

ИНСТИТУТ

ФИЗИКИ



им. Л.В.Киренского

Безруких Е. Г.
Гаврилюк А. П.
Зайцев Н. К.
Шабанов В. Ф.

РАСЧЕТ
КОНЦЕНТРАЦИИ ОЗОНА,
СОЗДАВАЕМОЙ
ОЗОНАТОРОМ
В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

Препринт 771Ф
Красноярск, 1996

Препринт № 771Ф

**РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИИ ОЗОНА
СОЗДАВАЕМОЙ ОЗОНАТОРОМ В ЗАМКНУТОМ ОБЪЁМЕ**

Безруких Е.Г., Гаврилок А.П., Зайцев Н.К., Шабанов В.Ф.

г. Красноярск 1996г.

Рассмотрены математические модели использования озонаторов для обработки объемов ограниченных несколькими типами оболочек. Полученные расчетные соотношения могут быть применены при определении концентраций озона в помещениях и оболочках разных типов, а также при проектировании озонаторов.

© Институт физики им. Л.В.Киренского СО РАН

Ответственный за выпуск Зайцев Н.К.
Подписано в печать 13.12.96
Уч.изд.л. 1,1 Тираж 70. Заказ 68
Опечатано на ротапринте ИФ СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок

СОДЕРЖАНИЕ

АННОТАЦИЯ.....	2
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. Озонатор внутри жесткой оболочки.....	4
2. Озонатор вне жесткой оболочки.....	11
3. Мягкая нерастяжимая оболочка.....	13
4. Протяженная оболочка.....	16
5. Окислы азота.....	17
6. Получение озono-воздушной смеси с повышенной концентрацией озона.....	19
7. Экспериментальная проверка полученных выражений.....	22
8. Заключение.....	24
ЛИТЕРАТУРА.....	25

ВВЕДЕНИЕ

Использование озона для приготовления питьевой воды и очистки сточных вод широко известно и давно используется на практике.

В последнее время повысился интерес к практическому применению озона для обработки и хранения сельскохозяйственной продукции, санации помещений, дезинфекции предметов и оборудования [1]. Положительные результаты применения озона наблюдаются и в медицинской практике для снижения послеоперационных осложнений, лечения ран, обработки перевязочных материалов. Эффективной областью применения озона, как сильнейшего окислителя, являются химические технологии, в том числе деструкция экологически вредных веществ.

Правильность применения озона в значительной степени зависит от используемой концентрации и времени воздействия. В зависимости от целей обработки, концентрации могут варьироваться от уровня $0,1 \text{ мг/м}^3$ (ПДК_{р.з.}) до нескольких грамм на кубический метр; время воздействия от нескольких минут до непрерывного режима обработки. В ряде случаев эффект воздействия озона носит пороговый характер, а действующая доза строго регламентирована. На практике это приводит к необходимости непрерывного контроля содержания озона в обрабатываемом объеме, использованию дорогостоящего диагностического и озонотвделяющего оборудования.

Ситуация осложняется также тем, что производительность генераторов озона в сильной степени зависит от температуры и влажности воздуха применяемого в качестве исходной газовой смеси, а концентрация озона в обрабатываемом объеме является нелинейной функцией времени озонирования.

В данной работе рассматриваются несколько вариантов поведения системы озонатор - обрабатываемый объем и приводятся данные для определения концентрации озона при различных режимах обработки.

1. Озонатор внутри жесткой оболочки.

Одним из наиболее часто встречающихся на практике случаев является обработка помещения заданного объема V с помощью размещенного внутри него генератора озона. Для

упрощения будем считать, что работа озонатора не приводит к изменению температуры T внутри помещения, газ несжимаемым. Помещение считаем герметичным.

Будем рассматривать озонатор прямооточного типа, в котором воздух помещения подается в реактор озона, образующаяся озono-воздушная смесь перемешивается в объеме помещения и снова попадает на вход озонатора. Общая масса газовой смеси M в помещении (в следствии его герметичности) не меняется, общий массовый поток G смеси через реактор озона, задаваемый конструктивными параметрами озонатора, будем считать постоянным.

Схема условий озонирования приведена на Рис. 1.

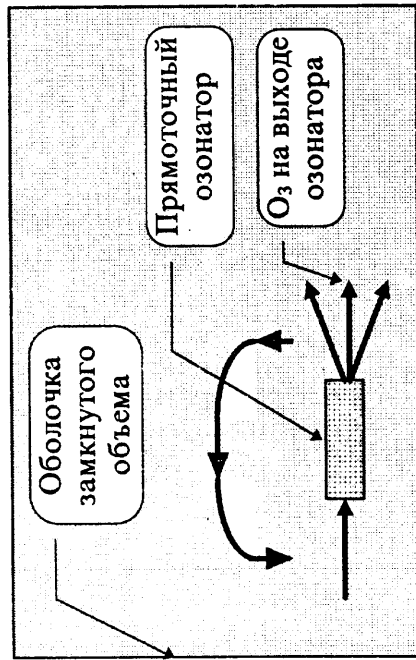


Рис. 1. Схема обработки помещения с помощью озонатора помещенного внутрь замкнутого объема.

Массовый поток озона на выходе озонатора при подаче на его вход воздуха без примеси O_3 будем считать стабильным и равным $g(O_3)$. Тогда коэффициент трансформации кислорода в озон b будет равен $b = g(O_3)/g(O_2)$, где $g(O_2)$ массовый поток кислорода, содержащийся в воздухе.

Озон, содержащийся в газовой среде помещения, после повторного прохождения через озонатор может в реакторе озона частично распадаться. В этом случае общий поток O_3 на выходе озонатора будет равен сумме $g(O_3)$ и $\alpha g'(O_3)$, где коэффициент α описывает величину не распавшегося озона

поступающего на вход реактора ($\alpha < 1$), $g'(O_3)$ массовый поток озона на входе в озонатор.

Уравнение баланса для общей массы озона $M(O_3)$ в объеме V в этом случае можно представить в следующем виде:

$$\frac{dM(O_3)}{dt} = g(O_3) + \alpha g'(O_3) - g'(O_3) - \lambda M(O_3) \quad (1)$$

где учтен приход его из озонатора, уход обратно в озонатор и распад его в помещении с константой λ .

