

УДК 664.727; 664.76; 631.348.8

UDC 664,727; 664.76; 631.348.8

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

ОЗОНАТОР КОМПРЕССОРНОГО ТИПА

COMPRESSOR TYPE OZONATOR

Гуляев Павел Владимирович
к.т.н., доцент кафедры ЭЭО и ЭМ
АЧИИ ФГБОУ ВО ДГАУ, Россия

Gulyaev Pavel Vladimirovich
Cand.Tech.Sci., assistant professor of EEE and EM
DGAU, Russia

Озеров Иван Николаевич
преподаватель
ГБПОУ РО «СИТ», Россия

Ozerov Ivan Nikolaevich
teacher
GBPOU RO "SIT", Russia

Гуляева Татьяна Владимировна
к.т.н., учитель математики и информатики
МБОУ СОШ №16 «Военвед», г Зерноград, Россия

Gulyaeva Tatiana Vladimirovna
Cand.Tech.Sci., teacher of mathematics and computer
science
School №16 Voenved, Zernograd, Russia

Дерипаскин Павел Сергеевич
аспирант кафедры ЭЭО и ЭМ
АЧИИ ФГБОУ ВО ДГАУ, Россия

Deripaskin Pavel Sergeevich
postgraduate student
DGAU, Russia

Статья посвящена разработке озонатора компрессорного типа. Рассмотрена конструкция высокопроизводительного компрессорного генератора озона, который может быть использован для промышленного обеззараживания комбинированных кормов, воды, молока и в системе предпосевной обработки семян. Данная конструкция позволяет генерировать озон с высокой концентрацией до 5 г/м³ при большой подаче воздуха или кислорода от компрессорной станции (до 2000 л/мин). В статье рассмотрена конструкция основных элементов трубчатого генератора озона, рассмотрены факторы влияющие на производительность озонатора. Предложена математическая модель позволяющая рассчитывать производительность озонатора при учете множества влияющих факторов. Данные факторы учитывают: параметры питающего напряжения, такие как величина и частота питающего напряжения; конфигурация и геометрические параметры электродов таких как, площадь электродов, конфигурация поверхности электродов и расстояние между электродами; параметрами диэлектрического барьера; а так же параметры прокачиваемого газа, таких как объем, температура, давление и состав. Особое внимание в статье уделено конструкции электродов выполненных из тканной проводочной сетки с размерами ячейки от 1,5×1,5 до 2,0×2,0 мм. Отмечено, что именно такие электроды позволяют получать максимальную производительность озонатора и не приводят к перегреву диэлектрического барьера и выходу генератора из строя. Так же в статье представлены результаты математического моделирования производительности озонатора при изменении различных факторов

The article is devoted to the development of a compressor type ozonator. It describes the design of a high-productivity compressor ozone generator, which can be used for industrial decontamination of mixed feeds, water, milk, and in the system of presowing treatment of seeds. This construction allows generating ozone with high concentration to 5 g/m³ at high feed air or oxygen from the compressor station (up to 2000 l/min). The article describes the design of the basic elements of tubular ozone generator, examines the factors influencing the productivity of the ozonator. The proposed mathematical model allows calculating the productivity of the ozonator when considering multiple influencing factors. These factors take into account: the parameters of supply voltage, such as the magnitude and frequency of the supply voltage; the configuration and geometrical parameters of electrodes such as, the area of the electrodes, the configuration of the surface of the electrodes and distance between electrodes; parameters dielectric barrier; and the transported gas parameters such as volume, temperature, pressure and composition. Special attention is paid to the design of the electrodes made of woven wire mesh with mesh sizes from 1.5×1.5 to 2.0×2.0 mm. It is noted, that such electrodes allow obtaining the maximum productivity of an ozonator, and they do not lead to overheating of the dielectric barrier, and do not output down the generator. In the same way, the article presents the results of the mathematical modeling of ozone generator productivity while changing various factors

Ключевые слова: СИСТЕМА ОБЕЗЗАРАЖИВА-

Keywords: DISINFECTION SYSTEM, OZONE-AIR MIXTURE FROM OZONE GENERATOR, COM-

НИЯ, ОЗОНО-ВОЗДУШНАЯ СМЕСЬ, ОЗОНАТОР, КОМПРЕССОР PRESSOR

Одной из основных проблем сдерживающих применение систем и технологий озонирования в сельском хозяйстве является отсутствие на рынке, надёжных, простых, экономичных, безопасных, высокопроизводительных, а главное дешёвых озонаторов.

