Технологии, методы и средства защиты

УДК 541.15+533.9

DOI: 10.25514/CHS.2018.2.14118

ПРОМЫШЛЕННЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА С ПОМОЩЬЮ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

А. З. Понизовский*, С. Г. Гостеев, О. С. Кужель, А. С. Смирнов

Филиал АО «Объединенная Двигателестроительная Компания» «Машиностроительное Конструкторское Бюро «Горизонт», г. Дзержинский Московской обл., Россия, *e-mail: horizontl56@rambler.ru

Поступила в редакцию 16.10.2018 г.

Аннотация – Описаны промышленные установки для очистки воздуха от экологически вредных газообразных примесей, принцип действия которых основан на низкотемпературной неравновесной плазме газового разряда. На основе этой технологии ФМКБ «Горизонт» на протяжении 5 лет серийно выпускает линейку модульных промышленных установок под общей маркой «Корона» с производительностью в диапазоне 1–15^{-10³} н. м³/час. Представлены физические принципы работы этих установок. Описана конструкция установок и их технико-экономические показатели. Представлены результаты по очистке выбросных газов промышленных и коммунальных предприятий, подтверждающие эффективность технологии при очистке выбросов канализационных насосных станций и крупногабаритных очистных сооружении от запахов и мелкодисперсного тумана. Предложены пути оптимизации установок и перспективные направления их использования.

Ключевые слова: низкотемпературная плазма, очистка воздуха, импульсная высоковольтная техника.

INDUSTRIAL FACILITIES FOR AIR CLEANING WITH THE USE OF LOW TEMPERATURE NON-EQUILIBRIUM GAS-DISCHARGE PLASMA

A. Z. Ponizovsky*, S. G. Gosteev, O. S. Kuzhel', and A. A. Smirnov

Affiliated Branch of Joint-Stock Company "United Engine Corporation" "Horizont" Design and Engineering Bureau, Dzerzhinsky, Moscow region, Russia, *e-mail: horizontl56@rambler.ru

Received October 16, 2018

Abstract – Industrial installations for air purification from environmentally harmful gaseous emissions are described, the principle of action of the installations is based on using low-temperature non-equilibrium gas-discharge plasma. By applying this technology, Design and Engineering Bureau "Horizont" has been serially manufacturing a line of modular industrial units for air cleaning under the trademark "Korona" operating with a capacity in the range of $(1-15)\cdot10^3$ m³/hours, in the last 5 years. Physical operation principles of this equipment are given. The design of installations and their technical and economic parameters are considered. The results of purification of exhaust gases from a variety of industrial and municipal enterprises are presented, confirming the effectiveness of this technology for cleaning emissions of sewage pumping stations and large-scale sewage treatment plants from odors and fine mist. Possible ways of optimization of the equipment work and promising trends of its usage are proposed.

Keywords: low temperature plasma, air purification, pulsed high-voltage equipment.

введение

Очистка выбросов от газообразных загрязнений является важнейшей задачей охраны воздушной среды, в том числе воздуха рабочей зоны. Один из путей решения этой проблемы – внедрение электрофизического метода очистки газов с помощью наносекундной низкотемпературной плазмы.

Физический принцип такой очистки заключается в использовании импульсного наносекундного стримерного коронного разряда (HCKP) полярности качестве положительной инструмента конверсии В для газообразных примесей в жидкие и твердые продукты [1-3]. В импульсном коронном разряде образуется неравновесная низкотемпературная плазма (ННТП), в которой ионы имеют температуру окружающей среды, а электроны обладают энергией в 5–15 эВ, достаточной для возбуждения, диссоциации и ионизации молекул газов, а также для образования радикалов и химически частиц. Радикалы и активные частицы взаимодействуют с активных органическими и газообразными примесями, окисляя, разлагая или преобразуя их в жидкие, твердые и газообразные продукты, которые впоследствии удаляются стандартными методами [3].

Теоретические расчеты и результаты экспериментов показывают, что энергетическая цена очистки газа от органических и неорганических примесей составляет не менее 20 эВ на молекулу загрязнителя [2]. Соответствующие плотности энергий могут быть достигнуты и в стандартных электрофильтрах, в которых самостоятельный разряд реализуется в виде короны постоянного тока. Однако распределение энергии электронов в короне постоянного тока имеет максимум при значениях порядка 1 эВ, что не позволяет осуществить эффективную конверсию газообразных примесей.

