

Научная статья
УДК 502.55
DOI 10.46698/VNC.2026.33.22.001

Оценка эффективности применения гидро-аэроионного способа очистки промышленных газов

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

Аннотация. В статье рассмотрен принципиально новый способ очистки газов промышленных предприятий с использованием высокого окислительно-восстановительного потенциала разноразряженных электролитов (католита и анолита) холодного мелкодисперсного тумана высокого давления и оценка эффективности его применения.

Ключевые слова: очистка газов, пылегазовая смесь, гидро-аэроионный способ, эффективность

Для цитирования: Марзаев М.О., Лолаев А.Б. Оценка эффективности применения гидро-аэроионного способа очистки промышленных газов // Вестник Владикавказского научного центра РАН. 2026. Т. 26. № 3. С. 103–107.

DOI 10.46698/VNC.2026.33.22.001

Evaluation of the efficiency of hydro-aerionic industrial gas cleaning

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, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vladikavkaz, Russia, abl-2010@mail.ru

Abstract. The article discusses a fundamentally new method for purifying gases from industrial enterprises using high oxidation-reduction potential of differently charged electrolytes (catholyte and anolyte) of cold, finely dispersed high-pressure fog and an assessment of its application efficiency.

Keywords: gas scrubbing, dust-gas mixture, hydro-aerionic method, efficiency

For citation: Marzaev M.O., Lolaev A.B. Evaluation of the efficiency of hydro-aerionic industrial gas cleaning // Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center of RAS. 2026. Vol. 26. No.3. P. 103–107. DOI 10.46698/VNC.2026.33.22.001

Введение. В условиях современного экономического и экологического давления промышленность сталкивается с необходимостью минимизировать своё воздействие на окружающую среду, что является важнейшим аспектом, влияющим на принятие решений о внедрении новых технологий. Эффективность природоохранных мероприятий оценивается с позиции их воздействия на состояние окружающей среды, экономическую обоснованность (сокращение затрат, связанных с платой за негативное воздействие на окружающую среду, штрафами за превышение нормативов, а также получением налоговых льгот и субсидий), снижение объемов выбросов загрязняющих веществ, улучшение качества атмосферного воздуха и повышение экологической безопасности региона [1, 4].

Эффективно реализованные природоохранные меры позволяют предприятиям не только минимизировать влияние на окружающую среду, но и сокращать расходы, связанные с эксплуатацией оборудования.

Для наиболее объективной оценки проводится интегральный анализ, объединяющий экологические и экономические показатели. В зависимости от приоритетов предприятия используется соответствующий вес показателей при сравнении различных технологий [5].

Выбор технологии очистки отходящих газовых выбросов на промышленных предприятиях требует сопоставления не только экологических, но и экономических показателей. Важнейшими критериями при оценке являются снижение объема выбросов,

стоимость внедрения, годовая экономия и срок окупаемости [12, 16, 18].

Методика и оборудование. За основу разработанного и запатентованного автором способа очистки промышленных газов от вредных примесей – гидро-аэроионного метода очистки – взята способность ионизированных частиц атмосферного газа – аэроионов, образующихся при диспергировании (микро-фрагментации) и активации воды под действием электрического тока, создавать положительно и отрицательно заряженные атомы кислорода. В результате чего резко возрастает ассоциативная (абсорбционная) способность водного аэрозоля (тумана).

В природе водные аэроионы образуются под воздействием солнечного света, радиации и воды.

Метод осуществляется путем поочередного воздействия на пылегазовую смесь холодным туманом высокого давления католита и анолита, представляющего собой мелкодисперсный туман из разноименно заряженных электролитов с высоким окислительно-восстановительным потенциалом (рис. 1 и 2).

Установка состоит из объекта вредных выбросов (1), за основу была взята чугунная печь (буржуйка) для сжигания каменного угля, газохода, термопрокладки (2) асбестовой толщиной 5 см, туманообразователя-1 DQP-800A для охлаждения

загрязненного газа (3), термометра, озонатора-1 Ozonbox AIR-40 (4), камеры охлаждения-1 с туманообразователем-2, предварительно подготовленного анолита с pH = 10–12. В камерах очистки (1–4) установлен резиновый шланг диаметром 3 см для стока отходов поликомпонентного раствора в отборник, в камере-2 с католитом pH = 0–3.

Далее озонатором-2 регулируется ПДН очищенного газа. В трубопроводе установили струнный цифровой анемометр AR866 для измерения потока газа. Для контроля движения потока газа использовали вентилятор (5) радиальный ЗРВ-14М.

