, галлия, германия, в тысячи раз, иттрия – в десятки тысяч раз больше, чем при добыче [20].

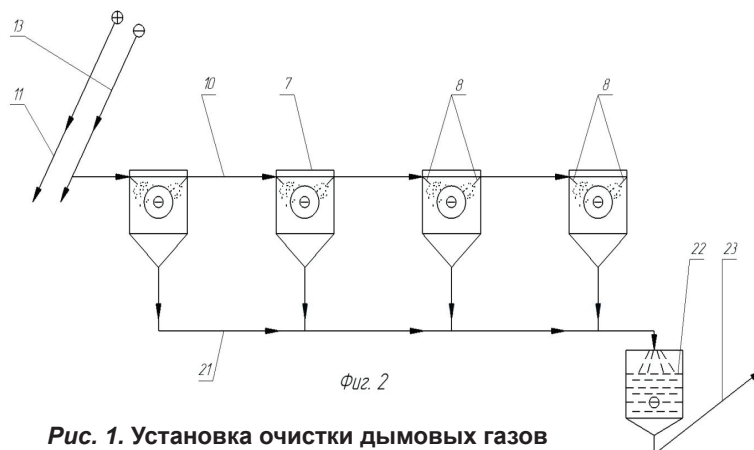


Рис. 1. Установка очистки дымовых газов

МЕТОДИКА И ОБОРУДОВАНИЕ

Для решения этой проблемы авторами предлагается способ обеспечения поочередного воздействия холодного тумана высокого давления католита и анолита, представляющего собой мелкодисперсный туман из разноименно заряженных электролитов с высоким ОВП (окислительно-восстановительным потенциалом). При этом повышается эффективность очистки дымовых газов от поликомпонентных загрязнителей с высокой степенью очистки от твердых примесей, окислов азота, оксида углерода, диоксида серы, сероводорода и т. д. для последующей переработки конденсата и извлечения редкоземельных элементов.

Установка для очистки дымовых газов (рис. 1) содержит камеру предварительного озонирования 3, камеры для обработки католитом и анолитом, дымосос 20, емкости 15, 16 католита и анолита, соединенные с насосами 12, 14 католита и анолита соответственно, соединенные с выходами указанных насосов 12, 14 трубопроводы 11, 13 подачи католита и анолита, трубопровод 21 слива католита и анолита, накопительную ем-

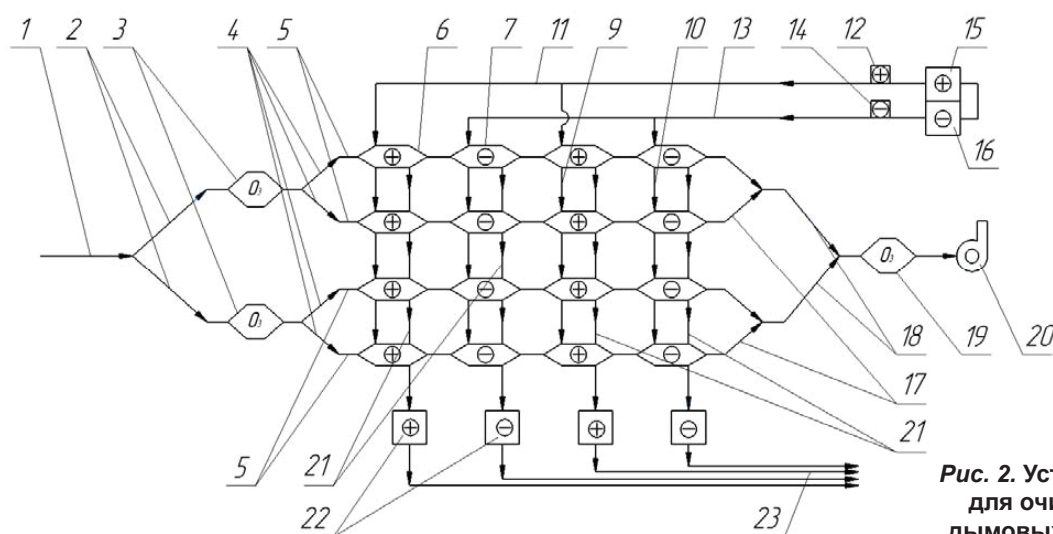


Рис. 2. Установка для очистки дымовых газов

кость 22, 23 отработанных католита и анолита.

Камеры для обработки католитом и анолитом представляют собой линию очистки, соединенную с выходом камеры предварительного озонирования 3 и включающую последовательно чередующиеся камеру холодного тумана католита 6 и камеру холодного тумана анолита 7; насосы католита 12 и анолита представляют собой насосы высокого давления, в камере холодного тумана католита и в камере холодного тумана анолита расположены форсунки 8 для распыления католита и анолита, соединенные с трубопроводом 9 подачи католита и анолита соответственно.