Несмотря на большое количество работ, связанных с этой тематикой, в них описываются результаты опытных или опытно-промышленных исследований [1, 4–6], насколько нам известно, установки для очистки воздуха посредством НСКР серийно производятся только нашей организацией.

Основными элементами очистных установок ННТП являются частотный высоковольтный генератор импульсных напряжений (ГИН) и реакторные камеры, в которых посредством наносекундной стримерной короны образуется ННТП. Ранее было показано [7], что передача энергии в ННТП определяется конструктивными характеристиками реакторной камеры и параметрами ГИН. Однако детального анализа влияния этих параметров на передачу энергии от ГИН к нагрузке не проводилось. Поэтому, несмотря на то, что в ФМКБ «Горизонт» уже в течение 5 лет выпускаются серийные установки под общим названием «Корона» для очистки выбросных газов от экологически вредных газообразных и мелкодисперсных примесей с помощью ННТП, постоянно проводятся исследования, связанные с оптимизацией установок.

Цель данной работы – обобщение информации о разработанных промышленных установках «Корона» и результатах их применения для очистки

различных выбросных газов. Большое внимание также уделено методикам и результатам исследований по оптимизации работы таких очистных установок.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для удобства изложения в таблице 1 приведен список обозначений, используемых в данной статье.

Обозначение		Расшифровка			
U _{id} ,	[kV]	Импульсное напряжение на выходе ненагруженного			
		генератора			
Up	[kV]	Импульс напряжения на нагрузке			
Ip	[A]	Импульс тока в нагрузке			
$P_p = U_p \cdot I_p$	[MW]	Импульсная мощность в нагрузке			
$W_p = \int P_p dt$	[J]	Рассчитанная по осциллограммам внедряемая в газ энергия			
$A_f = (U_{id} / t_f)$	kV/μs	Крутизна фронта импульса ненагруженного генератора			
$W_{id} = 3 \cdot C \cdot U_{ch}^2 / 2$	[J]	Энергия, запасаемая в ГИНФ			
L	mH	Эквивалентная индуктивность переворотного контура ГИН Φ			
C _{O3}	mg/m ³	Концентрация озона в потоке воздуха			
G _{O3}	g/h	Часовая наработка озона			
W	m ³ /h	Расход воздуха или выхлопа			

Таблица 1. Список обозначений, используемых в статье

Все установки типа «Корона» имеют одинаковую конструктивную схему. На рис. 1а приведена блок-схема таких установок. Они состоят из ГИН, собранного по схеме Фитча (ГИНФ) с нечетным количеством ступеней, реакторной камеры с коаксиальным расположением многосерийного высоковольтного электрода и заземленной трубы и деструктора озона, заполненного активированным углем. Установки также имеют систему промывки внутренних поверхностей РК оборотной водой.

Эксперименты, результаты которых представленные в данной работе, проводились на стендовых и штатных установках типа «Корона» с применением систем измерения электрических и газовых параметров.



Рис. 1. (а) Блок-схема схема установок «Корона». (б) Принципиальная схема Фитч генератора импульсов.

Принципиальная схема ГИНФ представлена на рис. 16. Генератор состоит из высоковольтного зарядного устройства, трех последовательно соединенных конденсаторных блоков (Cst), двух зарядных индуктивностей (Ld) и коммутатора K, в качестве которого используется тиратрон, накального и запускающего трансформаторов.

Принцип действия ГИНФ иллюстрируют рис. 2 а, б.



Рис. 2. Принцип работы трехступенчатого ГИНФ.

Согласно рис. 2 а, в режиме разомкнутого коммутатора (switch off) зарядка конденсаторов трехступенчатого ГИНФ происходит таким образом, что полярность зарядки конденсаторов крайних ступеней противоположена таковой для средней ступени. В результате в фазе зарядки на выходе ГИНФ «дежурит» напряжение, равное зарядному напряжению (Uch). При замыкании коммутатора (switch on) происходит индукционный переворот средней ступени, в результате чего напряжения на всех трех ступенях складываются, и на выходе генерируется импульс напряжения с амплитудой (U_p), равной U_p $\approx 3 \cdot U_{ch}$. Сказанное иллюстрирует осциллограмма, представленная на рис. 2 б.

