Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Мазина Наталья Викторовна
Должность: Проректор по учебной и воспитательной работе, молодежной политике ФГБОУ ВО "Ярославский ГАУ"
Дата подписания: 02.02.2024 11:01:58
Уникальный программный ключ:
fa349ae32a4e4e3b9f1b37187284e10f48e8

DOI: 10.34286/1995-4646-2019-69-6
УДК 621.384.52:001.5
Материал поступил в редакцию 01.11.19.

В. В. ШМИГЕЛЬ, *доктор техн. н ук, профессор*
А. С. УГЛОВСКИЙ, *к нд. техн. н ук, ст рший препод в тель*
В. В. ЕГОРЫЧЕВ, *студент*
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославская государственная сельскохозяйственная академия», Российская Федерация, г. Ярославль

VLADIMIR V. SHMIGEL, *Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor*
ARTEM S. UGLOVSKY, *Ph. D., Engineering Sciences*
VALERIY V. EGORYCHEV, *graduate-student*
Yaroslavl State Agricultural Academy, Russian Federation, Yaroslavl

ПРОВЕДЕНИЕ И ПЛАНИРОВАНИЕ МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ОЗОНАТОРНОЙ УСТАНОВКИ В ПРОГРАММЕ STATGRAPHICS

CARRYING OUT AND PLANNING OF A MULTIFACTOR EXPERIMENT FOR OZONATOR INSTALLATION IN THE STATGRAPHICS PROGRAM

Аннотация. *Применение пл ниров ния многоф кторного эксперимент с использов нием озон торной уст новки с диэлектрическим б рьерным р зрядом является эффективным методом исследов ния концентр ции озон в з висимости от п р метров электродной системы. Многоф кторный эксперимент может эффективно прогнозиров ть и оптимизиров ть п р метры электродной системы. Результ ты пок з ли высокие зн чения коэффициент детермин ции (R^2 > 0,969) для четырех поверхностей отклик , обеспечив ющего удовлетворительное согл сов ние полиномиальной модели второго порядк с эксперимент льными д нными. П р метры р сстояния между электрод ми, ширин диэлектрик и н пряжение были призн ны н иболее зн чимыми ф ктор ми. Результ ты демонстрируют потенци льное влияние использов ния высоких н пряжений (> 10 кВ) н эффективность производств озон . Метод диэлектрического б рьерного р зряд ок з лся лучшим методом для получения озон . Исследов ния, проводимые по озон торной уст новке пок зыв ют, что систем дезинфекции с использов нием озон , генерируемого диэлектрическим б рьерным р зрядом, является эффективной сост вляющей в повышении выводимости перепелиных яиц н 3…4 %. Генер ция озон диэлектрическим б рьерным р зрядом, в первую очередь з висит от приложенного высокого н пряжения и продолжительности этого р зряд . Эти дв п р метр пропорцион льны выр ботке озон . Эксперимент льные результ ты пок зыв ют, используемый генер тор озон , эффективен для обезз р жив ния воздух , уд ляя вирусы, б ктерии и п тогенные микроорг низмы.*

Ключевые слов : электрическое поле, озон торн я уст новк , генер ция озон , р зрядный промежуток, поверхность отклик , удельн я мощность.

Abstract. *The application of the planning of a multifactor experiment using an ozonizer with a dielectric barrier discharge is an effective method for studying the concentration of ozone depending on the parameters of the electrode system. A multivariate experiment can effectively predict and optimize the parameters of the electrode system. The results showed high values of the coefficient of determination for four response surfaces, ensuring satisfactory agreement of the second-order polynomial model with experimental data. The parameters of the distance between the electrodes, the dielectric width, and voltage were recognized as the most significant factors. The results demonstrate the potential impact*

of using high voltages (> 10 kV) on ozone production efficiency. The dielectric barrier discharge method has proven to be the best method for producing ozone. Studies conducted on the ozonation installation show that the disinfection system using ozone generated by a dielectric barrier discharge is an effective component in increasing the output of quail eggs by 3 ... 4%. Ozone generation by a dielectric barrier discharge primarily depends on the applied high voltage and the duration of this discharge. These two parameters are proportional to ozone production. Experimental results show that the ozone generator used is effective in disinfecting air by removing viruses, bacteria, and pathogens.
***Keywords**: electric field, ozonation installation, ozone generation, discharge gap, response surface, specific power.*

Введение

Озон (O_3) является нестабильным бесцветным газом, мощным окислителем и сильнодействующим бактерицидом. Он обладает гораздо более высоким дезинфицирующим потенциалом, чем хлор и другие дезинфицирующие средства [1]. В настоящее время использование озона в качестве дезинфицирующего и окисляющего агента широко распространилось при замене хлора из-за проблем последнего, связанных с запахом, неприятным вкусом и канцерогенными агентами, возникающими в результате его использования [2].

Озон находит свое применение в основном для дезинфекции, отбеливания, очистки воды и воздуха, химии и некоторых фармацевтических применений [3].

Кроме того, при определении потребностей в энергии для генерации озона необходимо учитывать энергию для производства исходного газа (кислорода или сжатого воздуха) и подготовки, а также энергию для генератора озона [2].

Озонаторные установки с диэлектрическим барьерным разрядом широко изучались для оптимизации скорости генерации озона в соответствии с несколькими параметрами, такими как уровень высокого напряжения, уровень кислорода, частота напряжения и другие факторы [4]. Однако экспериментальное исследование не проводилось для определения оптимальных геометрических размеров генератора озона, т. е. размеров межэлектродного промежутка и эффективной длины генератора, что дает самый высокий уровень концентрации озона при наименьшем энергопотреблении. Хорошо известно, что более высокая скорость озона достигается, когда разрядный промежуток меньше, а ширина диэлектрика больше, однако эффективный генератор озона должен потреблять как можно меньше энергии и при указанных выше факторах.

Целью настоящей работы является предложение экспериментальной процедуры, основанной на моделировании поверхности отклика, для идентификации оптимальной геометрической концепции генератора озона, основанной на выработке озона и потреблении энергии.