Существующие на рынке конструкции озонаторов стоят, как правило, десятки, а то и сотни тысяч рублей, имея при этом производительность максимум до 100 г/ч.

Невозможность их универсального использования в различных технологических процессах снижает коммерческую привлекательность использования озона в сельскохозяйственных производствах.

Предлагаемая конструкция озонатора компрессорного типа, показанная на рисунке 1, обладает рядом существенных достоинств, одними из которых является высокая производительность и малая стоимость, а также способность работать без разрушения барьеров диэлектрических, электродов, высоковольтного блока, высоковольтного трансформатора под избыточным давлением до 6 атм.

Разработанный компрессорный озонатор состоит из двух п-сегментных кассетно-трубчатых барьерных генераторов озона 3, установленных симметрично, от центра внутри полиэтиленового корпуса цилиндрической формы 1. Между ними установлен встречно направленный перемешивающий вентилятор 6. С двух сторон полиэтиленовый корпус закрывается полиэтиленовыми герметизирующими крышками 4 с внутренним направляющим профилем, выполненным таким образом, чтобы с минимальным сопротивлением воздушному потоку закручивать и направлять воздух от стенок корпуса к центральным трубкам п-сегментных кассетно-трубчатый барьерных генераторов озона и наоборот.

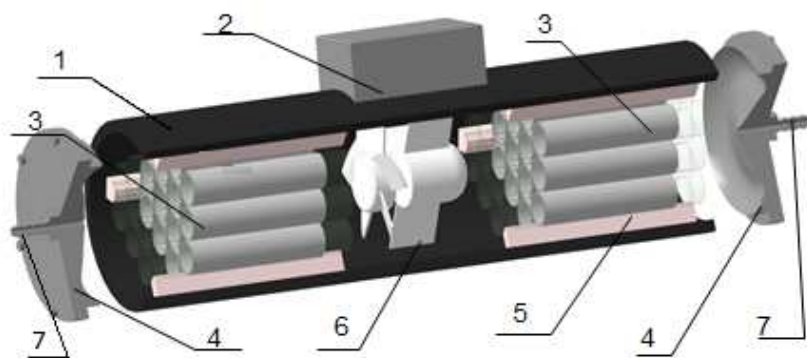


Рисунок 1 – Конструкция компрессорного генератора озона

В полиэтиленовых крышках 4 в центральной части вкручены штуцеры для присоединения шлангов с нагнетаемым от компрессора воздухом и подаваемым в различные системы обеззараживания озоном.

Пориплексовые демпфирующие распорки 5, фиксируют п-сегментные кассетно-трубчатые барьерные генераторы озона 3 в корпусе озонатора, предотвращая их смещение и разрушение из-за ударов и вибраций корпуса.

Высоковольтный блок питания 2 установлен с внешней стороны полиэтиленового корпуса. Он герметичен и защищён от повреждения. Подключение генерирующих кассет к высоковольтному блоку питания осуществляется через высоковольтные бронированные провода.

Работает компрессорный генератор озона следующим образом.

Воздух из компрессора, прошедший осушку в осушителе, подаётся через штуцер внутрь корпуса озонатора, проходит через первую кассету, частично превращаясь в озон, затем разбивается перемешивающим вентилятором и попадает во вторую генерирующую кассету, увеличивая концентрацию озона. Перемешивающий вентилятор принуждает воздух внутри озонатора, многократно пройти через разрядные зоны генерирующих кассет, тем самым значительно повышая концентрацию озono-воздушной смеси. Уже высококонцентрированная смесь выходит через штуцер 7 и подаётся непосредственно в рабочую зону различных устройств, обеззараживая продукцию.