В приближении идеального перемешивания в помещении соотношение между выходящими потоками определяются соотношением масс газов внутри помещения:

$g(O_3)/G = M(O_3)/M$, $g(O_2)/G = M(O_2)/M$, где M общая масса газа внутри помещения. Используя это, правую часть уравнения (1) можно выразить в следующем виде:

$$\frac{dM(O_3)}{dt} = \alpha \frac{M(O_3)}{M} G + \beta \frac{M_0(O_2) - M(O_3)}{M} G - \frac{M(O_3)}{M} G - \lambda M(O_3) \quad (2)$$

где $M_0(O_2)$ содержание кислорода в исходном воздухе без озона. Или в более удобном виде:

$$\frac{dM(O_3)}{dt} = \beta G \frac{M_0(O_2)}{M} - \left(\frac{1 + \beta - \alpha}{M} G + \lambda \right) M(O_3) \quad (3)$$

Это уравнение имеет решение:

$$M(O_3) = \frac{\beta G M_0(O_2)}{(1 + \beta - \alpha)G + \lambda M} \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{1 + \beta - \alpha}{M} G + \lambda \right) t \right] \right\} + M_0(O_3) \exp \left[- \left(\frac{1 + \beta - \alpha}{M} G + \lambda \right) t \right] \quad (4)$$

Характерный вид зависимости концентрации озона $N = M(O_3)/V$ в объеме помещения со временем работы озонатора приведен на Рис. 2. При расчетах для константы λ принимался мономолекулярный механизм распада озона ($\lambda = 0,693/T$), где T период полураспада.

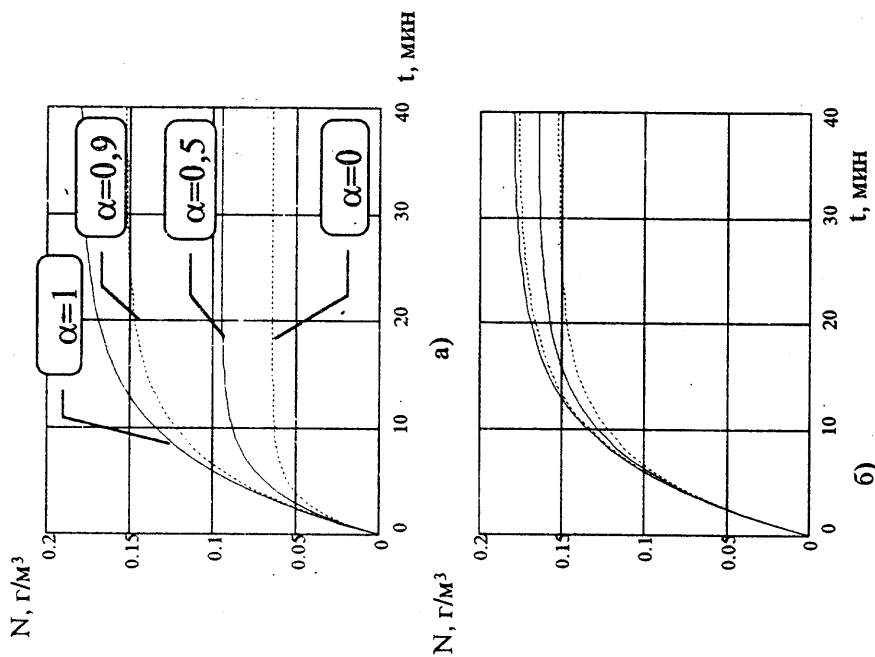


Рис. 2. Зависимость концентрации озона N в помещении объемом $V=10\text{ м}^3$ от времени работы озонатора t . Рис. 2а - начальная концентрация озона на выходе озонатора $0,1\text{ г/м}^3$, $26 - 1\text{ г/м}^3$. Производительность озонаторов одинаковая ($g(O_3)=15\text{ г/час}$), а скорость прокачки газа отличается в 10 раз. Период полураспада озона в объеме помещения принимался равным 5 минутам.

Как видно из рисунка, концентрация озона в помещении нарастает и затем выходит на насыщение, которому соответствует равновесное значение N^* , задаваемое выражением:

$$N^* = \frac{\beta G M_0(O_3)}{[(1 + \beta - \alpha)G + \lambda M]V} \quad (5)$$

полученным из (4) при $t \rightarrow \infty$.

Такое поведение кривой физически означает, что с течением времени распад молекул озона уравнивается их поступлением из озонатора. Величина равновесной концентрации зависит от многих факторов, в том числе от конструктивных особенностей озонаторов. Например для озонатора с низкой выходной концентрацией, но с большим объёмом прокачиваемого воздуха, даже небольшие (10%,) потери выработанного озона при повторном прохождении через реактор озона приводят к заметному снижению равновесной концентрации O_3 в помещении (Рис. 2.а. $\alpha=0,9$). Для озонаторов с более высокой выходной концентрацией O_3 при равной производительности по озону влияние α сказывается в меньшей степени (Рис. 2б.).

На Рисунке 3. приведена равновесная концентрация (N^*) озона в зависимости от обрабатываемого объема при разных α .

За счет многократного прохождения газовой смеси через разрядник равновесная концентрация озона в помещениях малого объема будет в сильной степени зависеть от α и производительности вентиляторов озонатора. Например величина газового потока в расчетах для Рис.3а). принималась равной 150 м³/час, а для Рис.3б). 15 м³/час. При равной производительности по озону величина равновесной концентрации при $\alpha < 1$ заметно ниже.