Преимущество использования трехступенчатого генератора Фитча состоит в том, что при его работе энергия из конденсаторов непосредственно передается в нагрузку, минуя коммутатор, что при одном коммутаторе дает возможность получить на холостом ходу $U_p \approx 3 \cdot U_{ch}$, а в паузе между импульсами поддерживать на высоковольтном электроде напряжение, равное U_{ch} . Поэтому в момент срабатывания тиратрона устройство типа «Корона» работает как генератор ННТП, а в паузе между импульсами – как стандартный трубчатый электрофильтр. Использование тиратрона в качестве коммутатора позволяет довести частоту следования импульсов до 1 кГц.

Газовые параметры измерялись в режиме online: концентрация озона озонометром Циклон 7.5, концентрации общей органики и сероводорода газоанализатором «Колион 1В», NO и NO₂ и NO_x (NO_x = NO + NO₂) O₂ газоанализатором TESTO 335, NO и NO₂, CO₂, SO₂, C_xH_x, H₂ и O₂ газоанализатором TESTO 350 и скорость потока газа - анемометром

TESTO 405. Показания приборов регистрировались визуально, чеками или в режиме on-line на PC.

Для измерения высокого постоянного и импульсного напряжения использовался смешанный делитель ДВН – 80И, импульсного тока – токовый трансформатор СТ-3-0.1. Электрические параметры регистрировались осциллографом Tektronix 2042 с записью на съемный флеш-накопитель.

Одной из главных проблем при разработке плазменных установок для очистки воздуха от газообразных примесей является вопрос максимально возможной передачи энергии от генератора импульсов к нагрузке, в качестве которой выступают реакторные камеры с многоточечными коронирующими электродами (рис. 3). Поэтому оптимизация параметров ГИНФ и реакторной камеры, соответствующая максимальной передаче энергии, являлась целью исследований в данной работе.

Нами было установлено, что радиус экранирования стримеров в НСКР составляет порядка 5 мм. Поскольку в качестве элементов составного высоковольтного электрода используется n—лучевые тонкие звездообразные диски и кольцевые проставки высотой d = 5 мм, то количество коронирующих точек (N) на 1 м длины высоковольтного электрода N \approx 200n. Для электрода (рис. 3) при n = 36 N = 7000.



Рис. 3. Фотографии высоковольтного электрода в момент подачи импульса (а), в паузе между импульсами (б).

На рис. 4 представлены типичные осциллограммы U_{id} , I_p , U_{ch} и $P_p = U_p \cdot I_p$ при $U_{ch} = 20$ кВ. Можно видеть, что под действием U_p в реакторной камере генерируется I_p , являющийся суммой токов всех коронирующих точек. В результате в газ внедряется энергия W_p , соответствующая импульсу мощности P_p . При этом импульс напряжения деформируется по сравнению с режимом XX, что свидетельствует об эффективной передаче энергии от ГИНФ в ННТП.

Установлено, что W_p является функцией от U_{ch} , следовательно, и A_f – чем выше эти величины, тем больше энергии передается в плазму. Это иллюстрируют рис. 5 и 6, на которых представлены графики зависимости U_{id} , , I_p , U_p , W_p , W_{id} от U_{ch} и A_f .



Рис. 4. Типичные осциллограммы U_{id} , , I_p , U_{ch} и $P_p = U_p \cdot I_p$ при $U_{ch} = 20$ кВ. Масштабы U–10kV/div I–200A/div P–5MW/div.



Рис. 5. Зависимости I_p , U_p , W_p , W_{id} , η от U_{ch} .



Рис. 6. Зависимости U_p , U_{id} , I_p , W_p , W_{id} от A_f .

Из рис. 6 следует, что с увеличением A_f наблюдается резкий рост как I_p , так и W_p , причем при значениях $A_f = 150-200$ кB/µs эффективность передачи энергии в газ ($\eta = W_p/W_{id}$) $\eta \rightarrow 1$.

Результаты экспериментов, как настоящей работы, так и работы [8] дали

возможность определить при $\eta \approx 100\%$ как оптимальное значение A_f , так и среднюю энергию стримеров, развивающихся от одной коронирующей точки (W_1). Это позволило составить достаточно простую систему уравнений (A), которые позволяют для заданной конструкции реакторной камеры определить оптимальные значения ГИНФ - U_{ch} и Cst. По нашим экспериментальным данным для оценочных расчетов установок «Корона» можно принять $W_1 = 3 \cdot 10^{-4}$ Дж и $A_f = 200$ кВ/µs (U_{ch} в [B], Cst в [Ф] L в[Гн]).

$$\begin{cases} \left[2 \cdot \frac{\text{Uch}}{\pi \cdot (\text{LCst})^{0.5}}\right] = \text{Af} \\ 1.5 \cdot \text{Uch}^2 \cdot \text{Cst} = \text{W1} \cdot \text{N} \end{cases}$$
(A)

В качестве примера в таблице 2 представлены расчетные данные оптимальных значений U_{ch} и С для двух стендовых установок «Корона» с различной длиной реакторной камеры (N = 7000 и 54000) и сравнение с экспериментальными результатами.