Методика экспериментальных исследований

Методология экспериментальных планов позволяет определить количество экспериментов, которые должны быть выполнены в соответствии с четко определенной целью, изучить несколько факторов одновременно, уменьшить дисперсию, связанную с измерениями, оценить эффекты связи между факторами и, наконец, оценить соответствующее влияние факторов и их взаимодействия [5].

Перед началом эксперимента необходимо установить наилучшую и подходящую конструкцию, которая может моделировать процесс с максимально возможной точностью. В этой статье был принят многофакторный эксперимент [5], который дает квадратичные модели. Можно определить квадратичную зависимость между выходной функцией для оптимизации (отклик) и входной переменной u_i (i = 1, ..., k) (факторы)

$$y = f(u_i)c_0 + \sum c_i u_i + \sum c_{ij} u_i u_j + \sum c_{ii} u_i^2. \quad (1)$$

Зная, что Δu_i и u_{i0}, соответственно, шаг вариации и центральное значение фактора i, приведенные центрированные значения входных факторов, могут быть определены следующим соотношением:

$$x_i = \frac{u_i - u_{i0}}{\Delta u_i}. \quad (2)$$

С новыми переменными функция становится:

$$y = f\left(x_i\right) = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ii} x_i^2. \quad (3)$$

Коэффициенты могут быть рассчитаны или оценены программой обработки данных таким образом, чтобы иметь минимальное отклонение между прогнозирующей математической моделью и экспериментальными результатами.

Использовалось программное обеспечение STATGRAPHICS, которое представляет собой программу Windows для создания и оценки экспериментальных проектов. Программа помогает пользователю для интерпретации результатов и прогнозирования откликов. Она рассчитывает коэффициенты математической модели и определяет лучшие корректировки факторов для оптимизации процесса. Кроме того, программа вычисляет два значимых статистических критерия, которые позволяют проверить (или нет) математическую модель, обозначенную символами R^2 и Q^2. Первый называется хорошим соответствием и является мерой того, насколько хорошо можно построить модель для соответствия необработанным данным; она колеблется от 0 до 1, где 1 указывает на идеальную модель, а 0 – на модель вообще. Последнее называется добротой предсказания и оценивает предсказательную силу модели. Как и R^2, Q^2 имеет верхнюю границу 1, но его нижний предел равен – ∞. Для того чтобы модель прошла диагностический тест, оба параметра должны быть высокими и предпочтительно не разделяться более чем на 0,2…0,3 [6].

Результаты эксперимента

Методология разработки экспериментов полезна для скрининга, оптимизации и тестирования надежности. Планирование эксперимента предназначено для выявления области вариации трех факторов, классических экспериментов «математическое планирование однофакторного эксперимента».

Этап оптимизации экспериментальной процедуры должен позволять определять значения факторов, для которых концентрация озона максимальна, а потребляемая мощность минимальна. В этой статье эксперименты проводились с учетом двух наиболее важных размеров генератора озона, которые представляют собой разрядный промежуток и ширины диэлектрика W (в мм). Поскольку приложенное высокое напряжение V (в кВ) напрямую зависит от разрядного промежутка, это также учитывалось в данном исследовании.

Пределы изменения ширины диэлектрика W и напряжения V определяются путем проведения экспериментов «математическое планирование однофакторного эксперимента». Поскольку разрядный промежуток d мог принимать только три различных значения, соответствующие эксперименты «математическое планирование однофакторного эксперимента» не проводились.

Эксперимент 1. Переменная ширина диэлектрика W (13…17 мм) при постоянных значениях разрядного зазора d = 4 см и напряжении V = 8 кВ.

Эксперимент 2. Импульсное постоянное напряжение V (4…12 кВ) при постоянных значениях разрядного зазора d = 4 см и ширине диэлектрика W = 17 мм.

Результаты, полученные в предыдущих экспериментах, показаны на рисунках 1 и 2. Концентрация озона (мг/л) считалась значимой для оценки процесса и представлена как функция от двух контрольных факторов.

Область изменения W и V была затем определена на основе результатов, полученных в этом разделе. Таким образом, результаты эксперимента 1 (рисунок 1), полученные в соответствии с шириной диэлектрика W, показывают, что концентрация озона является квазилинейной в соответствии с W с почти одинаковым наклоном изменения, независимо от разрядного промежутка d. Кроме того, скорость концентрации озона для малых значений d была явно выше из-за высокого процента концентрации озона для самого низкого объема разряда. Действительно, более значительное количество проходов кислорода выбрасывает генератор озона, не превращаясь в озон для большого объема разряда.

График на рисунке 2 показывает, что в условиях эксперимента 2, как и ожидалось, концентрация растворенного озона постоянно увеличивалась в соответствии с приложенным напряжением.

Поскольку концентрация была почти незначительной для V = 4 кВ, следовательно, область изменения этого фактора была определена как V_{min} = 8 кВ и V_{max} = 12 кВ.

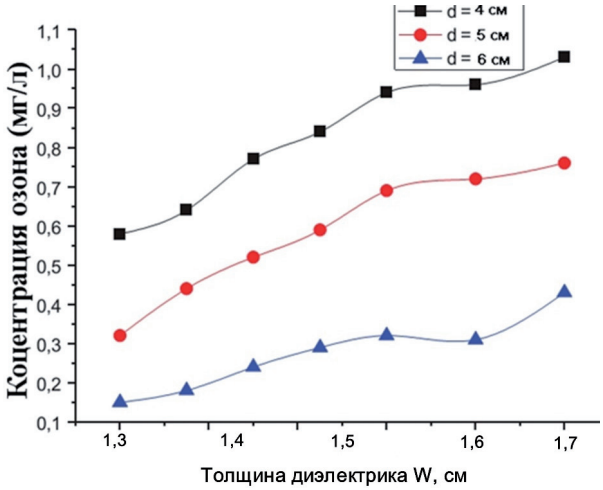


Рисунок 1 – Изменение концентрации озона как функции ширины диэлектрика для различных значений разрядного промежутка:
– d = 4 см; – d = 5 см; – d = 6 см
Figure 1 – Change in ozone concentration as a function of dielectric width for various values of the discharge gap:
– d = 4 cm; – d = 5 cm; – d = 6 cm