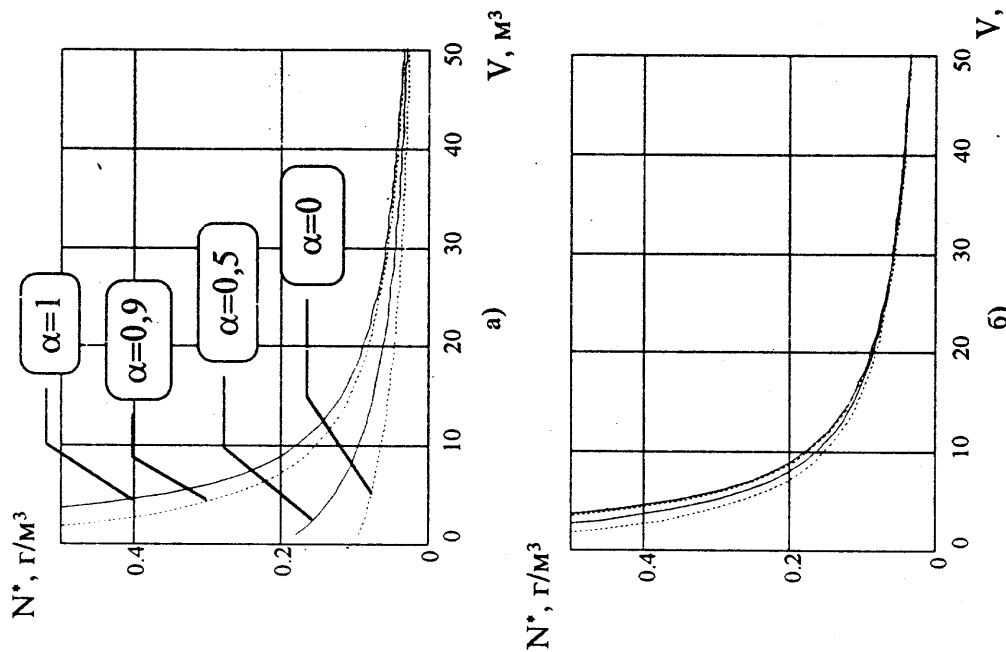


Рисунок 3. Зависимость величины равновесной концентрации O_3 (через 30 минут работы озонатора) от объема помещения. Рис. 3а - начальная концентрация озона на выходе озонатора 0,1 г/м³, 3б - 1г/м³. Производительность озонаторов 15 г/час.

На Рис.4 в логарифмическом масштабе приведены расчетные зависимости равновесной концентрации озона от объема помещения для озонаторов разной производительности.

Сплошные кривые: начальная концентрация O_3 на выходе озонатора 1 г/м^3 , верхняя кривая производительность озона 85 г/час , нижняя 15 г/час . Пунктирные кривые: начальная концентрация на выходе $0,1 \text{ г/м}^3$, производительность озона верхняя кривая 85 г/час , нижняя 15 г/час . Коэффициент α для всех озонаторов принимался равным $0,7$.

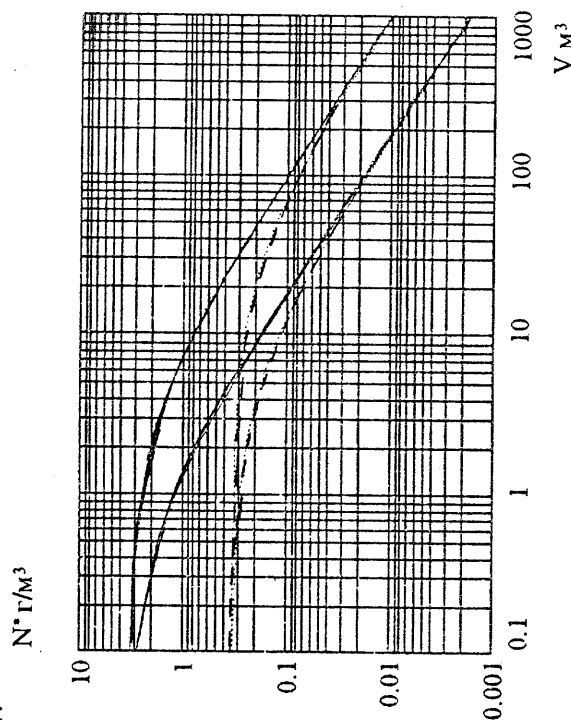


Рис.4. Зависимость концентрации озона в помещении после 30 минут работы озонатора от объема помещения.

Таким образом концентрация озона создаваемая прямоточным озонатором в замкнутой оболочке зависит от ее объема, констант распада озона в объеме и в разряднике, скорости газового потока через разрядник, а также от не рассматриваемой нами в данной работе зависимости производительности озонаторов от температуры и влажности воздуха.

При одинаковой "валовой" производительности озонаторов, из за их конструктивных особенностей, создаваемая концентрация озона внутри помещения может значительно отличаться. Данный результат необходимо учитывать при практических применениях озонаторов.

После выключения озонатора концентрация озона в объеме, ввиду его неустойчивости, начинает снижаться. Распад может проходить по нескольким каналам, включая бимолекулярный. В целом, с достаточной для практики можно использовать точностью, снижение концентрации можно описать следующим законом:

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t) \quad (6)$$

где N_0 концентрация на момент выключения озонатора, λ - константа распада ($\lambda = 0,693/T$, T - время снижения концентрации озона в два раза). Характерный вид этой зависимости в полулогарифмическом масштабе приведен на Рис.5.

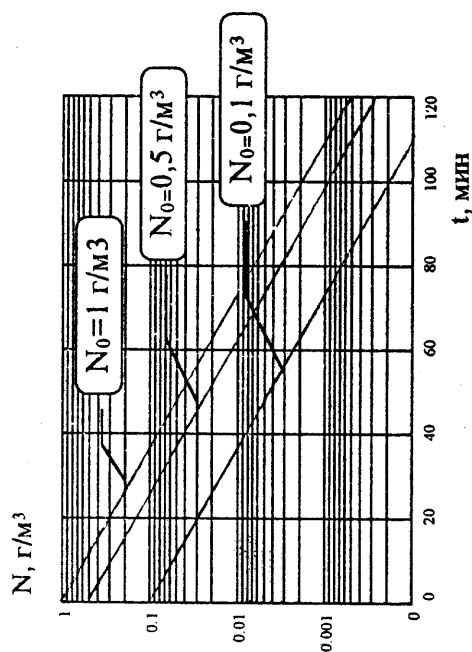


Рис.5. Зависимость распада озона в помещении во времени после выключения источника озона.