Для контроля степени очистки загрязненного газа в трубопровод встроили газоанализатор (6) Геолан-1П, с возможностью непрерывного автоматического измерения концентрации газов (оксида углерода, диоксида серы, диоксида азота, оксида азота, аммиака, сероводорода, кислорода, диоксида углерода).

В процессе экспериментальных исследований было выявлено, что эффективность ОВП через озонирование уменьшается, если температура потока загрязненного газа выше 100 °С.

Нами было принято решение перед этапом озонирования добавить этап охлаждения загрязненного газа и довести охлаждение до максимально эффективного показателя в пределах 30–70 °С.

Температуру проходящего потока газа опреде-

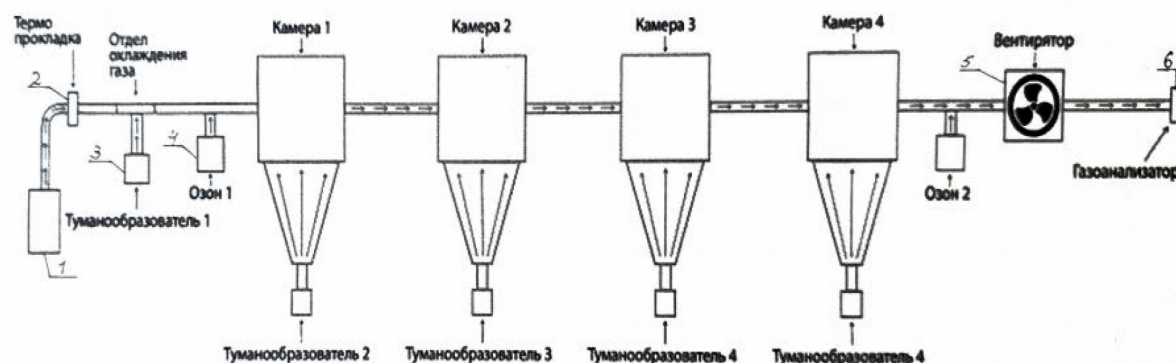


Рис. 1. Установка для очистки дымовых газов (вид сверху)

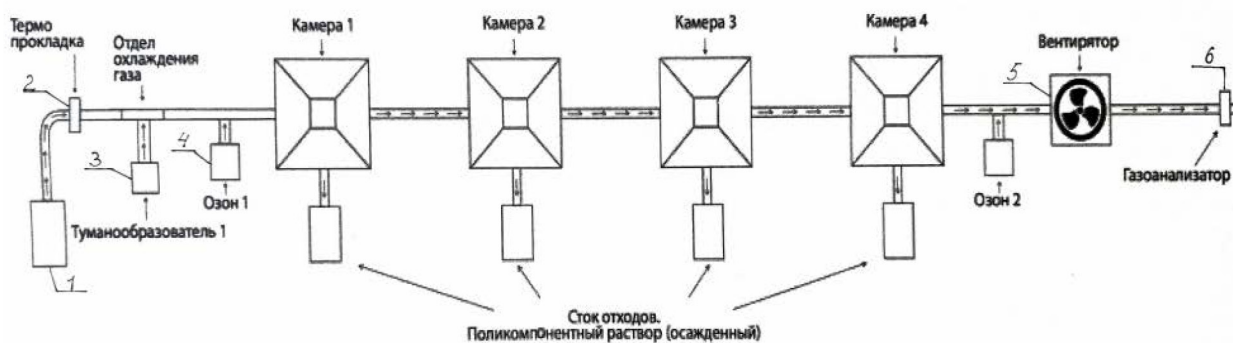


Рис. 2. Установка для очистки дымовых газов (вид сбоку)