Таблица 2. Расчетные и экспериментальные параметры установок «Корона»

			Расчет			Эксперимент			
Установка	Ν	L	Uch	С	W _p	Uch	С	W _p	W _{id}
		мкГн	кВ	нΦ	Дж	кВ	нΦ	Дж	Дж
«Корона М»	7000	1	22	4,2	2,8	21	4,4	2,8	2,9
«Корона М2»	54000	1,5	30	8	11	24	6,6	5,75	5,8

Из таблицы следует, что из стендовых установок только «Корона М» работает в оптимальном режиме. Для установки «Корона М2» возможно использование более мощных генераторов.

Оптимизация работы установок путем повышения U_{ch} свыше 25–30 кВ ограничивается, главным образом, параметрами основных комплектующих ГИНФ – частотными конденсаторами, тиратронами и зарядными блоками, не способными при таких параметрах работать с необходимым ресурсом.

Вторым фактором, ограничивающим U_{ch}, является стримерный пробой в реакторной камере [8].

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАБОТЫ УСТАНОВОК «КОРОНА»

При поступлении в реакторную камеру загрязненного воздуха, под действием ННТП происходят следующие основные плазмохимические реакции.

Реакции образования атомарного кислорода и озона:

$$O_2 + e^- = 2O$$
 (1)

$$\mathbf{O}_2 + \mathbf{O} = \mathbf{O}_3 \,. \tag{2}$$

В случае нахождения в воздухе оксидов азота, очистка происходит по

приведенной ниже схеме реакций [6], причем для реальных выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания превалируют реакции (3–5). В результате большая часть оксидов азота превращаются в аэрозоль азотной кислоты.

$$NO + O \rightarrow NO_2 \tag{3}$$

$$H_2O + e^- \rightarrow OH + H \tag{4}$$

$$NO_2 + OH^- \to HNO_3 \tag{5}$$

$$N_2 + e^-(9,8 \ \Im B) \to 2 \ N + e^-$$
 (6)

$$N + NO \rightarrow O + N_2 \tag{7}$$

Сказанное подтверждает рис. 7, на котором представлена временная диаграмма очистки с помощью установки «Корона М» выхлопа дизельного двигателя объемом 2 л при 800 об/мин.



Рис. 7. Временная диаграмма очистки с помощью установки «Корона М» выхлопа дизельного двигателя объемом 2 л при 800 об/мин.

При наличии в выбросных газах окислов серы (SO₂) или сероводорода под действием ННТП происходят следующие реакции:

$$SO_2 + O \rightarrow SO_3$$
 (8)

$$SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4 \tag{9}$$

$$H_2S + 4O \to H_2SO_4. \tag{10}$$

В результате реакций происходит конверсия газообразной окиси SO₂ или H₂S в аэрозоль серной кислоты.

Гораздо сложнее идут многочисленные реакции по разрушению органических соединений в ННТП. Наиболее простой случай – это преобразование в ННТП газообразного формальдегида в аэрозоль муравьиной кислоты:

$$H_2O + e^- = OH + H^-$$
 (11)

 $CH_2O + e^-(3,6 \ \Im B) = H^- + HCO$ (12)

HCO + OH = HCOOH (13)

Как указывалось в выше, установки «Корона», использующие в качестве генератора импульсов схему Фитча, в паузе между импульсами работают как стандартные трубчатые электрофильтры. В результате образовавшиеся в ННТП аэрозоли кислот отбрасываются на внутренние стенки реакторной камеры, откуда смываются оборотной водой.

Необходимо отметить, что при концентрациях NOx и SO_2 в несколько объемных процентов в плазме начинаются, по-видимому, цепные реакции, которые приводят к резкому уменьшению удельных энергозатрат на очистку, по сравнению с очисткой воздуха с низкой концентрацией указанных веществ [10, 11].

КОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВОК «КОРОНА»

На рис. 8 представлена фотография установки «Корона М2», установленной на канализационной насосной станции (КНС) «Перово», г. Москва. Элементы конструкции установки, представленные на рис. 8, имеются и у остальных установок типа «Корона». Установки имеют модульную структуру.

Установка содержит следующие модули. Очистной модуль, состоящий из нижней (НГК) (1) и верхней (ВГК) (2) газораспределительных камер, блока реакторной камеры (3), деструктора озона (ДО) (4) и каплеотделителя (КО) (5). Высоковольтный модуль, состоящий из генератора импульсных напряжений (ГИНФ) (8), блока управления ГИНФ (6), стабилизатора питания накала тиратрона (10), высоковольтного зарядного устройства ИП-704 (7). Питание высоковольтных электродов реакторных камер осуществляется по кабелю 11. Система оборотного водоснабжения собрана в модуле 9.



Рис. 8. Установка «Корона М2». Обозначение узлов: 1 – нижняя газораспределительная камера; 2 – верхняя газораспределительная камера; 3 – реакторные камеры; 4 – деструктор озона; 5 – каплеотделитель; 6 – блок управления; 7 – высоковольтный источник; 8 – генератор высоковольтных импульсов; 9 – блок обеспечения оборотной водой.

ПРОМЫШЛЕННЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА

На рис. 9–13 приведены фотографии установок, размещенных на производстве и различных объектах АО «Мосводоканал», а также блочная установка «Корона М2», изготовленная по заказу ОКР «Сверхкрит», г. Пенза.





(a) (б) *Рис. 9.* Установки «Корона 3» для очистки выбросов металлургических печей.

(а) Установка для компании MSE (США).
1 – ГИНФ, 2 – реакторные камеры, 3 – пульт управления, 4 – зарядное устройство.



Puc. 10.

Парная установка «Корона М2» в цехе сброженного осадка на Курьяновских очистных сооружениях.

- 1 высоковольтные модули,
- 2 очистные модули,
- 3 деструкторы озона,
- 4 модули оборотной воды.

(б) Установка для АО «Салют». 1 – ГИНФ,
 2 – реакторные камеры, 3 – зарядное устройство, 4 – плавильная печь.



Puc. 11.

Многомодульная установка «Корона М 2» в контейнерном исполнении на Люберецких очистных сооружениях:

- 1 высоковольтные модули,
- 2-очистные модули,
- 3 деструкторы озона,
- 221 4 модули оборотной воды.







(а) Установка «Корона МЗ» канализационной насосной станции «Строгино».

- 1 высоковольтные модули,
- 2 очистные модули,
- 3 модуль оборотной воды,
- 4 деструктор озона.

(б) Монтаж парной установки «Корона M3» канализационной насосной станции «Люблино».



Рис. 13. Установка «Корона М1» в моноблочном исполнении для очистки выбросных газов пиролизной установки ОКР «Сверхкрит» г. Пенза. Обозначение узлов: 1-3 – блок реакторной камеры, 4 – вход выбросов, 5 – высоковольтный модуль (ГИНФ), 6 – блок управления, 7 – высоковольтное зарядное устройство.

В таблице 3 представлены характеристики промышленных установок типа «Корона».

	<i>Таблииа</i> 3. Хар	актеристики	промышленных	vстановок типа	«Корона»
--	-----------------------	-------------	--------------	----------------	----------

, 1		«Корона	«Корона	«Корона 3»	«Корона
		M2»	M2y»	-	3M»
Количество		14	27	1	3
действующих					
установок					
Параметры установок					
Расход выбросных	м ³ /	3000	5000	5000	15000
газов	Ч				
Емкость ступени, [С]	нΦ	6	6	10	12
Коммутатор		Тиратрон ТГІ	И 1-25/1000	ТПИ1- 10k/50	ТГИ 2-5k/50
Зарядное напряжение [U _{ch}]	кВ	22	22	32	28
Мощность	кВ т	4	6	8	8
Временные параметры импульсов τ_f/τ_p , xx	нс	120/300	120/500	250/700	300/700
Частота импульсов [f], макс.	Гц	700	1000	300	500
Реакторная камера					
Количество камер		4	4	4	6
Длина [L]	М	1.5	2	4	3
Внутренний диаметр [D]	MM	212	212	273	273
Диаметр	MM	56	56	120	120
коронирующего					
электрода [Dc]					
Межэлектродное	MM	78	78	77	77
расстояние [s]					
Количество	10^{3}	54	72	192	216
коронирующих точек N					
Macca	КГ	650	700	1 200	1300
Габариты	М	$2,5 \times 1 \times 3$	$2,5 \times 1 \times 3,5$	$2,5 \times 1 \times 5,2$	$2,5 \times 1 \times 6$

Все установки имеют модульную структуру. В табл. 3 представлены параметры и технические характеристики высоковольтных и очистных модулей установок серии «Корона», применяемых для очистки выбросов от фторидов на заводе «Салют», запахов и мелкодисперсных загрязнений на канализационных насосных станциях (КНС), Курьяновских и Люберецких очистных сооружениях.