Исходная концентрация озона на момент выключения озонатора N_0 для верхней кривой соответствует 1 г/м^3 , для средней кривой $0,5 \text{ г/м}^3$ и для нижней кривой $0,1 \text{ г/м}^3$.

Время полураспада озона (через которое определяется константа распада) для зависимостей на Рис.5. принималось равным 11 минутам [2]. Как следует из рисунка 5, при указанных условиях за три часа происходит практически полный распад озона до безопасных концентраций (концентрация $0,001 \text{ г/м}^3$ O_3 соответствует 10 ПДК рабочей зоны [3]).

2. Озонатор вне жесткой оболочки.

Следующая задача связана с обработкой озонном объектов, помещенных в жесткую оболочку (бокс), объемом V_0 . Источник расположен вне оболочки, избыточное давление нагнетаемой озono-газовой смеси отводится из системы через свободный выход. Условия такие же как и в предыдущей задаче, но отсутствует рециркуляция озона и, в отличие от предыдущей задачи, вместо массового потока смеси используем понятие объемного потока (расхода) G_v ($\text{м}^3/\text{час}$). Полагаем, что входной поток G_{v0} равен выходному G_{v1} . Предполагая, что в объеме оболочки происходит мгновенное идеальное смешение газа, допускаем, что концентрация озона в выходном потоке равна концентрации его в объеме.

Схема обработки озонном объемом внутри жесткой оболочки внешним озонатором приведена на Рис. 6.

Соответствующее дифференциальное уравнение для массы O_3 в оболочке имеет следующий вид:

$$\frac{dM}{dt} = (g_0 - g_1) - \lambda M, \quad (7)$$

где первый член в правой части уравнения описывает поток массы (g_0) озона, приходящего из озонатора в оболочку, второй (g_1) - уходящего из оболочки, третий - массу расставшегося внутри оболочки в единицу времени.

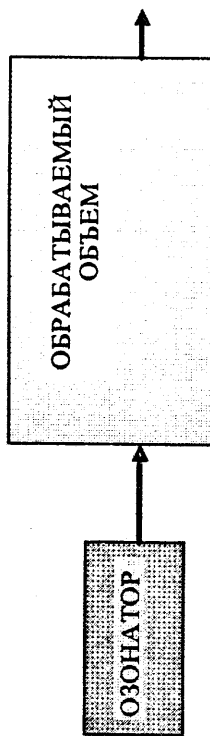


Рис. 6. Схема обработки объема в жесткой оболочке внешним озонатором со сбросом избыточного давления из обрабатываемого объема.

Поскольку концентрация озона в выходящем потоке равна его концентрации в оболочке

$$\frac{g_1}{G_{v1}} = \frac{M}{V_k} \quad \text{и} \quad G_{v1} = G_{v0},$$

то можно получить выражение для g_1 .

$$g_1 = \frac{M}{V_k} G_{v0}. \quad (8)$$

Подставляя в (7) и переходя к концентрациям ($N=M/V$) получаем окончательно:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{g_0}{V_k} - \left(\frac{G_{v0}}{V_k} + \lambda \right) N \quad (9)$$

Соответствующее решение принимает вид:

$$N(t) = \frac{g_0}{V_k \lambda_1} (1 - \exp(-\lambda_1 t)), \quad \lambda_1 = \frac{G_{v0}}{V_k} + \lambda \quad (10)$$

Это решение описывает как процесс установления концентрации озона при прокачки через заданный объем, так и стационарный (установившийся) режим прокачки. Стационарное значение концентрации определяется следующим образом:

$$N^* = \frac{g_0}{\lambda_1 V_k} \quad (11)$$

На Рис. 7. приведена зависимость концентрации озона в замкнутой жесткой оболочке после включения озонатора.

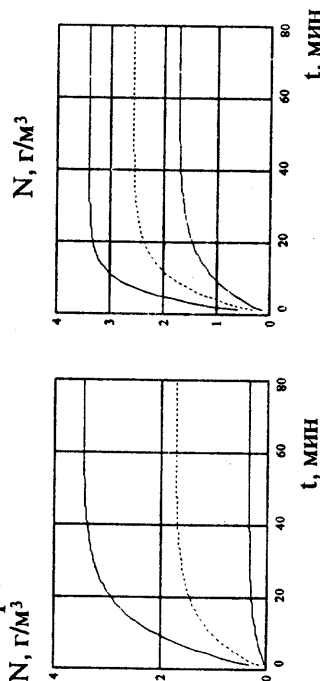


Рис. 7. Зависимость концентрации озона внутри жесткой оболочки объемом 50 л со временем.

а). Концентрация озона на выходе озонатора и входе в нижнюю кривая. Средняя кривая, 5 г/м^3 - средняя кривая и 1 г/м^3 - нижняя кривая. Скорость подачи озono-газовой смеси в оболочку $0,1 \text{ м}^3/\text{час}$.

б). Концентрация озона на входе в оболочку 5 г/м^3 , скорость подачи озono-газовой смеси в оболочку $0,4 \text{ м}^3/\text{час}$ - верхняя кривая, $0,2 \text{ м}^3/\text{час}$ - средняя кривая, $0,1 \text{ м}^3/\text{час}$ - нижняя кривая.

3. Мягкая неэластичная оболочка.

В некоторых практических задачах часто возникает необходимость озонирования объектов, помещенных в замкнутую гибкую оболочку. Например обработка озонном изделий помещенных в полиэтиленовые чехлы, санация открытых ран ограниченных полимерной оболочкой, обработка пищевых продуктов в процессе упаковки.

Схема обработки озонном объектов размещенных внутри гибкой расширяющейся оболочки, стенки которой сделаны из неэластичного материала, приведена на Рис. 8.

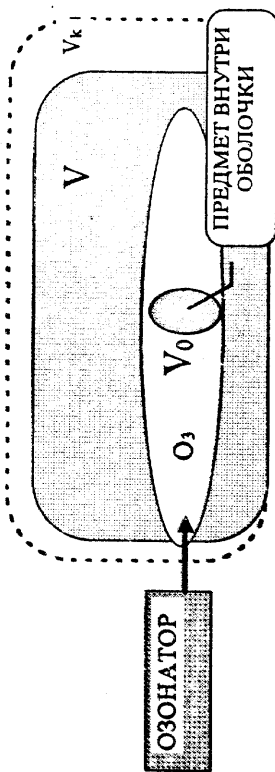


Рис. 8. Схема обработки предметов в гибкой неэластичной оболочке. Начальный объем V_0 , промежуточный V и конечный объем оболочки V_k . Под начальным объемом V_0 принимается исходный объем оболочки за вычетом объема помещенного внутрь предмета.