Таблица 1

Результаты исследований сточных вод

№ п/п	Определяемый показатель	Ед. изм.	Результаты испытаний (измерений) с характеристикой погрешности или расширенной относительной неопределенности**±дш)*	ПДК
1	Кальций	мг/дм ³	250 ±25	180
2	Магний	мг/дм ³	91,4 ± 12,8	50
3	Сульфат-ион	мг/дм ³	180 ±27,0	100–500
4	Фосфат ион	мг/дм ³	<0,05	–
5	Цинк	мг/дм ³	0,057 ±0,0 И	0,01–0,1
6	Никель	мг/дм ³	2,08 ± 0,42	0,01–0,02
7	Железо	мг/дм ³	3,45 ± 0,69	0,1–0,3
8	Марганец	мг/дм ³	0,77 ±0,15	0,01–0,1
9	Кадмий	мг/дм ³	0,012 ±0,004	0,001
10	Свинец	мг/дм ³	0,0024 ±0,0010	0,03
11	Хром	мг/дм ³	0,614 ±0,123	0,05
12	Медь	мг/дм ³	0,065 ±0,013	0,001–0,1
13	Сухой остаток	мг/дм ³	1840 ±92	1000–1500
14	Жесткость общая	°ж	>8,0	7,0
15	Нефтепродукты	мг/дм ³	<0,05	0,05–0,3
16	Формальдегид	мг/дм ³	<0,02	0,01
17	Фенолы общие	мг/дм*	0,25 ± 0,09	0,001
18	Взвешенные вещества	мг/дм*	125 ±23	0,25–0,75

ляли путем установки в трубопроводе термометра WSS-411 после процесса охлаждения благодаря туманообразователю с дисперсией частиц свыше 8 мкм.

В процессе проведения экспериментальных исследований использовали термопрокладку между трубами, чтобы тепло, которое идет от котла, не попадало по трубе на металл основных узлов очистки.

Также в процессе лабораторных исследований было обнаружено, что при охлаждении газа до непосредственного контакта камеры очистки эффективность повышается многократно, что даёт возможность увеличить степень очистки.

Охлаждение также увеличивает эффективность взаимодействия через отсек с озонированием. Было решено, что после очистки газов мы будем

увеличивать при необходимости озоновый уровень в выходящих газах.

Вода поступает через выпрямитель (для создания анолита и католита). Выпрямитель представляет собой пластиковый короб толщиной 5 мм, габаритные размеры: длина – 1 м, ширина – 0,5 м, высота – 0,5 м, который разделен фильтр-тканью в процентном соотношении 70:30, где 70 % – католит («живая» вода) с pH > 7, 30 % – анолит («мертвая» вода) с pH < 7. К коробу присоединены титановые нержавеющие пластины, для увеличения площади поверхностного соприкосновения, к ним подключены электроды, которые создают электрическое напряжение, и происходит разделение воды на «живую» и «мертвую». На сторону А устанавливали электрод с положительным зарядом, на сторону К – электрод с отрицательным зарядом. Время

разделения составило примерно 5 часов на объем воды в 100 л.

Выпрямитель является проточным для того, чтобы максимально быстрее и эффективнее разделять анолит и католит на две камеры. При этом расход воды составил 2 л/ч на 1 000 м³ выбросов.

После того как вода прошла через выпрямитель, она накапливается в специальных ёмкостях для анолита и католита, затем заряженная вода попадает в туманообразователи и далее – в камеры очистки. В этот момент газ, образующийся в объекте вредных выбросов, проходит через камеру охлаждения. Причем газ охлаждается для более эффективного дальнейшего взаимодействия с озоном и очисткой в камерах с плотным туманом.

Также для оценки эффективности применяемого способа очистки проводили исследования сточных вод (осадка) из камер установки в соответствии с НД [2, 8–10].

Результаты. Для экспериментальной проверки предложенного способа были взяты пробы сточных вод из камер установки. В соответствии с действующим законодательством РФ, выбросы подлежат регулированию по нормам предельно допустимых выбросов (ПДВ), установленным для каждого вещества. Результаты исследований по определению острой токсичности сточных вод приведены в *таблице 1*.

Из *таблицы 1*, по результатам исследований сточных вод, образующихся в камерах гидро-аэро-ионной установки очистки промышленных газов, видно, что в процессе газоочистки загрязняющие вещества эффективно переходят из газовой фазы в жидкую. Анализ проб подтвердил накопление в сточных водах значительного количества минеральных компонентов, тяжёлых металлов и органических соединений, что свидетельствует о высокой эффективности улавливания загрязняющих примесей гидро-аэроионным методом.

Установлено превышение предельно допустимых концентраций по ряду показателей: кальцию, магнию, железу, марганцу, никелю, кадмию, хрому, фенолам, а также по сухому остатку и общей жёсткости. Особенно высокие концентрации выявлены

для никеля, хрома, железа и фенолов, что указывает на интенсивное извлечение из промышленных газов токсичных компонентов техногенного происхождения. Повышенное содержание сухого остатка и жёсткости свидетельствует о накоплении растворённых солей и продуктов взаимодействия газовых выбросов с водной средой.