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ УСТАНОВОК «КОРОНА»

За время эксплуатации установок корона был накоплен обширный материал по способности установок очищать самые разнообразные газообразные и мелкодисперсные примеси. Некоторые результаты, полученные

при промышленном использовании установок, представлены в таблицах 4 и 5.

Таолица 4. Гезультаты очистки выоросных газов на установках «корона»						
Вещество	Входная	Расход	Эффектив	Выходная	Энергозатраты	Тип
	концентрация	газа	ность	концентрац		установки
	макс.	макс.		ИЯ		
	$M\Gamma/M^3$	м ³ /ч	%	мг/м ³	Втч/ мг*м ³	
NOx	600	50	90	60	0.016	Корона М1
Сажа	1500	50	95	75	0.0001	Корона М1
H_2S	15	15000	90	1,5	0.03	Корона МЗ
H_2S	10	5000	90	1		Корона М2
Аэрозоль	20	500	99	0,01	0.2	Корона М
CrO ₃						
SO ₂	5000	600	70	1500	0,002	Корона М1
SO ₂	34	100	99	1500	0.002	Корона М
Толуол	100	100	95	5	0.3	Корона 3
HF	30	5000	95	1,5	006	Корона 3

Таблица 5. Результаты измерений «Мосэкомониторинга» по очистке воздуха от пахучих веществ на объектах АО «Мосводоканал»

Загря	знители	Эффективность,	Энергозатраты,						
Наименование Концентрация, мг/м ³ % Втч/м ³									
SO ₂ * 33,6 99,9 1,5									
Фенол**	Фенол** 0,37 86,4 0,9								
Аммиак** 0,55 89,8 1,4									
Формальдегид** 0,18 66,7 1,5									
Метилмеркаптан*** 0,0052 83,3 0,8									
H ₂ S**** 16,2 95,4 1									
* Протокол № 747 от 27.04.2012 КНС «Нагатино-2»									
** Протокол № 2571-2572-в от 09.01.2014 «Нагатино-2»									
*** Протокол № 1055-1056-в от 19.06.2013 КНС «Паведники-1»									
**** Протокол № 990-в от 22.08.2014 КНС «Коммунарка»									

Практическая значимость применения установок выражается не только в уменьшении количества выбрасываемых в воздушный бассейн большой Москвы вредных веществ, но и в сокращении количества жалоб жителей на неприятные запахи, например, рядом с КНС «Нагатино-2». При этом средняя органолептическая чувствительность человека по сероводороду находится на уровне норм предельно допустимых концентраций (ПДК) атмосферного воздуха населенных мест.

Данные прямых измерений концентрации сероводорода демонстрируют ее зависимость от цикла работы очистных сооружений, времени года и часа суток, что ставит задачу координации моментной мощности установки от степени загрязненности воздуха, которая в ближайшее время будет решена посредством микропроцессорного управления частотой импульсов и зарядным напряжением.

При эксплуатации установок в помещениях с повышенным содержанием сероводорода наибольшие трудности возникают в связи с ускоренным разрушительным электрохимическим воздействием последнего на гальванические цепи и электронные блоки, особенно в цепях, находящихся под высоким напряжением. Для нейтрализации проникновения аэрозольных частиц электротехническое и электронное оборудование размещается в герметичном вентилируемом корпусе и обеспечивается регулярной заменой фильтрующих элементов.

Следует отметить, что установки «Корона» являются активными устройствами по степени воздействия на загрязненный поток воздуха, однако они не требуют присутствия оперативного персонала, а их обслуживание в соответствии с регламентом работ осуществляется подготовленными работниками.

Особое внимание на очистных сооружениях уделяется проблеме концентрации озона в выбросах после установки и метана в аспирационном воздухе. Избыточный озон конвертируется в кислород в деструкторе 4 (рис. 8). вероятности При концентрации метана взрывоопасных наличия BO концентрациях, установки комплектуются проточными датчиками концентрации метана, настроенными на мгновенное отключение установки в случае превышения концентрации свыше 0,4 об.%.