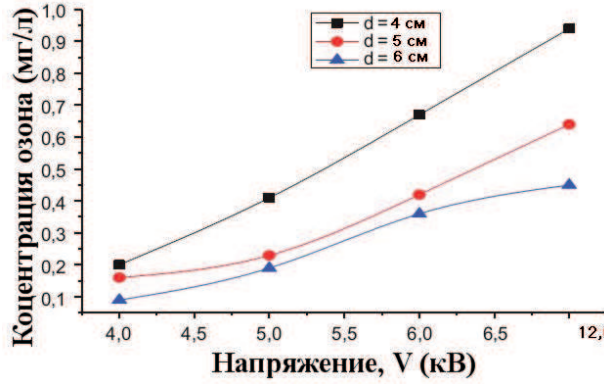


Рисунок 2 – Изменение концентрации озона в зависимости от приложенного напряжения V, для разных значений разрядного промежутка:
– d = 4 см; – d = 5 см; – d = 6 см
Figure 2 – Change in ozone concentration depending on the applied voltage V, for different values of the discharge gap:
– d = 4 cm; – d = 5 cm; – d = 6 cm

Определение оптимальных значений размеров было определено с использованием многофакторного эксперимента; два уровня «max» и «min» являются пределами, установленными в предыдущем разделе для каждой из двух переменных (W_{min}, W_{max}) и (V_{min}, V_{max}).

Центральная точка (W_c, V_c и d_c) была рассчитана следующим образом:

$$W_c = \frac{W_{min} + W_{max}}{2} = \frac{(1,3+1,7)}{2} = 1,5 \text{ см};$$

$$V_c = \frac{V_{min} + V_{max}}{2} = \frac{(9+12)}{2} = 10 \text{ кВ};$$

$$d_c = \frac{d_{min} + d_{max}}{2} = \frac{(4+6)}{2} = 5 \text{ мм}.$$

Таблица 1 – Результаты эксперимента

№ опыта	Напряжение, кВ	Толщина диэлектрика *L*, см	Промежуток разряда *d*, см	Концентрация озона КО, мг/л	Удельная мощность *P*, Вт/(мг/л)
1	8	1,3	4	0,29	1,09
2	12	1,3	4	0,58	0,28
3	8	1,7	4	0,8	0,18
4	12	1,7	4	0,93	0,11
5	8	1,3	6	0,11	10,37
6	12	1,3	6	0,15	6,22
7	8	1,7	6	0,24	2,58
8	12	1,7	6	0,44	0,82
9	8	1,5	5	0,46	0,71
10	12	1,5	5	0,59	0,55
11	10	1,3	5	0,26	1,95
12	10	1,7	5	0,69	0,27
13	10	1,5	4	0,77	0,21
14	10	1,5	6	0,29	1,96
15	10	1,5	5	0,52	0,55
16	10	1,5	5	0,5	0,60

Таблица 2 – Матрица экспериментов

Напряжение, кВ	Толщина диэлектрика L, см	Промежуток разряда d, см	Концентрация озона КО, мг/л	Концентрация озона КО, мг/л	Удельная мощность *P*, Вт/(мг/л)
–1	–1	–1	0,29	0,29	1,09
1	–1	–1	0,58	0,58	0,28
–1	1	–1	0,8	0,8	0,18
1	1	–1	0,93	0,93	0,11
–1	–1	1	0,11	0,11	10,37
1	–1	1	0,15	0,15	6,22
–1	1	1	0,24	0,24	2,58
1	1	1	0,44	0,44	0,82
–1	0	0	0,46	0,46	0,71
1	0	0	0,59	0,59	0,55
0	–1	0	0,26	0,26	1,95
0	1	0	0,69	0,69	0,27
0	0	–1	0,77	0,77	0,21
0	0	1	0,29	0,29	1,96
0	0	0	0,52	0,52	0,55
0	0	0	0,5	0,5	0,60

Таблица 3 – Таблица многофакторного эксперимента, полученная в STATGRAPHICS

Удельная мощность	*DF*	*SS*	*MS* (variance)	*F*	*p*	*SD*
Total	16	33,8553	2,11596			
Constant	1	19,0314	19,0314			
Total corrected	15	14,8239	0,98826			0,994112
Regression	10	14,3707	1,43707	15,8561	**0,004**	1,19878
Residual	5	0,45316	0,090632			0,301051
Lack of Fit	4	0,45051	0,112627	42,4983	**0,114**	0,3356
(Model error)						
Pure error	1	0,00265016	0,00265016			0,0514797
(Replicate error)						
	N = 16	Q^2 =	0,068	Cond. no. =	29,94	
	DF = 5	R^2 =	0,969	*RSD* =	0,3011	
		R^2 adj. =	0,908			
0	0	0	0,5	0,5	0,60	

Регрессионная модель многофакторного эксперимента имеет уравнение

$$y = x - 1,244 \times 10^{-8} R^2 = 0,9694.$$

Результаты экспериментов приведены в таблице 1 (позже будет представлена). Помимо концентрации озона КО (мг/л), удельная мощность *P* (Вт/(мг/л)) также рассматривалась как значительный отклик и сообщалась в таблице.

Математическая модель концентрации озона (мг/л) и *P* (Вт/мг/л) была получена в программе STATGRAPHICS и нанесена на график, как показано на рисунке 4, где незначительные эффекты были удалены. Поскольку статистические критерии R^2 и Q2 были близки к единице, R^2 = 0,952 и Q^2 = 0,588 для отклика концентрации озона (КО) и R2 = 0,969 и Q^2 = 0,068 для удельной мощности, две модели были проверены и использовались для анализа прогнозирования и оптимизации.