Рассмотрим конструкцию самого главного элемента озонатора - трубчатого генератора озона (трубчатого озонатора), представленного на рисунке 2.

Трубчатый генератор озона содержит: проводящий электрод 1 из тканой проволоочной нержавеющей сетки, размещённый на внешней поверхности диэлектрической трубки 2, проводящий электрод 3 из тканой проволоочной нержавеющей сетки, размещённый на внутренней поверхности диэлектрической трубки 2, неподвижный лопастной завихритель воздушного потока 4, установленный внутри диэлектрической трубки со стороны входа воздушного потока. Проводящие электроды 1 и 3 подключены к высоковольтному источнику переменного тока 5.

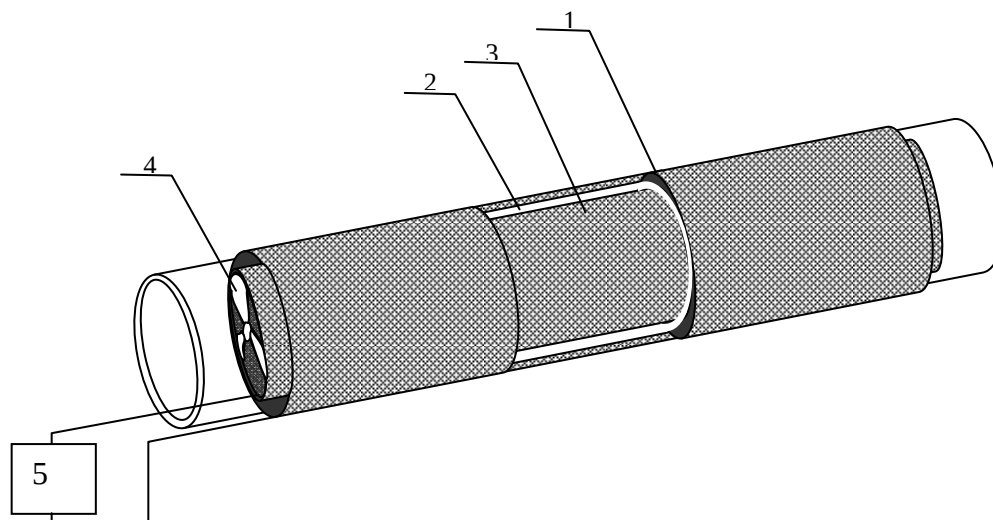


Рисунок 2 – Конструкция трубчатого генератора озона.

Работа трубчатого генератора озона происходит следующим образом: при подаче высоковольтного напряжения от источника переменного тока 5 на проводящие электроды 1 и 3 происходит поляризация стенок диэлектрической трубки 2, в результате чего значительно увеличивается напряжённость электрического поля в узловых точках перекрестия проволоочной сетки электродов 1 и 3, контактирующих с поверхностью диэлектрической трубки 2. Проводящие электроды 1 и 3 обеспечивают беспрепятственный доступ кислорода воздуха к разрядным зонам по всей площади поверхности элек-

тродов. Неподвижный лопастной завихритель воздушного потока 4, установленный внутри диэлектрической трубки со стороны входа воздушного потока, перемешивает воздушный поток, проходящий внутри озонатора, и направляет его к разрядным зонам проводящего электрода 3, благодаря чему также увеличивается производительность озонатора.

Использование электродов именно из проволочной сетки позволяет получить более высокую производительность озонатора, поскольку при генерации озона одинаково работает как наружный, так и внутренний электроды. Мелкоячеистость проволочной сетки проводящих электродов 1 и 3 обеспечивает практически равномерное распределение разрядных зон по всей рабочей поверхности диэлектрической трубки 2, не создавая зон локального перегрева.

Экспериментально определено (рисунок 3) что, если размер ячейки будет больше чем $2,0 \times 2,0$ мм, то снизится количество узловых точек пересечения проволочной сетки на единицу площади поверхности проводящих электродов 1 и 3 и соответственно снизится производительность озонатора.

