

УДК 681.5:504

А. М. ПУГИН

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ РАСХОДА ОЗОНА ПРИ ОБРАБОТКЕ ПРИБОРНОГО ОТСЕКА МОБИЛЬНОГО ОБЪЕКТА С ОГРАНИЧЕННЫМИ РЕСУРСАМИ

Разработаны системотехнические модели, получены характеристики процессов озонирования как объектов управления. Модели предназначены для определения устойчивости и управляемости систем, оценки влияния малых изменений входных переменных на выходные координаты, что необходимо при разработке систем стабилизации. *Озонирование; системы; управление; модели; динамика*

ВВЕДЕНИЕ

Автономные мобильные объекты, предназначенные для работы в некоторых чрезвычайных ситуациях, должны подвергаться обеззараживанию (бактериологической обработке, детоксикации и т.д.). Одним из наиболее эффективных способов для этого является обработка озоном [1]. Для автономных объектов необходимо, чтобы озонирование выполнялась с минимальным расходом энергетических ресурсов. Кроме того, к требованиям обработки относится максимальное быстрое действие при ограничении на максимальное значение концентрации озона. Для выполнения этих требований необходимо производить озона ровно столько, сколько требуется для выполнения обработки. Другими словами, генерирование озона должно быть оптимальным в зависимости от конкретных условий обработки и учитывать возмущающие воздействия. Это может быть обеспечено с помощью системы управления озонированием [2].

Для обеспечения работы системы управления озонированием необходимо знать, сколько озона находится в зоне обработки. Однако в настоящее время отсутствуют методы, позволяющие как расчетным, так и экспериментальным путем определить количество озона в объеме с достаточной точностью. Трудности связаны с тем, что озон является нестабильным реагентом, чувствительным к возмущающим воздействиям со стороны микроклиматических параметров атмосферы, в которой происходит озонирование, и к свойствам поверхности обрабатываемых предметов. В ли-

тературе нет сведений о методах определения различных составляющих расхода исходной массы озона при газофазной обработке в условиях различных возмущающих воздействий [3]. На практике, при отсутствии достаточно точной информации о расходе озона в объекте озонирования, его количество задают с гарантированным избытком для того, чтобы наверняка осуществить обработку (также, например, как и хлор при хлорировании). Это приводит к увеличению расхода энергетических ресурсов, увеличению времени обработки, к повышенным концентрациям озона. В работе приводится разработанный метод определения составляющих расхода озона при газофазной обработке в условиях различных возмущающих воздействий.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ РАСХОДА ОЗОНА ПРИ ГАЗОФАЗНОМ ОЗОНИРОВАНИИ

При исследовании влияния возмущающих воздействий на процессы озонирования исходной информацией являются данные о концентрации озона в воздухе приборного отсека (ПО) — объекте управления (ОУ) и производительность генератора озона (ГО). При этом остаются неизвестными значения других составляющих расхода озона: на химические реакции, разложение озона, адсорбцию, утечку и «проскок». Без учета этих составляющих точный расчет потребности в озоне невозможен, что снижает эффективность работы системы. Распределение озона можно описать с помощью уравнения баланса масс. Синтези-