Рассмотрим поведение концентрации озона при следующих начальных условиях.

В гибкую неэластичную оболочку с начальным объемом воздуха V_0 начинает закачиваться озono-воздушная смесь, соответствующий объемный поток G_V [$\text{м}^3/\text{ч}$]. Производительность озонатора равна g [г/ч]. По мере накачки оболочки расширяется, её объем V увеличивается до конечного значения $V=V_k$. Полагая, что избыточное давление, необходимое для расширения оболочки, слабо отличается от внешнего давления, можно считать, что объем оболочки равен объему закачиваемого в неё газа плюс начальный объем V_0 .

$$V = V_0 + G_V t \quad (12)$$

Напишем баланс общей массы M озона в оболочке:

$$\frac{dM}{dt} = g - \lambda M \quad (13)$$

Его решение при начальном условии $M(t=0) = 0$ имеет следующий вид:

$$M = \frac{g}{\lambda} (1 - \exp(-\lambda t)) \quad (14)$$

Соответственно для концентрации озона N получаем:

$$N = \frac{M}{V(t)} = \frac{g}{\lambda} \frac{1 - \exp(-\lambda t)}{G_V t + V_0} \quad (15)$$

В случае, если V_0 мало по сравнению с общим объемом оболочки уравнение (15) можно упростить:

$$N = \frac{g}{\lambda G_V t} (1 - \exp(-\lambda t)) \quad (16)$$

Характерная зависимость концентрации N озона со временем в соответствии с формулой (15) приведена на Рис. 9.

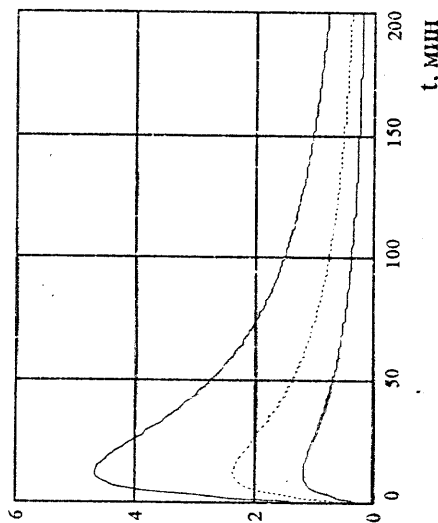


Рис. 9. Зависимость концентрации озона N в замкнутой гибкой неэластичной оболочке от времени наполнения озono-воздушной смесью.

Концентрация озона на выходе озонатора ($N_0 = g/G_V$) равна 2.5 г/м^3 для нижней кривой, 5 г/м^3 для средней и 10 г/м^3 для верхней

кривой. Начальный объем в оболочке $V_0 = 0.02 \text{ м}^3$, поток озono-воздушной смеси $G_v = 0.2 \text{ м}^3/\text{час}$.

Как видно из рисунка, особенностью рассмотренной оболочки является знакопеременный характер изменения концентрации озона со временем внутри нее, что связано с трехмерным характером увеличения объема.

После прекращения работы озонатора последующий распад озона происходит в соответствии с формулой (6).

4. Протяженная оболочка.

Рассмотрим еще одну задачу, моделирующую процесс обработки протяженных объемов (трубопроводов).

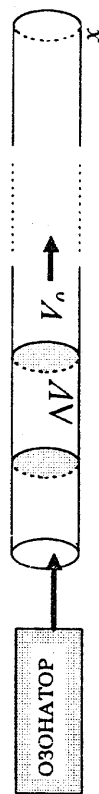


Рис. 10. Схема обработки трубопровода озono-воздушной смесью.

Будем считать, что на вход трубопровода поступает газо-озоновая смесь с концентрацией озона N_0 . Диаметр трубы D , (если выходное сечение озонатора отличается от входного сечения трубопровода, то концентрацию озона на начальном участке трубопровода можно рассчитать по формуле (10)). Сжимаемостью газа будем пренебрегать. Тогда в стационарном режиме объемный расход озono-газовой смеси в любом сечении трубы один и тот же и равен G_{v0} . Соответственно средняя по сечению скорость потока $V_0 = 4G_{v0}/3.14D^2$. Будем рассматривать процесс переноса озono-газовой смеси в режиме идеального вытеснения. Полагая при этом, что изменение концентрации озона в движущемся с потоком элементарном объеме ΔV (Рис. 10) описывается известным уравнением:

$$N = N_0 \exp(-\lambda \tau(x)), \quad (17)$$

где $\tau(x)$ - время, в течении которого данный объем движется от начала трубы до заданной точки трубы x , то есть $\tau = x/V_0$.

Тогда окончательно средняя концентрация озона в заданной точке трубы определяется следующим выражением:

$$N(x) = N_0 \exp\left(-\lambda \frac{x}{V_0}\right) \quad (18)$$

или, выражая через параметры трубы и расход смеси

$$N(x) = N_0 \exp\left(-\lambda \frac{\pi D^2 x}{4 G_{v0}}\right) \quad (19)$$

Типичные зависимости изменения концентрации озона с расстоянием от входного отверстия приведены на Рис. 11.