Опыт эксплуатации установок показывает, что средняя продолжительность наработки на отказ составляет более 2000 часов непрерывной работы. На случай отказа установки оснащаются системой дистанционного контроля, которая позволяет сервисной службе оперативно проводить технические мероприятия по восстановлению их работоспособности.

СРАВНЕНИЕ УСТАНОВОК КОРОНА С ДРУГИМИ ТИПАМИ ОЧИСТНЫХ УСТАНОВОК

На рынке современного оборудования для очистки воздуха от вредных и, в первую очередь, газообразных веществ имеются установки с применением, в плазмокаталитической технологии. Несмотря числе, явную том на привлекательность метода потребителя, В действительности ЭТО ДЛЯ обыкновенные сорбционные устройства с предварительным облучением газа тем или иным типом разряда.

В таблице 6 приведены сравнительные характеристики установок типа «Корона» с зарубежными и отечественными установками этого типа.

Все приведенные в таблице 6 очистные установки позиционируются как плазменные очистные установки. И хотя все указанные установки имеют близкие значения основных характеристик, принцип очистки газов в установках «Plazmair standart ПЛАЗКАТ-аэро и «Корона М», существенно отличаются.

Наименование		Plazmair	«Корона М»	ПЛАЗКАТ-аэро
установки		standart	-	
Изготовитель		Plazmair	ФМКБ	PLAZKAT
			«Горизонт»	
Параметры	Размерность	Значение	Значение	Значение
Расход	м ³ /ч	1000	Модули 1000-	Модуль 10000
очищаемого			5000-20000	
газа				
Влажность	% макс.	75	90	75
очищаемого				
воздуха				
Температура	°C	18-90	5-70	50-130
очищаемого				
воздуха				
Удельный	B тч/ M^3	0,3	0.5	
расход				
электроэнергии				
Установленная	кВт	0,3	4	
мощность				
Напряжение	В	220-240	$380\pm10\%$	380
Степень	%	50-95	75-99	70-90
очистки				

Таблица 6. Сравнение характеристик установок типа «Корона» с характеристиками зарубежных и отечественных установок

В первых двух установках используются газоразрядные ячейки барьерного или скользящего разряда, которые могут только конверсировать часть газообразных примесей, но не удаляют их из потока воздуха. В результате в этих установках основная нагрузка по очистке как газообразных примесей, так и наработанных продуктов, ложится на сорбент-катализатор, масса которого достигает нескольких тонн при расходе воздуха порядка $10^4 \text{ м}^3/\text{ч}$. Из-за ограниченной сорбционной способности требуется весьма частая замена достаточно дорогостоящего сорбента-катализатора. Кроме того, используемые в этих установках газоразрядные ячейки барьерного или скользящего разряда из-за загрязнения их поверхности требуют постоянной чистки с остановкой работы установок.

В то же время в установках типа «Корона» очистка происходит в реакторных камерах за счет полной конверсии газообразных примесей в аэрозоли, главным образом, аэрозоли кислот. Полученные продукты, а также аэрозоль, находящийся в выбросах, оседают на внутренних стенках реакторной камеры, откуда непрерывно смываются либо оборотной водой, либо слабым раствором щелочи, который нейтрализует кислоты. Этот процесс осуществляется без остановки работы оборудования. Используемое для деструкции избыточного озона устройство содержит не более 100 кг активированного угля, который требует замены не чаше, чем 2 раза в год.

226

Важным показателем очистных установок является удельные капитальные затраты и эксплуатационные расходы. В установках «Корона» удельные капитальные затраты равны 1000 руб/м³ очищаемого воздуха. Эксплуатационные расходы за год, включая затраты электроэнергию, на воду и расходные материалы и обслуживание не превышают 10% от стоимости установки. К сожалению, произвести ценовое сравнение установок «Корона М» с установками Plazmair standart и ПЛАЗКАТ-аэро не представляется возможным, так как производители открыто не сообщают их цену и затраты на эксплуатацию. Однако тот факт, что установки «Корона М» различных модификаций покупаются, говорит о конкурентной цене наших установок.