Если размер ячейки будет менее $1,5 \times 1,5$ мм, то это приведёт к снижению количества кислорода подаваемого в разрядные зоны и как следствие к снижению производительности озонатора, а так же к возникновению локальных перегревов и повреждению диэлектрической трубки 2 и выходу озонатора из строя.

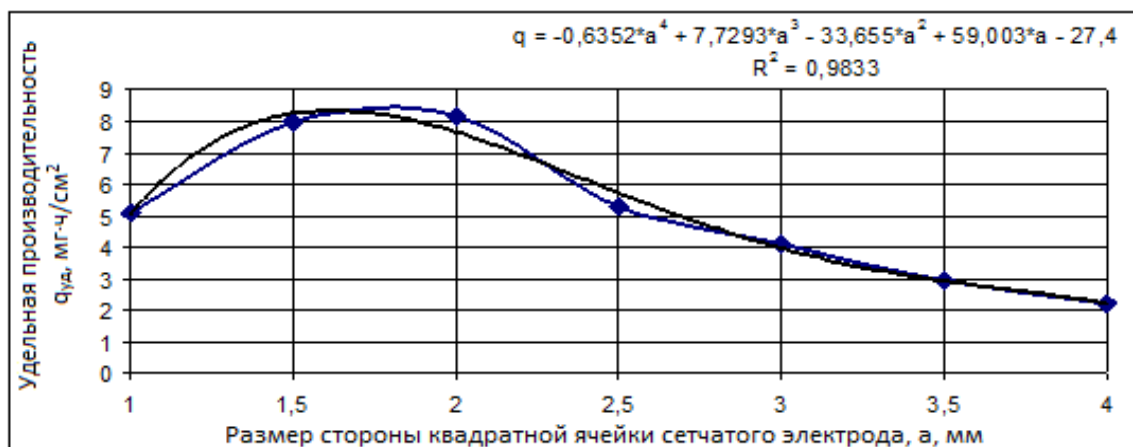


Рисунок 3 - Экспериментальная зависимость удельной производительности озонатора от размера ячейки сетчатого электрода при напряжённости электрического поля $E=8572$ В/мм.

Для снижения энергопотребления озонатора предлагается в качестве диэлектрика барьера использовать плавленный диоксид кремния высокой степени чистоты (не ниже 98%) или высококачественное кварцевое стекло, например марки С-49-5К или С-90-1, используемое в электровакуумных приборах. Это позволит снизить величину токов утечки протекающих сквозь слой диэлектрика, соответственно уменьшить его нагрев, а также снизить потребляемую мощность озонатора и увеличить его КПД.

Если диэлектрическую трубку 2 в трубчатом генераторе озона выполнить толщиной свыше 1 мм, то снизится производительность озонатора, и чтобы её повысить необходимо будет увеличивать величину напряжения подаваемого на проводящие электроды из проволоочной сетки. Это естественно повлияет на электробезопасность конструкции.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод. Для повышения производительности барьерных генераторов озона можно увеличить: напряжённость электростатического поля, площадь поверхности электродов, частоту питающего напряжения, обеспечить приток воздуха к «разрядным зонам». На рисунке 4 представлена классификация основных факторов влияющих на производительность озонатора с коаксиально расположенными сетчатыми электродами.