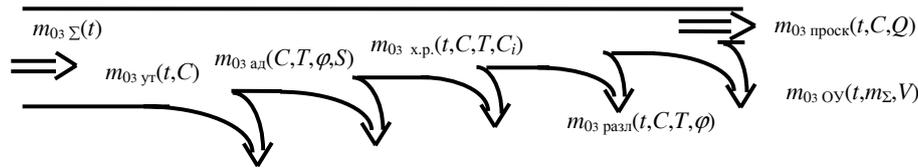


Рис. 1. Диаграмма распределения озона при озонировании

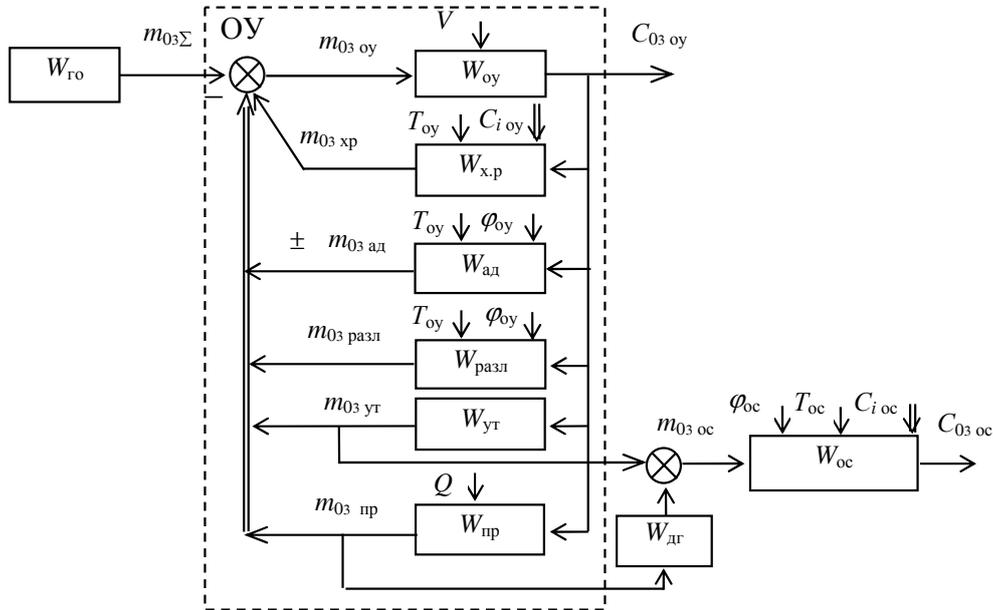


Рис. 2. Структурная схема преобразований озона, соответствующая уравнению баланса масс

рованный ГО озон — $m_{O3\Sigma}(t)$ распределяется следующим образом:

$$m_{O3\Sigma}(t) = m_{O3\text{оу}}(t, m_{O3\Sigma}, V) + m_{O3\text{пр}}(t, C, Q) + m_{O3\text{разл}}(t, C, T, \varphi) + m_{O3\text{х.р.}}(t, C, T, C_i) + m_{O3\text{ад}}(C, T, \varphi, S) + m_{O3\text{ут}}(t, C), \quad (1)$$

где слагаемые уравнения соответствуют различным составляющим от $m_{O3\Sigma}(t)$ — суммарной массы озона: $m_{O3\text{оу}}(t, m_{O3\Sigma}, V)$ — в ПО; $m_{O3\text{пр}}(t, C, Q)$ — на выходе из ПО — «проскок»; $m_{O3\text{разл}}(t, C, T, \varphi)$ — разложившегося; $m_{O3\text{х.р.}}(t, C, T, C_i)$ — затраченного на химические реакции; $m_{O3\text{ад}}(C, T, \varphi, S)$ — поглощенного в результате адсорбции; $m_{O3\text{ут}}(t, C)$ — потерянного из-за негерметичности озонопроводов и ПО; каждое из слагаемых является функцией возмущающих воздействий: T — температуры; φ — влажности; t — времени; C — концентрации и исходной массы озона; S — площади адсорбирующей поверхности; V — объема, в котором распространяется озон (в дальнейшем, для упрощения, запись функциональных зависимостей опускаем).

В ходе озонирования потребление озона изменяется. Известные способы расчета раз-

личных составляющих расходуемого озона по озонограмме предназначены для обработки с использованием водных растворов [4]. Большое количество неизвестных в уравнении баланса масс (1) при газофазном озонировании не позволяет известными методами определять значения составляющих расхода озона. Для решения этой задачи предлагается новый метод, основанный на одновременной обработке информации по озонограмме и кислородограмме процесса озонирования.

Баланс масс можно представить в виде диаграммы, приведенной на рис. 1.

На рис. 2 приведена структурная схема преобразований озона, соответствующая уравнению (1) баланса масс. Каждому виду преобразований озона в приборном отсеке соответствует своя передаточная функция: $W_{оу}$ — объекта управления; $W_{ад}$ — адсорбции и десорбции; $W_{раз}$ — разложения озона; $W_{х.р.}$ — химических реакций озона; $W_{ут}$ — утечки; $W_{пр}$ — «проскока»; $W_{дг}$ — дегазации; $W_{ос}$ — окружающей среды. Кроме того на рис. 2 обозначены: $W_{ГО}$ — передаточная функция генератора озона; $C_{ос}$ — концентрация озона в окружающей среде; $m_{ос}$ — масса озона, поступившая в окружающую среду; $C_{оу}$ —