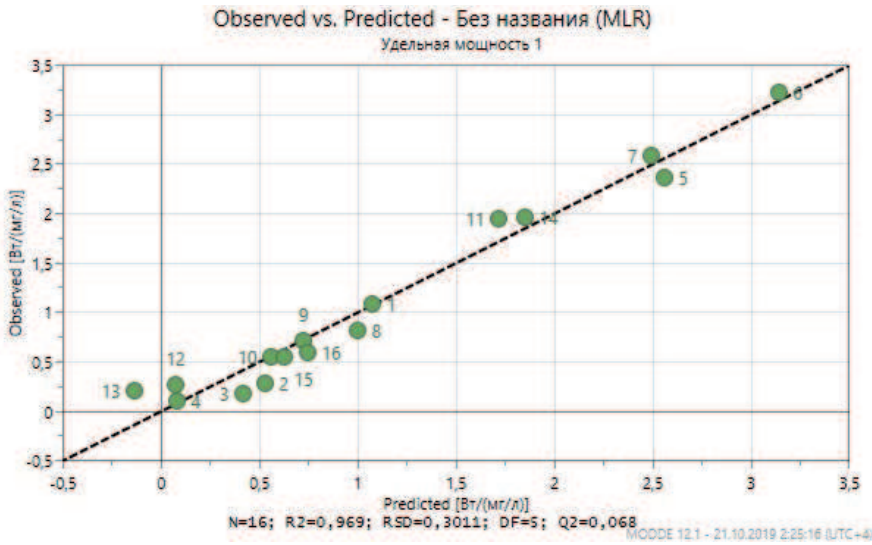
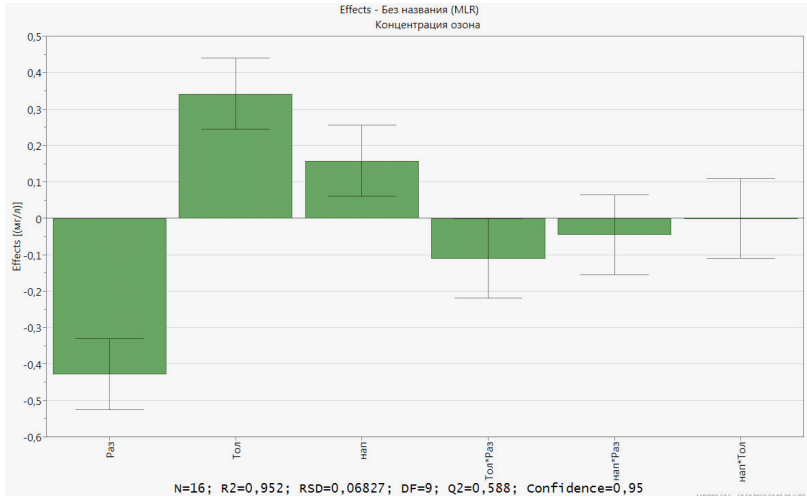
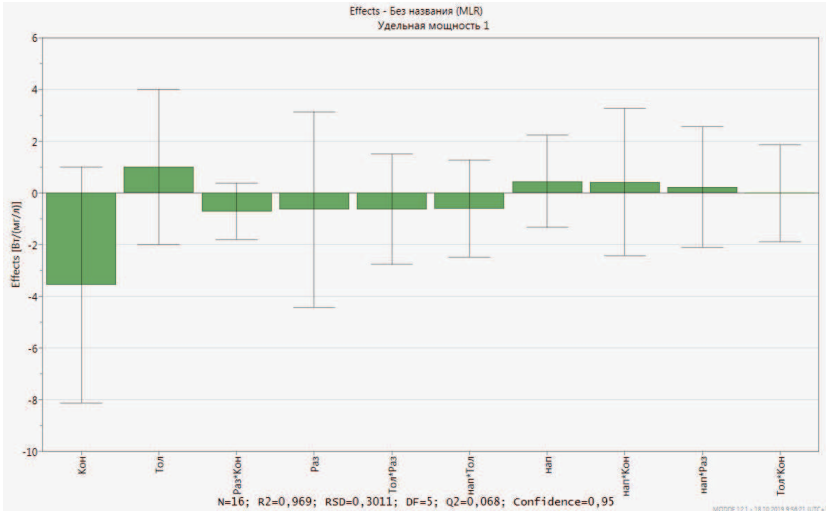


Рисунок 3 – Регрессионная модель прогнозируемых (Predicted) и наблюдаемых данных (Observed)

Figure 3 – Regression model of predicted (Predicted) and observed data (Observed)

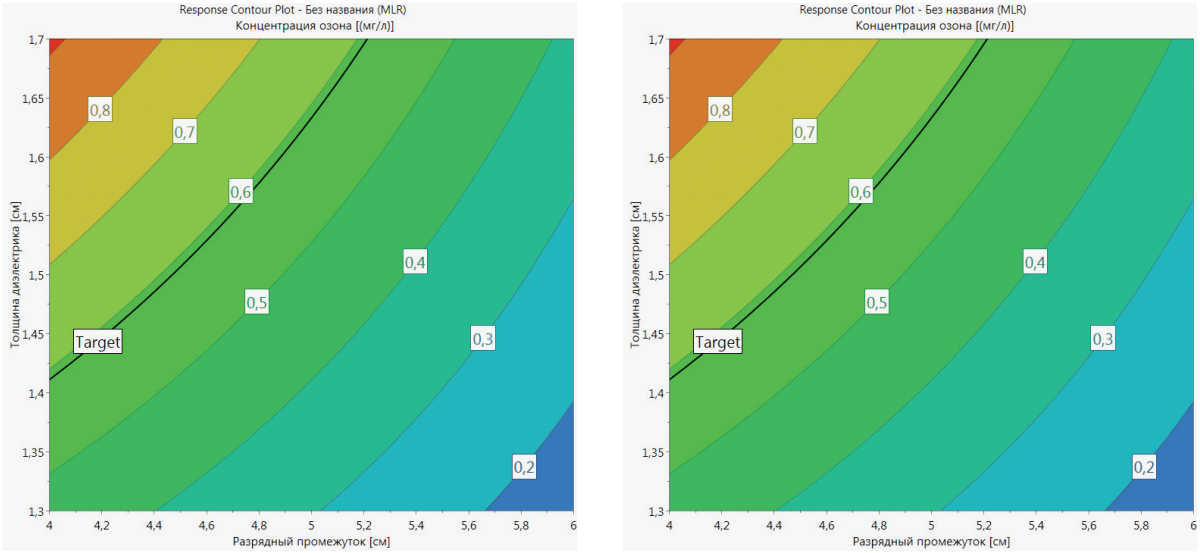




б

Рисунок 4 – Графики полученных коэффициентов для концентрации озона: а – КО (мг/л); б – удельной мощности Р (Вт/мг/л): *N* = 16; R_2 = 0,969; *RSD* = 0; *DF* = 4; Q_2 = 0,068; Confidence = 0,95