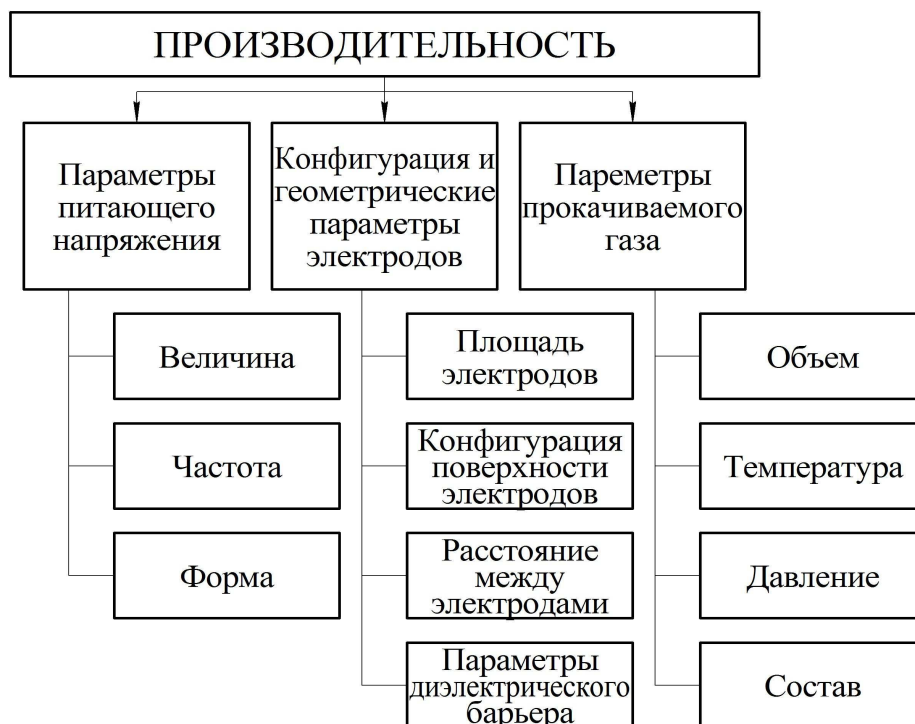


Рисунок 4 – Классификация основных факторов влияющих на производительность компрессорного озонатора.

Теоретически рассчитать производительность озонатора можно, учтя все эти факторы. В выражении (1) представлена разработанная нами теоретическая зависимость, позволяющая рассчитывать производительность, конкретно предлагаемой конструкции озонатора:

$$MQEs_{f_{O_3}} = K_f \cdot S \cdot 0,21 \cdot 0,5 \cdot K_{FV} \cdot \pi \cdot h_c^3 \cdot m_{O_3} \cdot n_i \cdot K_v \cdot \frac{Q}{V_K \cdot \Delta t}, \quad [\text{г/ч}] \quad (1)$$

где K_f - эмпирический коэффициент влияния частоты напряжения подаваемого на электроды генератора озона (коэффициент получен эмпирическим путем авторами статьи);

$$K_f = 13,217 \cdot \ln(f) - 6,9465, \quad \text{при } 0 < f \leq 2000 \text{ Гц}, \quad (2)$$

$$K_f = 9 \cdot 10^{-9} \cdot f^2 - 0,0009 \cdot f + 96,044, \quad \text{при } 2000 < f < 100000 \text{ Гц}. \quad (3)$$

f - частота питающей сети;

S - площадь тканно-сетчатого электрода, см^2 ;

0,21 о.е.=21%– процент содержания кислорода в воздухе, %;

m_{O_3} - масса атомарного кислорода в воздухе, г;

n_i – количество точек перевития (точек разряда), шт;

Q – подача воздуха в озонатор, м³/ч;

V_K – объём воздуха внутри корпуса озонатора по длине генерирующего сегмента, м³;

K_v – эмпирический коэффициент аэродинамического сопротивления озонатора.

$$K_v = 3,6 \cdot Q^{-0,5308} \quad (4)$$

Δt – интервал времени нагнетания воздуха подачей Q ($\Delta t = 1$ час);

K_{FV} – коэффициент приведения объёма к сфере с радиусом $R \approx h_c$.

Коэффициент приведения объёма к сфере с радиусом $R \approx h_c + h_\delta$, можно определить на основании эмпирической зависимости:

$$K_{FV} = 1 \cdot 10^{-6} \cdot (0,042 \cdot E - 54,46) \quad (5)$$

где $E = U / (h_c + h_\delta)$ – напряжённость приложенного эл. поля, В/м;

h_c – толщина диэлектрика, м

h_δ – толщина воздушного зазора (в расчете $h_\delta = 0$), м.