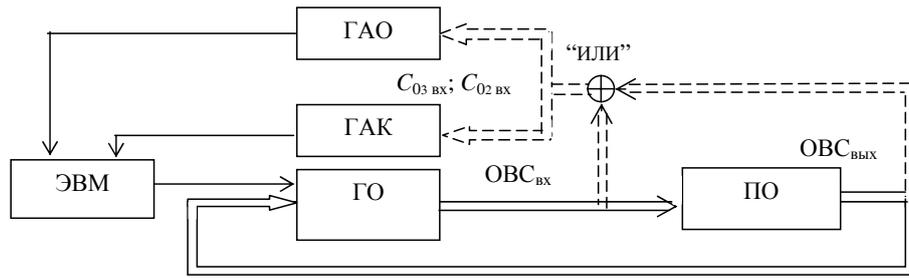


Рис. 3. Функциональная схема способа определения составляющих расхода озона

концентрация озона в ПО; C_i — концентрации газов, реагирующих с озоном; T_{Oy} , φ_{Oy} , T_{Oc} , φ_{Oc} — температура и влажность озono-воздушной смеси (ОВС) соответственно в ПО и в окружающей среде.

Большое количество слагаемых в уравнении (1), каждое из которых имеет функциональную зависимость от различных возмущающих воздействий, делает расчет уравнения в общем виде трудноразрешимой задачей. Однако, для реального процесса озонирования количество слагаемых может быть значительно меньшим. Рассмотрим, какие слагаемые в уравнении баланса масс являются основными при различных режимах и параметрах озонирования. При длительном озонировании основными процессами, влияющими на концентрацию озона, являются его разложение, утечка и «проскок», а в ряде случаев (при обработке стоков и выбросов) химические реакции. Влияние процессов адсорбции и десорбции сказываются только в начальный период. При кратковременном озонировании основными процессами могут являться химические реакции, адсорбции и десорбции, а также «проскок» озона после обработки. При использовании рециркуляции ОВС в замкнутом объеме, основным слагаемым может являться разложение озона. При озонировании в проточной камере основным слагаемым будет «проскок» озона, а также адсорбция для пневмотранспортных участков. Из сказанного выше следует, что в каждом конкретном случае озонирования возможно составление более простых частных случаев уравнения баланса масс и соответствующих структурных схем преобразований озона.

Рассмотрим задачу определения расхода озона при динамическом режиме озонирования, осуществляемом в ПО с помощью рециркуляции через ГО озono-воздушной смеси. Функциональная схема оборудования для измерений по разработанному методу приведена на рис. 3.

ГАО и ГАК — соответственно газоанализаторы, измеряющие концентрации озона и кислорода последовательно на входе и на выходе ПО (входе и выходе ГО при рециркуляции воздуха). Рассмотрим сначала задачу определения массы озона, вступившего в реакцию с обрабатываемым материалом, с реагентами или адсорбирующейся на поверхности обрабатываемого материала. Считаем, что при озонировании отсутствует утечка озono-воздушной смеси, а разложением озона в кислород можно пренебречь. В этом случае масса озона $m_{O3 \text{ xp}}$, затраченная на обработку (вступившая в реакцию), определяется по формуле:

$$m_{O3 \text{ xp}} = QC_{O3 \text{ ВХ}} \int_0^t (1 - C_{O3 \text{ ВЫХ}}^*) dt, \quad (2)$$

где Q — объемный расход воздуха, подаваемого в озонатор, и озono-воздушной смеси на выходе из него, $\text{м}^3/\text{с}$; $C_{O3 \text{ ВЫХ}}^* = C_{O3 \text{ ВЫХ}}/C_{O3 \text{ ВХ}}$ — относительное значение концентрации озона в ПО; $C_{O3 \text{ ВХ}}$ — концентрация озона в ОВС, создаваемая в озонаторе $\text{мг}/\text{м}^3$; $C_{O3 \text{ ВЫХ}}$ — концентрация озона в ОВС на выходе из ПО, $\text{мг}/\text{м}^3$; t — время озонирования, с.

Потребление озона пропорционально площади $S_{O3 \text{ xp}}$ озонотрассы, приведенной на рис. 4:

$$S_{O3 \text{ xp}} = \int_0^t (1 - C_{O3 \text{ ВЫХ}}^*) dt, \quad (3)$$

а масса израсходованного озона определяется соответственно по формуле:

$$m_{O3 \text{ xp}} = QC_{O3 \text{ ВХ}} S_{O3 \text{ xp}}. \quad (4)$$

Согласно структурной схеме на рис. 2 и уравнениям (1), (2) и (3) можно рассчитать значение этой массы через передаточную функцию процесса озонирования

$$m_{O3 \text{ xp}} = W_{\text{xp}} \Delta C_{O3 \text{ OY}}, \quad (5)$$

где $W_{xp} = Q/p$; p — оператор Лапласа; $\Delta C_{O_3 OY}$ — изменение концентрации озона в ПО за счет реакции озонирования

$$\Delta C_{O_3 OY} = C_{O_3 ВХ} - C_{O_3 ВЫХ} = C_{O_3 ВХ} (1 - C_{O_3 ВЫХ}^*) \quad (6)$$