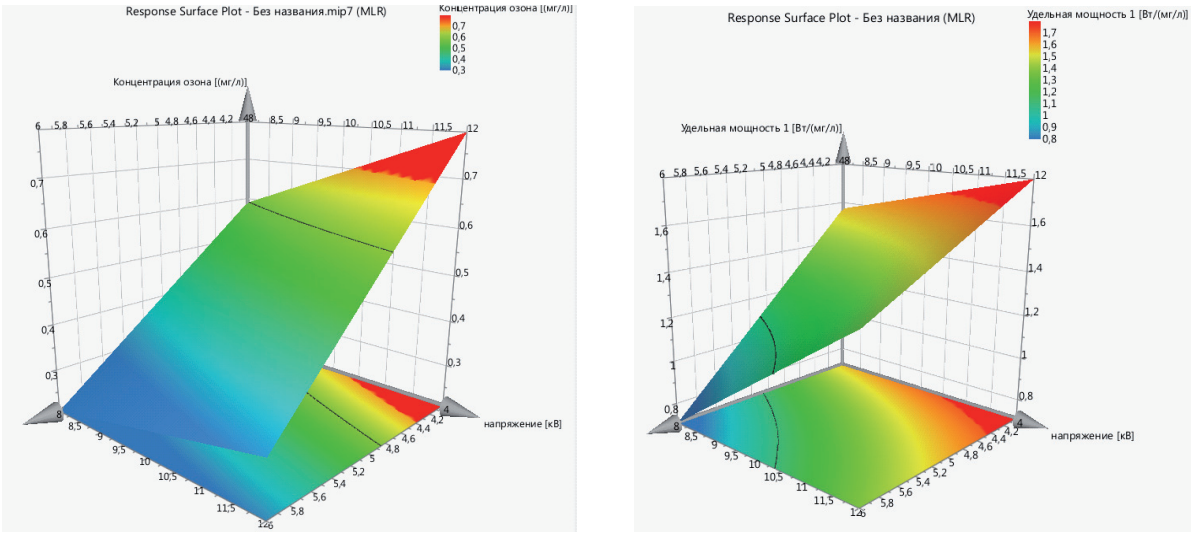
Figure 4 – Graphs of the obtained coefficients for ozone concentration: a – KO (mg / l); b – specific power P (W / mg / l): N = 16; R_2 = 0.969; RSD = 0; DF = 4; Q_2 = 0.068; Confidence = 0.95



б

Рисунок 5 – Графики контура отклика STATGRAPHICS: а – для концентрации озона; б – для мощности

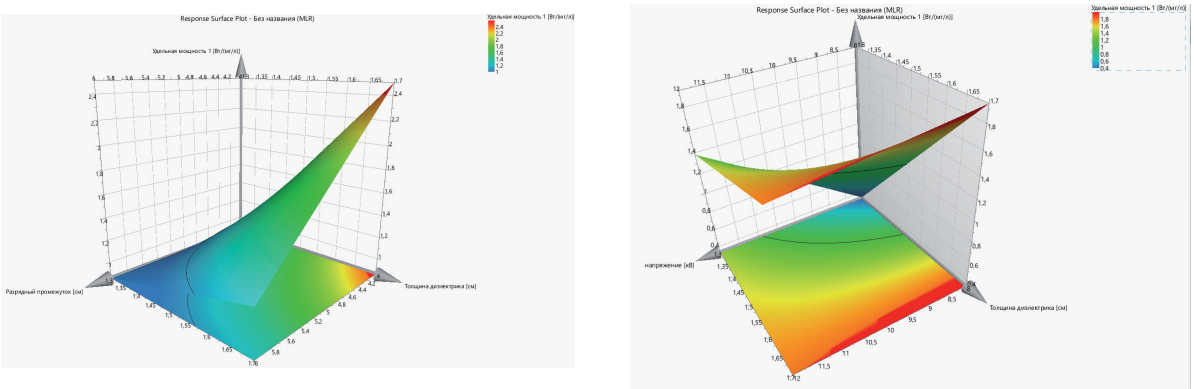
Figure 5 – STATGRAPHICS response loop graphs: – for ozone concentration; b – for power



б

Рисунок 6 – Поверхности отклика STATGRAPHICS: а – для концентрации озона; б – для мощности

Figure 6 – STATGRAPHICS response surfaces: – for ozone concentration; b – for power



б

Рисунок 7 – оверхности отклика STATGRAPHICS для удельной мощности в зависимости от напряжения, толщины диэлектрика и разрядного промежутка

Figure 7 – STATGRAPHICS response surfaces for specific power depending on voltage, dielectric thickness and discharge gap

Согласно полученным результатам, мы заметили, что влияние всех трех факторов является значительным как для концентрации озона, так и для удельной мощности *P*. Как и ожидалось, поскольку концентрации озона увеличивается в зависимости от напряжения *V* и ширины диэлектрика *W*, *P* уменьшается в зависимости от этих двух факторов. Кроме того, влияние разрядного промежутка отрицательно, а влияние ширины *W* положительно для скорости образования озона, что подтверждает, возможность использования наименьших значений разрядного промежутка генераторов озона.

Более того, полученные результаты математических моделей не указывали на важное взаимодействие между напряжением и кем–либо из геометрических факторов *W* или d, поскольку их влияние не является значительным в рамках исследования. Тем не менее, взаимодействие между шириной *W* и промежутком *d* является значимым для двух откликов, что подтверждает необходимость оптимизации геометрических размеров генератора.