По выражению (1) было проведено математическое моделирование производительности барьерного генератора озона компрессорного типа. Результаты моделирования представлены в таблицах 1...4.

Таблица 1 – Результаты математического моделирования производительности озонатора при изменении частоты питающего напряжения.

f, Гц	S, см ²	ni, шт	hc, м	U, В	E, В/м	Kv	Kfv	Kf	m 03, г	Q _B , м ³ /ч	t, ч	V _k , м ³	L _k , м	V, м/с	M=Q O ₃ , г/ч
1	137,2	51	0,0007	7500	10714286	0,1	8,3·10 ⁻²	-6,9465	271,5	800	1	0,002311	0,115	11,058	0
25								35,5974							43,94
50								44,7587							55,25
100								53,92003							66,55
200								63,0814							77,86
400								72,2427							89,17
1000								84,3533							104,12
2000								93,5146							115,43
4000								92,588							114,28
8000								89,42							110,37
15000								84,569							104,38
30000								77,144							95,22
60000								74,444							91,89

Таблица 2 – Результаты математического моделирования производительности озонатора при изменении площади электродов.

f, Гц	S, см ²	ni, шт	hc, м	U, В	E, В/м	K ₀	K _{fv}	K _f	m O ₃ , г	Q _B , м ³ /ч	t, ч	V _k , м ³	L _k , м	V, м/с	QO ₃ , г/ч
50	10,6	51	0,0007	7500	10714286	0,1	8,3·10 ⁻²	44,758	271,5	800	1	0,002311	0,115	11,058	4,27
	21,2														8,54
	31,8														12,80
	42,4														17,07
	53														21,34
	63,6														25,61
	74,2														29,88
	84,8														34,15
	95,4														38,41
	106														42,68
	116,6														46,95
	127,2														51,22
	137,8														55,49

Таблица 3 – Результаты математического моделирования производительности озонатора при изменении подачи воздуха

f, Гц	S, см ²	ni, шт	hc, м	U, В	E, В/м	K _{fv}	K _f	K ₀	m O ₃ , г	Q _B , м ³ /ч	t, ч	V _k , м ³	L _k , м	V, м/с	QO ₃ , г/ч
50	137,8	51	0,0007	7500	10714286	8,3·10 ⁻²	44,758	2,491815	271,5	2	1	0,002311	0,115	0,02765	3,46
								1,532107		5				0,06911	5,31
								1,06048		10				0,13823	7,36
								0,451325		50				0,69113	15,65
								0,312394		100				1,38225	21,67
								0,21623		200				2,76451	29,99
								0,17436		300				4,14676	36,28
								0,149668		400				5,52902	41,52
								0,13295		500				6,91127	46,11
								0,120687		600				8,29352	50,22
								0,111205		700				9,67578	53,99
								0,103596		800				11,05803	57,48
								0,097317		900				12,44029	60,75

Таблица 4 – Результаты математического моделирования производительности озонатора при изменении питающего напряжения.

f, Гц	S, см ²	ni, шт	hc, м	U, В	E, В/м	K ₀	K _{fv}	K _f	m O ₃ , г	Q _B , м ³ /ч	t, ч	V _k , м ³	L _k , м	V, м/с	QO ₃ , г/ч
50	137,2	51	0,0007	1000	1428571	0,1	0,00777	44,758	271,5	800	1	0,002311	0,115	11,058	5,17
				2000	2857143		0,0193								12,88
				3000	4285714		0,0309								20,58
				4000	5714286		0,0425								28,28
				5000	7142857		0,0541								35,99
				6000	8571429		0,0656								43,69
				7000	10000000		0,0772								51,39
				8000	11428571		0,0888								59,10
				9000	12857143		0,1								66,80
				10000	14285714		0,112								74,50
				11000	15714286		0,123								82,21
				12000	17142857		0,135								89,91
				13000	18571429		0,147								97,61

Как видно из результатов, представленных в таблице 2 увеличение площади поверхности электродов, влияющих на количество «точек разряда» в которых генерируется озон, также приводит к линейному увеличению производительности озонатора.