Озонограмма данного процесса изображена на рис. 4, а. Видно, что в начале обработки происходит более интенсивное потребление озона. Концентрация озона в ОВС, выходящей из ПО, понижена. После обработки к моменту времени t она восстанавливается до уровня, который определяется производительностью ГО и объемом приборного отсека. Рассмотрим случай, когда потери озона из-за разложения могут быть велики и их необходимо учитывать. Это происходит, если время озонирования достаточно велико или если обработка производится при повышенных температурах. При разложении озона справедливо следующее соотношение:

$$m_{O_3 xp} + m_{O_3 разл} = QC_{O_3 ВХ} \int_0^t (1 - C_{O_3 ВЫХ}^*) dt, \quad (7)$$

откуда получим, что

$$m_{O_3 xp} = QC_{O_3 ВХ} \int_0^t (1 - C_{O_3 ВЫХ}^*) dt - m_{O_3 разл} \quad (8)$$

Согласно закону сохранения материи масса разложившегося озона равна массе образовавшегося кислорода. Озонограмма разложения части озона в кислород, при отсутствии других его потерь (в том числе на химические реакции), изображена на рис. 4, б. Величина потерь озона из-за разложения пропорциональна площади $S_{O_2 разл}$.

$$S_{O_2 разл} = \int_0^t (C_{O_2 ВЫХ}^* - 1) dt, \quad (9)$$

где $C_{O_2 ВЫХ}^* = C_{O_2 ВЫХ} / C_{O_2 ВХ}$ — относительное значение концентрации кислорода на выходе из приборного отсека по сравнению с концентрацией на его входе; $C_{O_2 ВЫХ}$ — концентрация кислорода на выходе из ПО, мг/м³; $C_{O_2 ВХ}$ — концентрация кислорода на входе в ПО, мг/м³.

Вследствие распада озона масса кислорода на выходе из ПО будет больше, чем на выходе из ГО. Найдем разность концентраций

$$\Delta m_{O_2} = QC_{O_2 ВХ} S_{O_2 разл} \quad (10)$$

Так как $m_{O_3 разл} = \Delta m_{O_2}$, то

$$m_{O_3 xp} = Q(C_{O_3 ВХ} S_{O_3 xp} - C_{O_2 ВХ} S_{O_2 разл}) \quad (11)$$

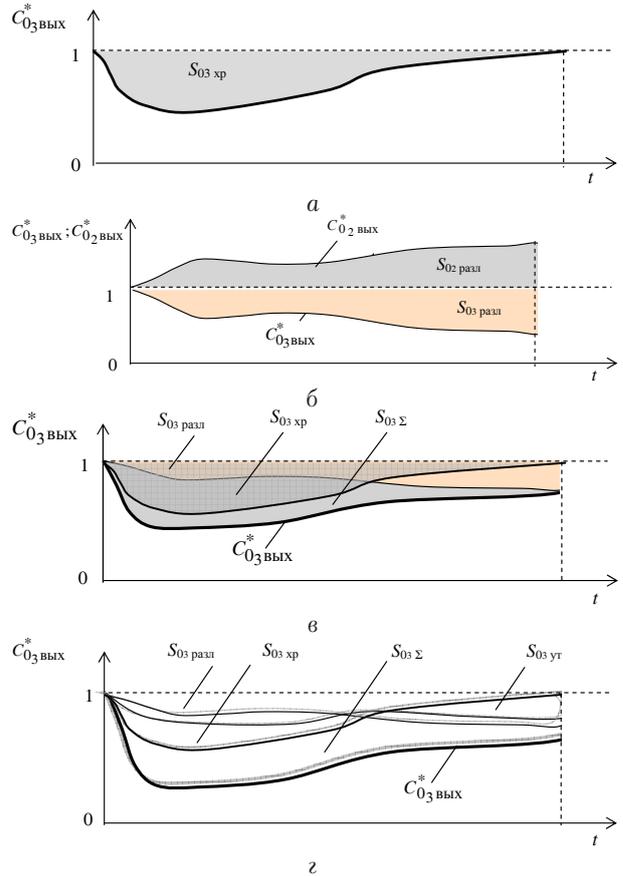


Рис. 4. Озонограммы процесса озонирования приборного отсека АМО: а — при отсутствии распада озона; б — при распаде озона и при отсутствии других его потерь и кислородограмма — зависимость соотношения концентраций кислорода на входе и выходе ПО; в — учитывающая разложение озона; г — учитывающая потери озона из-за его разложения и утечки

В формуле (9) $C_{O_3 ВЫХ}$ и $C_{O_3 ВХ}$, а также соответственно $C_{O_2 ВЫХ}$ и $C_{O_2 ВХ}$ измеряются газоанализаторами (датчиками) концентрации озона и кислорода. Озонограмма, учитывающая распад озона, изображена на рис. 4, в.