На рисунке 5 показаны контуры отклика, полученные с помощью настоящей модели. Отклик может быть представлен графически в виде контурных графиков, которые помогают визуализировать форму поверхности отклика. Контуры – это кривые постоянного отклика, нарисованные в соответствии с изменением двух факторов при сохранении другой переменной фиксированной. Каждый контур соответствует определенной высоте поверхности отклика, как показано на рисунке 5.

Согласно этой модели, оптимум процесса (т. е. максимизация концентрации озона и минимизация мощности) должен быть получен для *V* = 12 кВ, *W* = 1,7 см и *d* = 4 мм, что соответствует КО = 0,8 мг/л и *P* = 2,2 Вт/мг/л. Однако, если энергопотребление рассматривается как более важный отклик, чем скорость образования озона, оптимизатор предлагает другую уставку, которая равна *V* = 11,99 кВ, *W* = 1,3 см и *d* = 5 мм, что соответствует КО = 0,2 мг/л и *P* = 1 Вт/мг/л.

Напряжение и ток разряда измерялись соответственно с использованием высоковольтного зонда (Tektronix) и монитора тока (Pearson), подключенного к осциллографу (Tektronix) (рисунок 7). Импульсная энергия $E_р$ (Дж) может быть из вычисленных интегрирований измеренного напряжения (*V*) и тока (*A*) за импульс. Чтобы избежать помех в измерении, импульсная энергия была получена из средних значений нескольких десятков образцов с использованием математического модуля в осциллографе. Эффективность производства озона КО (г/кВтч) выглядит следующим образом:

$$\text{КО}\left(\frac{\text{г}}{\text{кВт}}\right)=\frac{\left(\frac{c\left(\frac{\text{г}}{\text{Нм}^3}\right)}{1000}\times\frac{Q(SLPM)}{60}\right)}{P(W)}3,6\times10^6\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кВт}}\right)=\frac{60CQ}{P}, \quad (4)$$

где *C* – концентрация озона, г/Нм^3; *Q* – расход газа (стандартный литр за минуту); *P* – мощность установки (Вт), определяемая следующим образом:

$$P = fE_р, \quad (5)$$

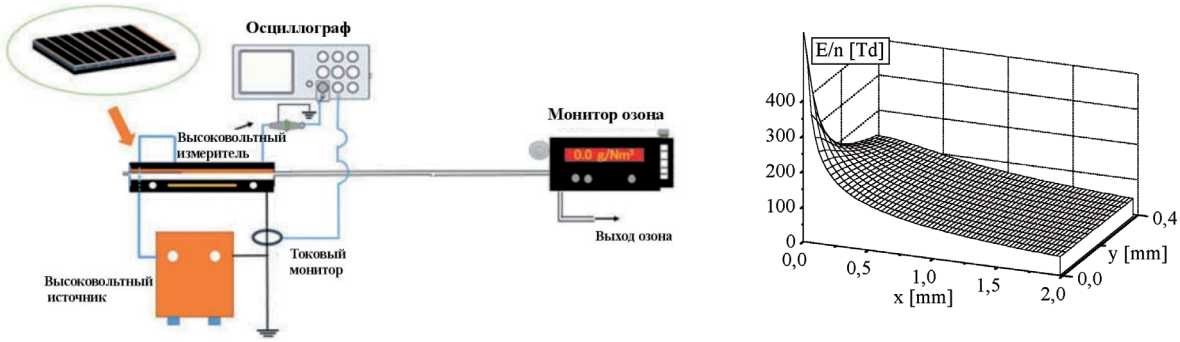
где *f* – частота импульсного питания (Гц).

Экспериментальная система состоит из системы электрической диагностики, импульсного источника питания, многоканального диэлектрического барьерного реактора с электродами, монитора озона, как показано на рисунке 8. Многоканальный реактор с 1,5 см шириной диэлектрика составлен из прямоугольных электродов размером (50 см × 1,5 см × 0,8 см), как описано в публикациях В. В. Егорычева. Положительный импульс, как показано на рисунке 9, был использован в этом эксперименте, поскольку сообщается о более высоких показателях генерации озона по сравнению с отрицательным импульсом или биполярным импульсом. Время нарастания импульсной мощности составило ~ 400 нс.

Поверхностные разряды (ПР) представляют собой особый вид диэлектрических барьерных разрядов, которые развиваются ступенчато на поверхности диэлектрика при увеличении приложенного напряжения. Результаты двумерного моделирования показывают, что в развитии разряда при отрицательной полярности преобладает механизм катодного падения на металлическом поверхностном электроде. При положительной полярности положительный стример развивается на поверхности диэлектрика на каждой стадии разряда. Катодное падение появляется около головки стримера на поверхности диэлектрика. Из-за более высокой напряженности поля на конце разряда при положительной полярности оксиды озона и

азота образуются почти однородно во всей области разряда. При отрицательной полярности оксиды озона и азота в основном синтезируются в области падения катода. В целом усиленное образование оксида азота наблюдается при положительной полярности.

Поверхностные разряды, разновидность разрядов диэлектрического барьера наблюдаются в схемах с высоковольтными электродами параллельно (провода, прутки, полосы) на одной стороне диэлектрического слоя и плоским противоэлектродом на его обратной стороне (рисунок 7, слева). Это устройство используется как хорошо известное устройство с объемным разрядом с газовым зазором в коммерческих генераторах озона.