Как видно из результатов, представленных в таблице 3 увеличение подачи воздуха в озонатор, влияющее на кратность воздухообмена в «точках разряда», также приводит к увеличению производительности озонатора. Однако на производительность оказывает значительное влияние внутреннее аэродинамическое сопротивление конструкции, учитываемое в коэффициенте K_v .

Как видно из результатов, представленных в таблице 4 увеличение питающего напряжения, влияющее на напряженность электрического поля в «точках разряда», также приводит к практически линейному увеличению производительности озонатора. Однако следует отметить, что при напряженности свыше 44000 В/мм происходит электрический пробой даже высококачественного кварцевого стекла. И это служит ограничением в таком способе регулировки.

Предложенная модель озонатора компрессорного типа, описываемая теоретическими зависимостями, представленными выше, позволяет при проектировании генератора озона с заданной производительностью, учесть практически все конструктивные параметры, параметры питающей сети и параметры нагнетающего компрессора.

При разработке конструкции озонатора определено что, использование внутри корпуса перемешивающего вентилятора с производительностью всего $10 \text{ м}^3 \cdot \text{ч}$, позволит увеличить производительность озонатора более чем в 3,5 раза (с 65 до 250 г/ч) при увеличении энергопотребления всего на 2%.

Подтверждена адекватность теоретической модели экспериментальным данным: где влияние напряжения питающей сети адекватно на 99,8%,

влияние площади поверхности электродов на 86,2%, а влияние частоты питающего напряжения на 94,7%.

Библиографический список

1. Озеров И.Н. Технология обработки комбинированного корма озono-газовой смесью. /Озеров И.Н, Гуляев П.В., Таранов М.М., Гуляева Т.В./ Международный сборник научных трудов // Высокоэффективные технологии и технические средства в сельском хозяйстве. – ФГБОУ ВПО АЧГАА. – Зерноград, 2012. – С. 182-185.
2. Пат. RU 125404 “Устройство защиты озонатора от аварийных режимов” Таранов М.М.; Головинов В.В.; Гуляев П.В.; Максаев И.Н.; Озеров И.Н.; Спирин Р.А.; Добровольская О.С. (ФГБОУ ВПО АЧГАА) 201216913/07 заявл. 27.06.20012 опубл. 27.06.2012.
3. Овсянников Д.А. Влияние температуры диэлектрических барьеров на производительность электроозонатора / Д.А. Овсянников, С.А. Николаенко /Материалы международной научно-практической конференции «Новые технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности с использованием электрофизических факторов и озона». – Ставрополь, 2006.
4. Овсянников Д.А. Математическая модель нагрева разрядного устройства электроозонатора / Д.А. Овсянников, С.А. Николаенко / Материалы пятой Всероссийской конференции «Энерго- и ресурсосберегающие технологии и установки». – Краснодар, 2007. - С. 111–115.
5. Овсянников Д.А. Энергетические процессы в системах электроозонирования пчелиных семей / Д.А. Овсянников, С.А. Николаенко // Материалы пятой Всероссийской конференции «Энерго- и ресурсосберегающие технологии и установки». – Краснодар, 2007. – С. 36–40
6. Першин А.Ф. Перспективы применения озонаторов коронного разряда в рыбноводстве. /Першин А.Ф./ Рыбоводство и рыбное хозяйство/. 2013, № 4 с.56-62.
7. Пат. №2394756 РФ, МПК C01 B13/11. Озонатор/В.И. Пахомов, В.А. Максименко, А.И. Пахомов, К.Н. Буханцов. -№2008149662/15, заявл.:16.12.2008., опубл.:20.07.2010.
8. Пат. №2337276 РФ, F24F3/16. Электротеплоутилизатор с озонированием и рециркуляцией воздуха/ В.Н. Расстригин , Д.А. Тихомиров, А.Ф. Першин , А.В. Тихомиров (ГНУ ВИЭСХ), заявл.: 2007-05-15., опубл.: 27.10.2008.
9. Смирнов А.А. Экспериментальные исследования по обеззараживанию комбикорма озонозоонозными смесями / Смирнов А.А. Першин А.Ф. // Инновации в сельском хозяйстве: Электронный журнал ГНУ ВИЭСХ. 2013. №3. – С. 47-51.
10. Смирнов А.А. Обработка зерновых материалов озонем в стационарном слое / Смирнов А.А., Першин А.Ф., Богданов К.В. // Материалы 32 Всероссийского семинара «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии». М.: Химфак МГУ, 2012.