Площади участков на графике рис. 4, в, ограниченные различными озонограммами, соответствуют различным составляющим уравнения баланса массы синтезируемого озона. Масса $m_{O_3 разл}$ разложившегося озона пропорциональна площади $S_{O_3 разл}$ озонограммы, масса $m_{O_3 ад}$ или $m_{O_3 xp}$ озона, затра-

чиваемая на основное — полезное его применение, пропорциональна площади $S_{03\text{хр}}$ озонотрапы, а общая суммарная масса израсходованного озона пропорциональна площади $S_{03\Sigma}$.

Рассмотрим задачу определения массы озона $m_{03\text{ут}}$, теряемой из-за утечки вследствие негерметичности приборного отсека. Она может быть определена с помощью замеров концентраций озона и кислорода, аналогично описанному выше, но при отсутствии обрабатываемого материала в приборном отсеке. В этом случае изменение концентрации озона на выходе ПО будет происходить из-за утечки озона и его распада. При этом считаем, что утечка происходит за счет диффузии пропорциональной разности парциальных давлений озона в ПО и снаружи. Кроме того, считаем, что утечка происходит без изменения параметров расхода ОВС — Q . В этом случае масса озона, теряемая из-за утечки, может быть рассчитана по следующей формуле:

$$m_{03\text{ут}} = Q(C_{03\text{вх}} S_{03\text{ут}} - C_{02\text{вх}} S_{02\text{разл}}). \quad (12)$$

Озонотрапа, учитывающая все вышеопределенные составляющие уравнения баланса масс, приведена на рис. 4, г.

Необходимые расчеты осуществляются с помощью бортового компьютера на основании информации, получаемой с измерительных приборов.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что процесс газофазного озонирования с учетом возмущающих воздействий может быть представлен в виде структурной схемы. Это облегчает использование методов теории автоматического управления для анализа и синтеза САУ озонированием.

2. Разработан метод определения составляющих расхода озона при газофазном озонировании, основанный на снятии озонотрапы и кислородотрапы процесса. Метод позволяет повысить точность определения массы озона, вступившего в химическую реакцию с обрабатываемым материалом, за счет учета массы озона, теряемой вследствие его утечки

и разложения. Повышение точности обусловлено тем, что метод позволяет определять составляющие расхода озона, которые раньше не могли быть определены в ходе процесса озонирования. Точность определения составляющих расхода озона и, соответственно, метода определяется точностью измерительных приборов.

Повышение точности определения параметров озонирования позволяет снизить затраты энергоресурсов, повысить быстродействие и качество обработки озонотрапы приборного отсека АМО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пугин, А. М.** Моделирование процесса озонирования экотоксичных газов / А. М. Пугин // Башкирский химический журнал / АН РБ. 1994. Т. 1, Вып. 3. С. 37–43.
2. **Пугин, А. М.** Многоконтурные системы управления микроклиматическими и технологическими процессами с применением озонирования / А. М. Пугин. Деп. в ВИНТИ. 13.05.98 № 1446-В98. Уфа: УГАТУ, 1998. 160 с.
3. **Пугин, А. М.** Анализ динамики работ в области разработки технологий и оборудования озонирования / А. М. Пугин // Электрификация сельского хозяйства: межвуз. науч. сб. 2000. № 2. Уфа: БГАУ, 2000. С. 44–50.
4. **Розенберг, М. М.** Учет побочной реакции при определении ненасыщенности непредельных соединений озонированием в барботажном слое / М. М. Розенберг // Башкирский химический журнал / АН РБ. 1994. Т. 1, Вып. 3. С. 34–36.

ОБ АВТОРЕ



Пугин Андрей Михайлович, доц. каф. техн. кибернетики. Дипл. инж.-электромеханик (УАИ, 1975). Канд. техн. наук по элементам и устройствам систем управления (УАИ, 1983). Иссл. в обл. систем управления микроклиматом и жизнеобеспечением автономных объектов.