При этом содержание нефтепродуктов, меди, цинка, свинца и сульфат-ионов находится в пределах допустимых значений, что указывает на избирательный характер загрязнения и особенности состава очищаемых газов.

Таким образом, гидро-аэроионный способ очистки промышленных газов способен эффективно удалять из газовой смеси значительную часть вредных примесей за счёт их абсорбции и осаждения в жидкой фазе. Однако образующиеся сточные воды характеризуются высоким уровнем загрязнения и требуют последующей очистки перед сбросом или повторным использованием. Полученные результаты подтверждают необходимость разработки комплексной системы водоподготовки и утилизации осадков, образующихся в процессе эксплуатации установки газоочистки.

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 паробразных 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, коксохимической промышленности и добыче редкоземельных химических элементов с максимально возможной очисткой дымовых газов при минимальных затратах с дальнейшей переработкой конденсата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бутенко А.Г. Комбинированная система очистки воздуха / А.Г. Бутенко, С.Ю. Смык // *Энерготехнологии и ресурсосбережение*, 2010.
2. ГОСТ 59024-2020. Вода. Общие требования к отбору проб. – Москва, 2022. 70 с.
3. Дмитриев А.В. Улавливание мелкодисперсных твердых частиц из газовых потоков в прямоугольных сепараторах / А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, Н.В. Линь // *Вестник Иркутского государственного технического университета*, 2018. Т. 22. № 3 (134).
4. Защита атмосферы от промышленных загрязнений: Справ. изд. Ч. 1 / Под ред. С. Калверта, Г.М. Инглунда. – М.: Металлургия, 2008. 760 с.
5. Ильин В.А. Методы оценки экологического ущерба. – М.: Экономика, 2021. 198 с.
6. Кошкареев С.А. Оценка эффективности аппарата мокрой очистки обеспыливания выбросов печей обжига керамзита / С.А. Кошкареев, В.Н. Азаров // *Инженерно-строительный журнал*. 2015. № 2. С. 18–32.
7. Никифоров А.В. Промышленная экология и охрана окружающей среды. – М.: КНОРУС, 2021. 286 с.
8. ПНДФ 14.1:2:3. 98–97. Количественный химический анализ вод. Методика измерений общей жесткости в пробах природных и сточных вод титриметрическим методом. Москва, 2016. 25 с.
9. ПНДФ 14.1:2:4.182-02. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации фенолов (общих и летучих) в пробах природных, питьевых и сточных вод флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «флюорат-02». – Москва, 2010. 31 с.
10. ПНДФ 14.1:2:4.214-06. Методика измерений массовых концентраций железа, кадмия, кобальта, марганца, никеля, меди, цинка, хрома и свинца в питьевых, поверхностных и сточных водах методом пламенной атомно-

абсорбционной спектрометрии. – Москва, 2011, 22 с.

11. Пыриков А.Н., Невраев В.П., Шак А.Р. и др. Оптимизация режима зажигания и дополнительного обогрева агрегационной шихты. – Сталь, № 10, 1991 г. С. 3–5

12. Саламова Н.В. Методы одновременной очистки дымовых газов ТЭС от оксидов серы и азота // Электрические станции, 2001. № 12. С. 56–60.

13. ФР.1.39.2007.03223. Биологические методы контроля. Методика определения токсичности вод, водных вытяжек из почвы, осадков сточных вод и отходов по изменению уровня флуоресценции хлорофилла и численности клеток водорослей. – Москва: «АКВАРОС», 2007, 70 с.

14. Энговатова В.В. Анализ способов очистки дымовых газов от вредных примесей / В.В. Энговатова, Д.А. Оксюзьян, А.Н. Рязанова, А.В. Энговатов // Open innovation,

2018. С. 23–26.

15. Hasler, P. H. Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification / P. H. Hasler, T. Nussbaumer // Biomass and bioenergy, 1999. Т. 16. №. 6. С. 385–395

16. Li, J. Theory and application of cyclone with impulse electrostatic excitation for cleaning molecular gas / J. Li, W. Cai // Journal of electrostatics, 2006. Т. 64. №. 3–4. С. 254–258

17. Obermair, S. Investigation of the flow pattern in different dust outlet geometries of a gas cyclone by laser Doppler anemometry / S. Obermair, J. Woisetschlager, G. Staudinger // Powder Technology, 2003. Т. 138. №. 2–3. С. 239–251.

18. Shuanshi, F. Energy efficiency simulation of the process of gas hydrate exploitation from flue gas in an electric power plant / F. Shuanshi, W. Xi, L. Xuemei, W. Yanhong // Natural Gas Industry B, 2017. No. 6. P. 470–476.