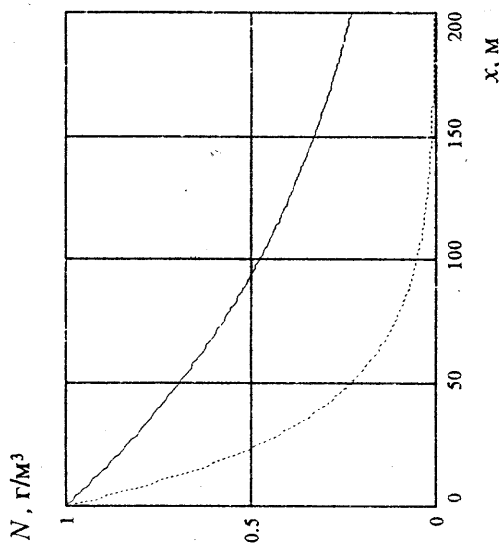


Рис. 11. Зависимость концентрации озона от расстояния после входного отверстия. Концентрация O_3 на входе принималась равной 1 г/м^3 , расход газовой смеси $1 \text{ м}^3/\text{ч}$. Диаметр трубопровода для сплошной линии равен 0.05 м , для пунктирной линии 0.1 м .

5. Окислы азота.

Как известно, при работе газоразрядного реактора озона на воздушной смеси в разряднике может происходить плазмохимическое образование окислов азота. Их концентрация как правило не превышает 1 % от концентрации озона, но при продолжительной работе озонатора в замкнутом помещении количество окислов азота может достичь заметной величины. Соединяясь с парами воды, окислы азота образуют аэрозоль азотнокислого состава. Возможность образования и накопления этих окислов следует учитывать при практическом использовании озонаторов.

Для оценки концентрации окислов азота образующихся в помещении при работе озонатора воспользуемся следующим приближенным выражением:

$$N(N_xO_y) = kQt/V \quad (20)$$

где $N(N_xO_y)$ концентрация окислов азота, k коэффициент задающий долю окислов азота образующихся при работе озонатора с производительностью по озону Q , t время работы озонатора, V объем помещения.

На Рис. 12. Приведена зависимость содержания окислов азота в помещении объемом 10 м^3 от времени работы озонатора.

Коэффициент k брался равным $0,01$; производительность озонатора 15 г/час . Как следует из рисунка после трех часов работы озонатора в объеме 10 м^3 концентрация окислов азота может приближаться к уровню ПДК.

Более точную зависимость поведения концентрации окислов азота от времени можно получить с использованием формулы (4), при подстановки соответствующих коэффициентов.

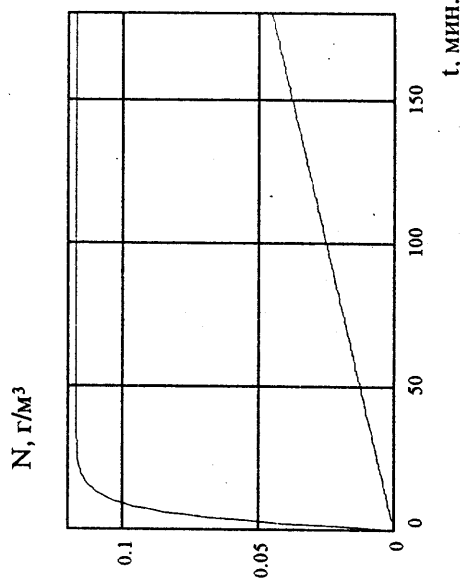


Рис. 12. Изменение концентрации окислов азота, (нижняя кривая) и озона, (верхняя кривая) от времени работы озонатора.

6. Получение озono-воздушной смеси с повышенной концентрацией озона.

Анализ результатов решения рассмотренной задачи 1. (уравнение (4)) показал, что при некоторых условиях в замкнутом объеме может создаваться концентрация озона превышающая концентрацию O_3 на выходе озонатора. К этим условиям относятся в первую очередь снижение объема оболочки окружающей озонатор, увеличение скорости рециркуляции озono-воздушной смеси через разрядник озонатора, эффективное охлаждение газовой смеси и элементов разрядника. Например, как показано в работе [4], увеличение температуры охлаждающей электроды воды до $+60^\circ\text{C}$ в полтора раза увеличивает температурный распад озона. Для рассмотренной нами задачи 1 это эквивалентно снижению коэффициента α до уровня $0,67$, что при значительной рециркуляции озона через нагретый разрядник приводит к увеличенным потерям озона в замкнутом объеме. Вместе с тем потенциальная возможность увеличения концентрации озона в замкнутом объеме с рециркулирующей озono-воздушной смесью представляет практический интерес для создания озонаторов без системы воздухоподготовки.

Рассмотрим следующую задачу: в объем V_0 , имеющим вход и выход помещен генератор озона, через разрядник которого происходит прокачка озono-воздушной смеси по замкнутому циклу (Рис.13). Если вход и выход закрыты, поведение системы описывается уравнением (4). При подаче на вход воздуха с массовым потоком $G_{вх}$, на выходе возникает, при включенном озонаторе, поток озono-воздушной смеси $G_{вых}$.

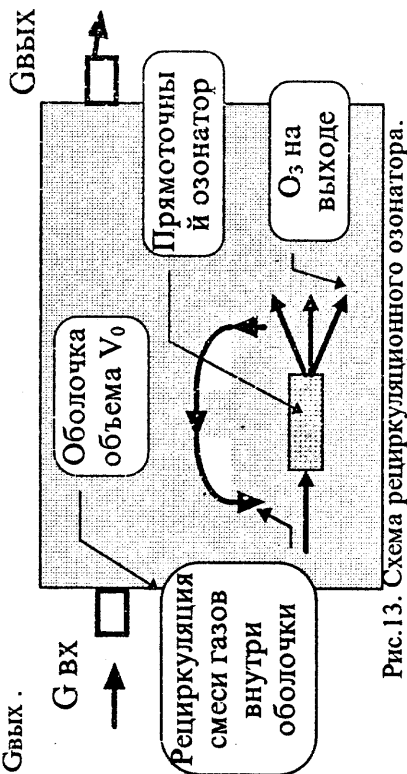


Рис.13. Схема рециркуляционного озонатора.

При решении задачи будем считать, что общая масса газа M в объеме V_0 постоянна ($M = \text{const}$), а $G_{\text{вх}} = G_{\text{вых}} = G_0$, то есть будем пренебрегать влиянием изменения химического состава газа на массу и давление газовой смеси в объеме V_0 . Эти допущения оправданы при незначительных относительных изменениях газового состава. Будем также считать, что относительные содержания азота во входном и выходном потоках равны, а меняется только соотношение между кислородной и озоновой составляющей, что следует из вышеизложенных допущений.