выводы

- 1. Низкотемпературная неравновесная плазма, генерируемая наносекундным коронным разрядом высокого напряжения, является эффективным средством очистки воздуха от экологически вредных газообразных и мелкодисперсных примесей.
- 2. На основе этой технологии в ФМКБ «Горизонт» разработаны и серийно выпускаются промышленные установки «Корона» производительностью по очистке воздушных потоков объемом 1–15 тысяч нормальных м³/час.
- 3. Приведено подробное описание конструкции установок, включая устройство для генерации высоковольтных импульсов.
- 4. Показано, что регулируя параметры высоковольтного генератора импульсов, можно управлять энергией, вводимой в низкотемпературную плазму.
- 5. Проведен анализ опыта эксплуатации установок «Корона», который показал достаточно высокую надежность их работы и относительно низкие эксплуатационные расходы.

Список литературы:

- 1. Masuda S., Nakao H. // IEEE-IAS Annual Conference. 1986. Denver. P. 1173.
- 2. Валуев А.А. // Теплофизика высоких температур. 1990. Т. 28. № 5. С. 995.
- 3. Понизовский А.З. // Экологические системы и приборы. 2007. № 11. С. 14.
- 4. Dinelli G., Civitano L., Rea M. // IEEE-IAS Annual Meeting. Pittsburg, 1988.
- 5. Fridman A.A., Kennedy L.A. Plasma Physics and Engineering. Routledge: Taylor & Francis, 2004. P. 841.
- 6. *Kuwahara T., Yoshida K., Kuroki T. et al.* // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2014. V. 34. No. 1. P. 65.
- 7. Понизовский А.З., Абрамов А.А., Гончаров В.А. и др. // Электротехника. 1993. № 3. С. 52.
- 8. Понизовский А.З., Гостеев С.Г. // Ядерная физика и инжиниринг. 2016. Т. 7. № 5. С. 462.
- Понизовский А.З., Гостеев С.Г., Локтев Г.В. и др. // Тезисы 31 Всерос. семинара «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии». Москва, 2-3 июня 2010. М., 2010. С. 90.
- 10. *Harris G., Ponizovsky A.Z., Shvedchicov A.P. et al.* // Inter. Symp. on High Pressure, Low Temperature Plasma Chemistry. Cork, Ireland. August 31 September 2, 1998. P. 68.
- 11. *Абрамов А.А., Александрова Т.С., Гончаров В.А. и др. //* Материалы 2 семинара «Применение электронных пучков и импульсных разрядов для очистки отходящих газов». М., 1993. С. 30.

References:

- 1. Masuda S., Nakao H. // IEEE-IAS Annual Conference. 1986. Denver. P. 1173.
- 2. *Valuev A.A.* // Teplofizika vysokykh temperatur [High Temperature]. 1990. V. 28. No. 5. P. 995 [in Russian].
- 3. *Ponizovsky A.Z.* // Ekologicheskie systemy i pribory [Ecological systems and devices]. 2007. No. 11. P. 14 [in Russian].
- 4. Dinelli G., Civitano L., Rea M. // IEEE-IAS Annual Meeting. Pittsburg, 1988.
- 5. *Fridman A.A., Kennedy L.A.* Plasma Physics and Engineering. Routledge: Taylor & Francis, 2004. P. 841.
- 6. *Kuwahara T., Yoshida K., Kuroki T. et al.* // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2014. V. 34. No. 1. P. 65.
- 7. *Ponizovsky A.Z., Abramov A.A., Goncharov V.A. et al.* // Elektrotekhnika [Electrical Engineering]. 1993. No. 3. P. 52 [in Russian].
- 8. *Ponizovsky A.Z., Gosteev S.G.* // Yadernaya fizika i inzhiniring [Nuclear physics and engineering]. 2016. V. 7. No. 5. P. 462 [in Russian].
- Ponizovsky A.Z., Gosteyev S.G., Loktev G.V. et al. // Abstracts 31 All-Russian seminar "Ozone and other environmentally friendly oxidants. Science and technology". Moscow, June 2-3, 2010. M., 2010. P. 90 [in Russian].
- 10. *Harris G., Ponizovsky A.Z., Shvedchicov A.P. et al.* // Inter. Symp. on High Pressure, Low Temperature Plasma Chemistry. Cork, Ireland. August 31 September 2, 1998. P. 68.
- 11. Abramov A.A., Aleksandrova T.S., Goncharov V.A. et al. // Proceedings of 2nd seminar "Use of electron beams and pulsed discharges for cleaning exhaust gases". M., 1993. P. 30 [in Russian].