Показатель	Кодовое обозначение	Интервал варьирования	Уровни факторов		
			–1	0	+1
Подводимое напряжение, кВ	X1	2	10	8	12
Расстояние между пластинами, м	X2	0,01	0,04	0,05	0,06
Ширина диэлектрика, м	X3	0,002	0,013	0,015	0,017

Рисунок 8 – Эскиз схемы электродной системы озонаторной установки (с граничными условиями) и начального распределения напряженности поля при 12 кВ

Figure 8 – Sketch of the electrode system of the ozonator installation (with boundary conditions) and the initial distribution of the field strength at 12 kV

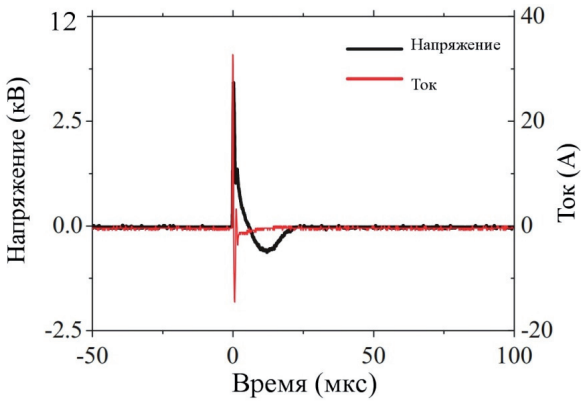


Рисунок 9 – Типичная форма разряда

Figure 9 – Typical discharge form

Развитие (ПР) определяется неоднородным начальным распределением напряженности поля с максимумом на линии тройного соединения, где поверхностный электрод, диэлектрик и газовое пространство сходятся (рисунок 8, справа). Из экспериментов [2], а также из моделирования [2] известно, что (ПР) распространяются ступенчато по диэлектрику при повышении напряжения. На каждом этапе накопление носителей заряда на диэлектрике приводит к уменьшению напряженности поля и затуханию разряда. После повышения напряжения может произойти следующий шаг разряда.

Синтез озона в генераторах озона (ПР) с подачей кислорода и воздуха подробно исследован экспериментально [2]. В кислороде максимальная концентрация озона и эффективность сравнимы с таковыми у сопоставимых генераторов озона. В производстве озона в воздухе его эффективность значительно ниже в устройствах (ПР). При более высоких плотностях энергии достигается почти полное разрушение озона. Причины такого поведения могут быть найдены в механизмах разряда (ПР), которые отличаются от таковых. Чтобы прояснить это, развитие разряда в воздухе и состав газа после разряда, особенно концентрация озона, исследуются с помощью самосогласованной двумерной модели для обеих полярностей

приложенного напряжения.

Уравнения неразрывности электронов, положительных и отрицательных ионов вместе с уравнением Пуассона решаются в двух измерениях. В области разряда уравнения скорости ионизации, рекомбинации и присоединения решаются в зависимости от напряженности локального электрического поля. На поверхностях учитывается вторичная эмиссия электронов фотонами и положительными ионами. Диэлектрическая поверхность определяется как непроницаемая граница. Все заряженные частицы, достигающие этой границы, собираются на поверхности.

Из-за стримерного механизма при положительной полярности молекулы кислорода диссоциируются, и озон образуется почти однородно вдоль поверхности диэлектрика в слое высотой около 50 мкм (рисунок 10, справа). При отрицательной полярности основная концентрация озона может быть обнаружена в катодной области (рисунок 11, справа). Это связано с относительной низкой напряженностью поля на конце поверхностного разряда при отрицательной полярности.

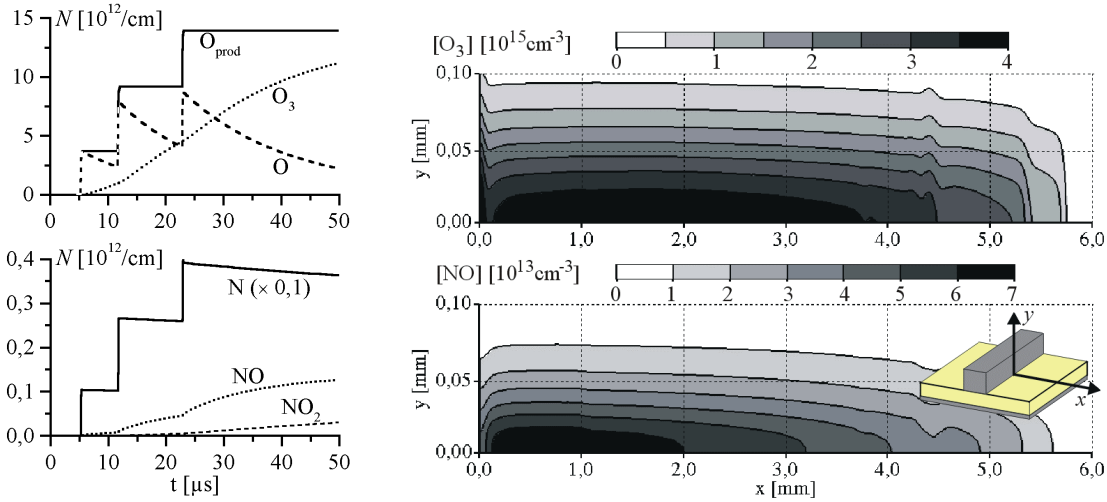


Рисунок 10 – Временная характеристика развития общего числа наиболее важных компонентов (Oprod – сумма всех произведенных атомов кислорода, число N-атомов делится на 10) и распределения O3 и NO при 50 мкс при положительной полярности

Figure 10 - Temporal characteristic of the development of the total number of the most important components (Oprod is the sum of all produced oxygen atoms, the number of N atoms is divided by 10) and the distribution of O3 and NO at 50 μs with positive polarity