Рассмотрим уравнение баланса для массы озона $M(O_3)$ в объеме V_0 :

$$\frac{dM(O_3)}{dt} = g'(O_3) - g(O_3) - \lambda M(O_3) - G^*(O_3) - G^*(O_3) \quad (21)$$

где $g'(O_3) = g_1(O_3) + ag(O_3)$, $G^*(O_3) = M(O_3)G_0/M$.

Это уравнение такое же как и в задаче 1 (см. (1)), только добавляется член $G^*(O_3)$, связанный с уходом озона из объема за счет внешней прокачки. Окончательный вид уравнения будет:

$$\frac{dM(O_3)}{dt} = \beta g_0 \frac{M_0(O_3)}{M} - M(O_3) \left[\frac{g_0(1 + \beta - \alpha) + G_0}{M} + \lambda \right] \quad (22)$$

где g_0 - массовый расход газа через разрядник озонатора ($g_0 = \text{const}$).

Интегрируя (22) получаем выражение, описывающее изменение $M(O_3)$ с началом внешней прокачки (время t отсчитывается от начала прокачки):

$$M(O_3) = \frac{\beta g_0 M_0(O_3)}{g_0(1 + \beta - \alpha) + \lambda M + G_0} \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{g_0(1 + \beta - \alpha) + \lambda M + G_0}{M} t \right] \right\} + M_0(O_3) \exp \left[- \frac{g_0(1 + \beta - \alpha) + \lambda M + G_0}{M} t \right] \quad (23)$$

где $M_0(O_3)$ - начальное содержание озона в объеме V_0 в момент включения внешней прокачки.

Соответствующее установившееся значение $M_\infty(O_3)$ при больших временах t будет иметь следующий вид:

$$M_\infty(O_3) = \frac{\beta g_0 M_0(O_3)}{g_0(1 + \beta - \alpha) + \lambda M + G_0} \quad (24)$$

Для перехода к выражениям для концентраций необходимо умножить выражения (23) и (24) на $1/V_0$. Считая перемешивание газа в объеме V_0 идеальным, с учетом сделанных выше допущений, концентрацию озона в выходном потоке $G_{\text{вых}}$ можно считать равной $M(O_3)/V_0$.

Для практических расчетов выражения (23), (24) удобнее преобразовать в зависимость от практически измеряемых технических величин, например в следующую форму:

$$N(t) = \frac{21,55 S}{(21,55 + 7,2 \cdot 10^{-2} n - 21,55 \alpha) S + \frac{896 V_0}{T} + 21,55 S} \cdot A \quad (25)$$

$$A = \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{1,67 \cdot 10^{-2} (1 + 3,34 \cdot 10^{-3} n - \alpha) S}{V_0} - \frac{1,67 \cdot 10^{-2} S}{T} \right] \right\} t$$

где $N(t)$ концентрация озона в выходном потоке [g/m^3], t - время в минутах, n - концентрация озона на выходе озонатора в свободном пространстве (без рециркуляции газовой смеси) [g/m^3], S - расход (рециркуляция) газа через разрядник озонатора [$m^3/\text{час}$], V_0 - объем оболочки [m^3], s - прокачка газа через объем V_0 [$m^3/\text{час}$], T - период полураспада озона [мин.], α - доля не распавшегося озона прошедшего через разрядник. При $\alpha = 1$ разрядник не разваливает молекулы озона поступившие на его вход и концентрация озона на его выходе в рециркулярном случае будет равна $n^* + n$, где n^* концентрация озона на входе в разрядник. При $\alpha = 0$ все молекулы озона поступившие на вход разрядника разваливаются и концентрация озона на его выходе будет равна концентрации при работе в свободном пространстве - n . Коэффициент α , как уже упоминалось зависит от конструктивных особенностей разрядника и эффективности охлаждения озонатора.

Выражение (25) при $A=1$ описывает равновесное значение концентрации озона.

На рисунке 14 приведены зависимости концентрации озона от времени на выходе из оболочки для нескольких конструктивных исполнений.

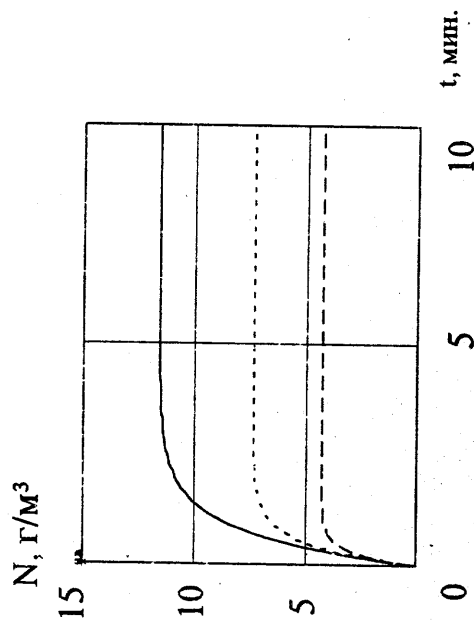


Рис.14. Концентрация озона на выходе из оболочки.

Объем оболочки $V_0 = 0,04 \text{ м}^3$, концентрация озона на выходе из разрядника в свободном пространстве $n = 1 \text{ г/м}^3$, скорость прокачки газа через разрядник $S = 40 \text{ м}^3/\text{час}$. Для верхней кривой $\alpha = 0,95$, скорость прокачки воздуха через оболочку $s = 1 \text{ м}^3/\text{час}$; для средней кривой $\alpha = 0,95$, $s = 3 \text{ м}^3/\text{час}$; для нижней кривой $\alpha = 0,8$, $s = 1 \text{ м}^3/\text{час}$.

Как видно из результатов расчета, концентрация на выходе из оболочки может более чем на порядок превышать выходную концентрацию озонатора работающего в свободном пространстве.

7. Экспериментальная проверка полученных выражений.

Проверка результатов расчетов 1-ой задачи производилась с применением прямогочного озонатора воздуха "ИОС-94", (разработка СКТБ "НАУКА" СО РАН). Измерения озона осуществлялись прибором "АФ-2". На Рис. 15. приведены полученные расчетные и экспериментальные данные для помещения объемом $9,4 \text{ м}^3$.