REFERENCES

1. Butenko, A.G. Kombinirovannaya sistema ochistki vozdukh / A.G. Butenko. S. Yu. Smyk // Energotekhnologii i resursobezrezheniye. 2010.

2. GOST 59024-2020. Voda. Obshchiye trebovaniya k otboru prob. – Moskva. 2022. 70 s.

3. Dmitriyev, A.V. Ulavlivaniye melkodispersnykh tverdykh chastits iz gazovykh potokov v pryamougolnykh separatorakh / A.V. Dmitriyev, V. E. Zinurov, O.S. Dmitriyeva. N.V. Lin // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2018. Т. 22. №. 3 (134).

4. Zashchita atmosfery ot promyshlennykh zagryazneniy: Sprav. izd. Ch. 1 / Pod red. S. Kalverta. G.M. Ingunda. – M.: Metallurgiya. 2008. 760 s.

5. Ilin V.A. Metody otsenki ekologicheskogo ushcherba. – M.: Ekonomika. 2021. 198 s.

6. Koshkarev, S. A. Otsenka effektivnosti apparata mokroy ochistki obespylivaniya vybrosov pechey obzhiga keramzita / S. A. Koshkarev, V.N. Azarov // Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal. 2015. №. 2. S. 18–32.

7. Nikiforov A.V. Promyshlennaya ekologiya i okhrana okruzhayushchey sredy. – M.: KNORUS. 2021. 286 s.

8. PNDF 14.1:2:3. 98–97. Kolichestvennyy khimicheskyy analiz vod. Metodika izmereniy obshchey zhestkosti v probakh prirodnykh i stochnykh vod titrimetricheskimi metodami. Moskva. 2016. 25 s.

9. PNDF 14.1:2:4. 182-02. Kolichestvennyy khimicheskyy analiz vod. Metodika izmereniy massovoy kontsentratsii fenolov (obshchikh i letuchikh) v probakh prirodnykh. pityevykh i stochnykh vod fluorimetricheskimi metodami na analizatore zhidkosti «flyuorat-02». – Moskva. 2010. 31 s.

10. PNDF 14.1:2:4. 214-06. Metodika izmereniy massovykh kontsentratsiy zheleza, kadmiya, kobalta, margantsa, nikelya, medi, tsinka, khroma i svintsy v pityevykh, poverkhnostnykh i stochnykh vodakh metodami plamennoy atomno-absorbtsionnoy spektrometrii. – Moskva. 2011. 22 s.

11. Pyrikov A.N., Nevrayev V.P., Shak A.R. i dr. Optimizatsiya rezhima zazhiganiya i dopolnitelnogo obogreva aglomeratsionnoy shikhty. – Stal. № 10. 1991 g. S. 3–5

12. Salamova N.V. Metody odnovermennoy ochistki dymovykh gazov TES ot oksidov sery i azota // Elektricheskiye stantsii. 2001. № 12. S. 56–60.

13. ФР.1.39.2007.03223. Биологические методы контроля. Методика определения токсичности вод, водных вытяжек из почвы, осадков сточных вод и отходов по изменению уровня флуоресценции хлорофилла и численности клеток водорослей. – Москва: «АКВАРОС». 2007. 70 с.

14. Engovatova V.V. Analiz sposobov ochistki dymovykh gazov ot vrednykh primesey / V.V. Engovatova, D.A. Oksuzian, A.N. Ryazanova, A.V. Engovatov // Open innovation. 2018. S. 23–26.

15. Hasler, P. H. Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification / P. H. Hasler, T. Nussbaumer // Biomass and bioenergy. 1999. Т. 16. №. 6. С. 385–395

16. Li, J. Theory and application of cyclone with impulse electrostatic excitation for cleaning molecular gas / J. Li, W. Cai // Journal of electrostatics. 2006. Т. 64. №. 3–4. С. 254–258

17. Obermair, S. Investigation of the flow pattern in different dust outlet geometries of a gas cyclone by laser Doppler anemometry / S. Obermair, J. Woisetschlager, G. Staudinger // Powder Technology. 2003. Т. 138. №. 2–3. С. 239–251.

18. Shuanshi, F. Energy efficiency simulation of the process of gas hydrate exploitation from flue gas in an electric power plant / F. Shuanshi, W. Xi, L. Xuemei, W. Yanhong // Natural Gas Industry B. 2017. No. 6. P. 470–476.