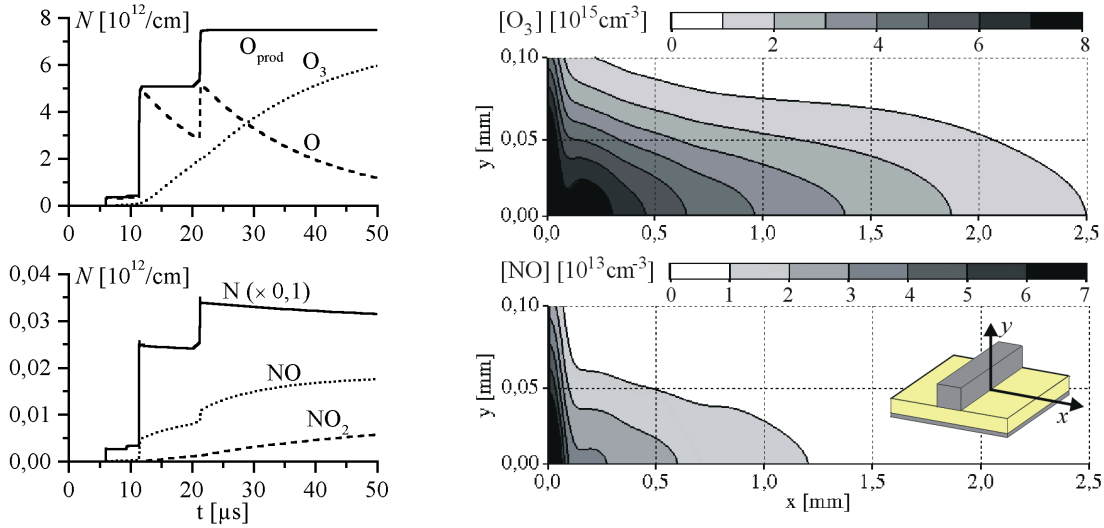


Рисунок 11 – Временная характеристика развития общего числа наиболее важных компонентов (Oprod – сумма всех произведенных атомов кислорода, число N-атомов делится на 10) и распределения O3 и NO при 50 мкс при отрицательном значении полярности

Figure 11 - Temporal characteristics of the development of the total number of the most important components (Oprod is the sum of all produced oxygen atoms, the number of N atoms is divided by 10) and the distribution of O3 and NO at 50 μs with a negative polarity

Выводы

Эффективность генерации озона связана с геометрическими размерами генератора озона. Экспериментальная методика, основанная на планировании многофакторного эксперимента, была предложена для определения оптимальных размеров генератора с учетом влияния концентрации озона и энергетических характеристик. В данной статье пришли к выводу, что:

• разрядный промежуток должен быть как можно меньше, чтобы повысить эффективность образования озона генератором.

• ширина диэлектрика должна быть оптимизирована с учетом значений концентрации озона и эффективности производства озона.

Можно сделать вывод, что применение многофакторного эксперимента с использованием озонаторной установки с диэлектрическим барьерным разрядом является эффективным методом исследования концентрации озона в зависимости от параметров электродной системы. Многофакторный эксперимент может эффективно прогнозировать и оптимизировать параметры электродной системы. Результаты показали высокие значения коэффициента детерминации $\left(R^2 > 0,969\right)$ для четырех поверхностей отклика, обеспечивающие удовлетворительное согласование полиномиальной модели второго порядка с экспериментальными данными. Параметры расстояние между электродами; ширина диэлектрика и напряжение были признаны наиболее значимыми факторами. Результаты, в частности, демонстрируют потенциальное влияние использования высоких напряжений (> 10 кВ) на эффективность производства озона.

БИБЛИОГРАФИЧЕКИЙ СПИСОК

1. **Chang M.** Experimental Study on Ozone Synthesis via Dielectric Barrier Discharges / M. Been Chang, S. Wu // Ozone: Science & Engineering: The Journal of the International Ozone Association. 1997. Vol. 19. № 3. pp. 241–254.

2. **Kitayama J., Kuzumoto M.** Theoretical and Experimental Study on Ozone Generation Characteristics of an Oxygen–Fed Ozone Generator in Silent Discharge // J. Phys. D: Appl. Phys. 1997. Vol. 30. № 17. pp. 2453–2461.

3. **Kogelschatz U., Eliasson B., Hirth M.** Ozone Generation from Oxygen and Air: Discharge Physics and Reaction Mechanisms // Ozone: Science & Engineering: The Journal of the International Ozone Association. 1988. Vol. 10. № 4. pp. 367–377.

4. **Lang H. V., Vezzu G., Suter M.** Science and Experience based Improvements of industrial Ozone Generators // 17th Ozone World Congress, Strasbourg, France. 2005. № 3. pp. 1–10.

5. **Normand L.** Frigon and David Mathews. Practical Guide to Experimental Design. John Wiley and Sons Inc. 1996. 342 p.

6. Alberto Garcia–Diaz and Don T. Phillips. Principles of Experimental Design and Analysis. Chapman & all,' 1995, 409 p.

7. **Шмигель В. В., Егорычев В. В.** Инкубатор с ионизатором // В сб.: Оптимизация электротехнологий в АПК: материалы Международной научно-практической конференции. Ярославль, 2016. С. 83–89.

REFERENCES

1. **Chang M.** Experimental Study on Ozone Synthesis via Dielectric Barrier Discharges / M. Been Chang, S. Wu // Ozone: Science & Engineering: The Journal of the International Ozone Association. 1997. Vol. 19. № 3. pp. 241–254.

2. **Kitayama J., Kuzumoto M.** Theoretical and Experimental Study on Ozone Generation Characteristics of an Oxygen–Fed Ozone Generator in Silent Discharge // J. Phys. D: Appl. Phys. 1997. Vol. 30. № 17. pp. 2453–2461.

3. **Kogelschatz U., Eliasson B., Hirth M.** Ozone Generation from Oxygen and Air: Discharge Physics and Reaction Mechanisms // Ozone: Science & Engineering: The Journal of the International Ozone Association. 1988. Vol. 10. № 4. pp. 367–377.

4. **Lang H. V., Vezzu G., Suter M.** Science and Experience based Improvements of industrial Ozone

Generators // 17th Ozone World Congress, Strasbourg, France. 2005. № 3. pp. 1–10.
5. **Normand L.** Frigon and David Mathews. Practical Guide to Experimental Design. John Wiley and Sons Inc. 1996. 342 p.
6. Alberto Garcia–Diaz and Don T. Phillips. Principles of Experimental Design and Analysis. Chapman & all,' 1995, 409 p.
7. **Shmigel' V. V., Egorychev V. V.** Inkubator s ionizatorom [Ionizer incubator] // V sb.: Optimizaciya elektrotekhnologij v APK: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. Yaroslavl', 2016. pp. 83–89.

***Шмигель Владимир Викторович**, доктор техн. н ук, профессор*
Тел. 8-961-154-35-75
E-mail: v.shmigel@yarcx.ru

***Угловский Артем Сергеевич**, к нд. техн. н ук, ст рший препод в тель*
Тел. 8-980-663-85-78
E-mail: a.uglovskii@yarcx.ru

***Егорычев Валерий Владимирович**, спир нт*
Тел. 8-910-666-60-33
E-mail: lion-007@list.ru