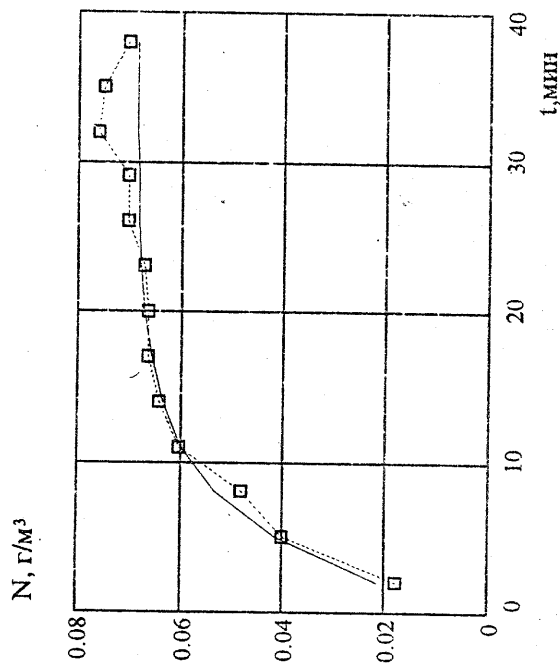


Рис. 15. Изменение концентрации озона в помещении объемом $9,4 \text{ м}^3$ со временем работы озонатора. Пунктирная кривая - экспериментальные значения, сплошная кривая - расчетная.

Производительность озонатора в используемых экспериментальных условиях составляла 7 г/час , выходная концентрация озона 80 мг/м^3 , коэффициент α в расчетах принимался равным $0,7$. Период полураспада озона по результатам предварительных измерений был выбран равным 5 минутам. Как видно из рисунка экспериментальная кривая удовлетворительно описывается полученными выражениями. Несколько флуктуаций на экспериментальной кривой видимо связаны с турбулентностью газового потока в помещении.

На рисунке 16 приведены зависимости изменения концентрации озона в боксе объемом $0,64 \text{ м}^3$ при использовании озонатора "ОСА-2" (изготовление СКТБ "НАУКА", СО РАН).

Озонаторы с одинаковой паспортной производительностью Q г/час, определяемой как произведение концентрации озона на выходе озонатора n , г/м³ на скорость прокачки газа через разрядник S , м³/час ($Q=nS$), по разным соотношениям n и S , могут создавать отличающиеся равновесные концентрации в замкнутых оболочках. Наибольшие отличия будут наблюдаться при малых объемах оболочки и недостаточном охлаждении разрядника.

Во многих случаях, согласно методикам обработки озона, для получения необходимого результата, требуется создать в объеме определенную концентрацию озона на заданное время. Ввиду нелинейного характера зависимости концентрации озона от времени работы озонатора (см. например Рис. 2.), для поддержания необходимого уровня концентрации в оболочке, требуется управлять режимами работы озонатора с помощью специальных измерителей озона, имеющих выходной сигнал управления. Альтернативным решением, может являться использование микропроцессорных средств для определения технологического регламента обработки озона и динамического управления режимом работы озонатора по введенным пользователем исходным данным. Проверка созданных алгоритмов управления озонатором (озонатор "ОСА-2" с микропроцессорным управлением, разработка СКТБ "НАУКА" СО РАН), показала перспективность данного подхода к технической реализации управляемого режима обработки объемов озона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кривошипин И.П. Озон в промышленном птицеводстве. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Росагропромиздат, 1988. - 175 с.
2. Спеддинг Д. Дж. Химия окружающей среды. М.: 1982. - С. 172-196.
3. Беспаматов Г.П., Кротов Ю.А., Предельно допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде. Справочник. Л.: Химия, 1985. - 528 с.
4. Вобликова В.А. и др., Влияние охлаждения электродов на синтез озона в озонаторах различных систем "диэлектрик - диэлектрик", "диэлектрик - металл". ВЕСТ. МОСК. УН-ТА. Сер.2, Химия. 1993. - Т. 34. №4. С. 367 - 370.

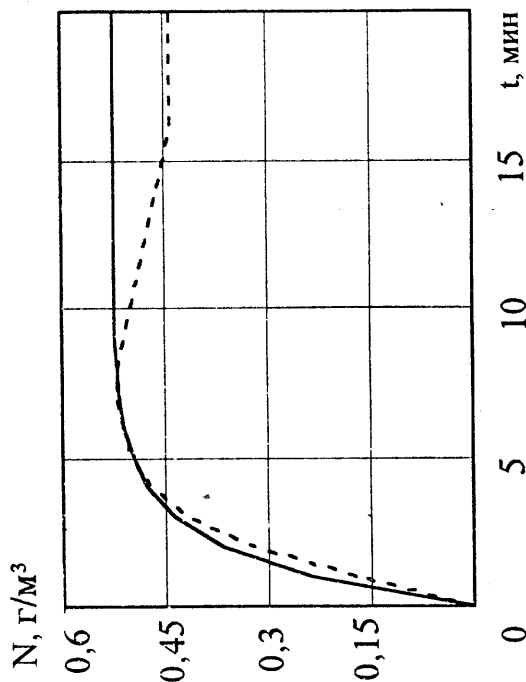


Рис.16. Изменение концентрации озона в боксе объемом 0,64 м³. Концентрация озона на выходе озонатора при работе в свободном пространстве $n = 0,12$ г/м³, использованный режим производности - 12 г/час. Сплошная кривая - расчет, пунктирная - эксперимент.

Снижение концентрации озона после 7 минут работы озонатора связано с повышением температуры в замкнутом объеме бокса и увеличение в связи с этим скорости его распада.

8. Заключение.

Как следует из приведенных результатов, поведение системы: [генератор газа]-[газ с конечным временем жизни]-[газовая оболочка] - сложным образом зависит от многих факторов. На практике, при использовании озонаторов для обработки озоно-газовой смесью объемов, эти зависимости должны адекватным образом учитываться. Иначе в ряде случаев передозировка озона может приводить к порче обрабатываемой продукции, а недобор концентрации озона не давать требуемых результатов.