References

1. Ozerov I.N. Tehnologija obrabotki kombinirovannogo korma ozono-gazovoj smes'ju. /Ozerov I.N, Guljaev P.V., Taranov M.M., Guljaeva T.V./ Mezhdunarodnyj sbornik nauchnyh trudov // Vysokoeffektivnye tehnologii i tehicheskie sredstva v sel'skom hozjajstve. – FGBOU VPO AChGAA. – Zernograd, 2012. – S. 182-185.

2. Pat. RU 125404 “Ustrojstvo zashhity ozonatora ot avarijnyh rezhimov” Taranov M.M.; Golovinov V.V.; Guljaev P.V.; Maksaev I.N.; Ozerov I.N.; Spirin R.A.; Dobrovol'kaja O.S. (FGBOU VPO AChGAA) 201216913/07 zajavl. 27.06.20012 opubl. 27.06.2012.
3. Ovsjannikov D.A. Vlijanie temperatury dijelektricheskikh bar'eroev na proizvoditel'nost' jelektroozonatora / D.A. Ovsjannikov, S.A. Nikolaenko /Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Novye tehnologii v sel'skom hozjajstve i pishhevoj promyshlennosti s ispol'zovaniem jelektrofizicheskikh faktorov i ozona». – Stavropol', 2006.
4. Ovsjannikov D.A. Matematicheskaja model' nagreva razrjadnogo ustrojstva jelektroozonatora / D.A. Ovsjannikov, S.A. Nikolaenko / Materialy pjatoj Vserossijskoj konferencii «Jenergo- i resursosberegajushhie tehnologii i ustanovki». – Krasnodar, 2007. - S. 111–115.
5. Ovsjannikov D.A. Jenergeticheskie processy v sistemah jelektroozonirovanija pchelinyh semej / D.A. Ovsjannikov, S.A. Nikolaenko // Materialy pjatoj Vserossijskoj konferencii «Jenergo- i resursosberegajushhie tehnologii i ustanovki». – Krasnodar, 2007. – S. 36–40
6. Pershin A.F. Perspektivy primenenija ozonatorov koronnogo razrjada v rybovodstve. /Pershin A.F./ Rybovodstvo i rybnoe hozjajstvo/. 2013, № 4 s.56-62.
7. Pat. №2394756 RF, MPK S01 V13/11. Ozonator/V.I. Pahomov, V.A. Maksimenko, A.I. Pahomov, K.N. Buhancov. -№2008149662/15, zajavl.:16.12.2008., opubl.:20.07.2010.
8. Pat. №2337276 RF, F24F3/16. Jelektroteploutilizator s ozonirovaniem i recirkuljaciej vozduha/ V.N. Rasstrigin , D.A. Tihomirov, A.F. Pershin , A.V. Tihomirov (GNU VIJeSH), zajavl.: 2007-05-15., opubl.: 27.10.2008.
9. Smirnov A.A. Jeksperimental'nye issledovanija po obezzarazhivaniju kombikorma ozonovozdushnymi smesjami / Smirnov A.A. Pershin A.F. // Innovacii v sel'skom hozjajstve: Jelektronnyj zhurnal GNU VIJeSH. 2013. №3. – S. 47-51.
10. Smirnov A.A. Obrabotka zernovyh materialov ozonom v stacionarnom sloe / Smirnov A.A., Pershin A.F., Bogdanov K.V. // Materialy 32 Vserossijskogo seminaru «Ozon i drugie jekologicheski chistye okisliteli. Nauka i tehnologii». M.: Himfak MGU, 2012.