Установка снабжена камерой 19 финишного озонирования, к которой подсоединен дымосос 20 и которая соединена с выходом линии очистки, и содержит накопительную емкость отработанного католита и накопительную емкость отработанного анолита, соединенных соответственно с трубопроводом слива католита и трубопроводом слива анолита.

Для более эффективной очистки линия очистки может включать последовательно чередующиеся через 1-2 камеры холодного тумана католита и две камеры холодного тумана анолита.

При очистке больших количеств дымового газа установка содержит две линии очистки с одинаковым числом камер холодного тумана католита 6 и анолита 7, а также содержит трубопроводы слива католита и анолита 21; при этом каскад всех первых по ходу газа камер холодного газа католита соединен с одним трубопроводом слива католита 22, каскад всех первых по ходу газа камер холодного тумана анолита соединен с одним трубопроводом слива анолита, и каждый последующий каскад камер холодного тумана католита и анолита соединен с соответствующим трубопроводом слива католита и анолита 21 (рис. 2).

Для раздельного сбора католита и анолита каждый трубопровод слива католита соединен с соответствующей накопительной емкостью отработанного католита и каждый трубопровод слива

анолита соединен с соответствующей накопительной емкостью отработанного анолита.

При очистке больших количеств дымового газа установка также может содержать две камеры предварительного озонирования, каждая из которых соединена с одной линией очистки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для экспериментальной проверки предложенного способа была изготовлена опытная установка для очистки и переработки 600 м³/час выбросов угольной печи. В ходе экспериментов качество очистки газов контролировалось при помощи газоанализатора. Способ показал свою эффективность, достигая очистки воздуха свыше 95 %.

Исследовались различные режимы подачи газа, дисперсии тумана, факторы окружающей среды.

Результаты многофакторных экспериментов позволяют рекомендовать установку для практического внедрения.

ВЫВОДЫ

Предложен способ разделения потока очищаемого газа на два и более с многократной поочередной обработкой каждого потока холодными туманами католита и анолита.

Данный способ эффективнее использования парообразных или жидких католита и анолита, т. к. мелкодисперсные частицы холодного тумана католита и анолита высокого давления обеспечивают большую поверхность взаимодействия с очищаемым газом и эффективно взаимодействуют с ним из-за высокого ОВП, позволяя проводить очистку больших потоков дымовых газов в промышленных масштабах, в энергетике при сжигании топлива, в коксохимической промышленности и при добыче редкоземельных химических элементов с максимально возможной очисткой дымовых газов при минимальных затратах с дальнейшей переработкой конденсата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абсорбция и пылеулавливание в производстве минеральных удобрений / Под ред. И.П. Мухленова и О.С. Ковалева. – М.: Химия, 1987. 208 с.
2. Бережинский А.И., Хомутинников П.С. Утилизация, охлаждение и очистка конвертерных газов. – М.: Металлургия, 1987. 216 с.
3. Буренин В.В. Защита атмосферного воздуха от производственной пыли, токсичных паров и газов // Экология и промышленность России. 2004. № 9. С. 25–29.
4. Власов А.А. Энергосберегающие и экологически чистые технологии. – М.: Академия, 2019. 284 с.
5. Ильин В.А. Методы оценки экологического ущерба. – М.: Экономика, 2021. 198 с.
6. Коузов П.А., Малыгин А.Д., Скрыбин Г.М. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности. – Л.: Химия, 1982. 256 с.
7. Кошкароев В.Е., Морозов Ю.П. и др. Пылеобразование и возможность окискования пыли шахтной плавки окис-

- ленных никелевых руд // Материалы XVII Международной научно-технической конференции «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья». – Екатеринбург: УГТУ, 2012. 322 с.
8. Малышев В.П. Современные технологии очистки воздуха. – СПб.: Профессия, 2020. 308 с.
9. Никифоров А.В. Промышленная экология и охрана окружающей среды. – М.: КНОРУС, 2021. 286 с.
10. Патент RU 2058807 C1, опуб. 27.04.1996.
11. Патент SU 1152631 A, 30.04.1985.
12. Скопин А.Н. Связывание пыли экологически безопасными составами веществ на открытых пылящих поверхностях угледобывающих предприятий. Дисс. ... к.т.н. – М.: Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 1993.
13. Снижение потерь угля при его транспортировании в открытых полувагонах и при хранении на открытых складах методом обеспыливания поверхности угля: отчет о НИР / НИЦ «Асфальтит». – Екатеринбург, 2016. 90 с.

14. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю. Подготовка промышленных газов к очистке. – М.: Химия, 1995. 192 с.
15. Шильяев М.И., Шильяев А.М. Принцип сравнения пылеулавливающих систем по удельным энергозатратам на очистку газов // Изв. Вузов: Строительство. 2002. № 4.
16. Kim S, Scholes CA, Heath DE, Kentish SE. Gas-liquid membrane contactors for carbon dioxide separation: A review. *ChemEng J.* 2021.
17. O.Yu. Aripdjanov, Sh.P. Nurillaev, S.M. Turobjonov, Jiujiang Petroleum and Chemical Factory, China Petroleum & Chemical Co. 4, 14–19 (2013).
18. Suleman H, Fosbol PL, Nasir R, Ameen M. Sustainable carbon capture: technologies and applications. Boca Raton CRC Press. 2022.
19. Nikolaev V.V., Busigina N.B., Busigin I.G., Basic processes of physical and physico-chemical processing of gas. – M., Nedra, 1998.
20. Wang M, Lawal A, Stephenson P, Sidders J, Ramshaw C. Post-combustion CO₂ capture with chemical absorption: a state of the art review. *ChemEng Res Des.* 2011.

REFERENCES

1. Absorbciya i py'leulavlivanie v proizvodstve mineral'ny'x udobrenij / Pod red. I.P. Muxlenova i O.S. Kovaleva. – M.: Ximiya, 1987. 208 s.
2. Berezhinskij A.I., Xomutinnikov P.S. Utilizaciya, oxlazhdenie i ochildka konverterny'x gazov. – M.: Metallurgiya, 1987. 216 s.
3. Burenin V.V. Zashhita atmosfernogo vozduxa ot proizvodstvennoj py'li, toksichny'x parov i gazov // E'kologiya i promy'shlennost' Rossii. 2004. № 9. S. 25–29.
4. Vlasov A.A. E'nergoberegayushhie i e'kologicheski chisty'e texnologii. – M.: Akademiya, 2019. 284 s.
5. Il'in V.A. Metody ocenki e'kologicheskogo ushherba. – M.: E'konomika, 2021. 198 s.
6. Kouzov P.A., Maly'gin A.D., Skryabin G.M. Ochildka ot py'li gazov i vozduxa v ximicheskoy promy'shlennosti. – L.: Ximiya, 1982. 256 s.
7. Koshkarov V.E., Morozov Yu.P. i dr. Py'leobrazovanie i vozmozhnost' okuskovaniya py'li shaxtnoj plavki okislenny'x nikel'ny'x rud // Materialy XVII Mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoj konferencii «Nauchny'e osnovy i praktika pererabotki rud i texnologicheskogo sy'r'ya». – Ekaterinburg: UGGU, 2012. 322 s.
8. Maly'shev V.P. Sovremennye texnologii ochildki vozduxa. – SPb.: Professiya, 2020. 308 s.
9. Nikiforov A.V. Promy'shlennaya e'kologiya i oxrana okruzhayushhej sredy. – M.: KNORUS, 2021. 286 s.
10. Patent RU 2058807 C1, opub. 27.04.1996.
11. Patent SU 1152631 A, 30.04.1985.
12. Skopin A.N. Svyazy'vanie py'li e'kologicheski bezopasny'mi sostavami veshhestv na otkry'ty'x py'lyashnix poverxnostyax ugledoby'vayushnix predpriyatij. Diss. ... k.t.n. – M.: Institut problem kompleksnogo osvoeniya nedr RAN, 1993.
13. Snizhenie poter' uglya pri ego transportirovanii v otkry'ty'x poluvagonax i pri xranenii na otkry'ty'x skladax metodom obespy'livaniya poverxnosti uglya: otchet o NIR / NICz «Asfal'tit». – Ekaterinburg, 2016. 90 s.
14. Uzhov V.N., Val'dberg A.Yu. Podgotovka promy'shlenny'x gazov k ochildke. – M.: Ximiya, 1995. 192 s.
15. Shilyaev M.I., Shilyaev A.M. Princip sravneniya py'leulavlivayushnix sistem po udel'ny'm e'nergozatrata na ochildku gazov // Izv. Vuzov: Stroitel'stvo. 2002. № 4.
16. Kim S, Scholes CA, Heath DE, Kentish SE. Gas-liquid membrane contactors for carbon dioxide separation: A review. *ChemEng J.* 2021.
17. O.Yu. Aripdjanov, Sh.P. Nurillaev, S.M. Turobjonov, Jiujiang Petroleum and Chemical Factory, China Petroleum & Chemical Co. 4, 14–19 (2013).
18. Suleman H, Fosbol PL, Nasir R, Ameen M. Sustainable carbon capture: technologies and applications. Boca Raton CRC Press. 2022.
19. Nikolaev V.V., Busigina N.B., Busigin I.G., Basic processes of physical and physico-chemical processing of gas. – M., Nedra, 1998.
20. Wang M, Lawal A, Stephenson P, Sidders J, Ramshaw C. Post-combustion CO₂ capture with chemical absorption: a state of the art review. *ChemEng Res Des.* 2011.

