РАСЧЕТЫ ОЗОНИРОВАНИЯ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ РАСТЕНИЙ

Александр Алексеевич Симонов
Кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией,
Научно-технический центр с КБ и ОП

Мухамаджон Парпиевич Парпиев
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Стандартизация и сертификация сельскохозяйственной продукции» Ташкентский государственный аграрный университет

Абдулазиз Муминович Назаров
Доктор технических наук, профессор кафедры «Радиоприёмные устройства и системы» Ташкентский государственный технический университет

Алексей Иванович Камардин
Кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией,
Научно-технический центр с КБ и ОП

АННОТАЦИЯ

Проведены оценки концентрации озона в воде и растворах, используемых для полива сельскохозяйственных растений и обеззараживания различных объектов. Показана целесообразность использования пузырьков озоносодержащего газа диаметром менее 100 мкм и оптимальных соотношений обрабатываемого объема и производительности озонатора.

Ключевые слова: Концентрация, озон, обеззараживание, пузырьки, диффузия, массопередача, растворение, ламинарный режим

CALCULATIONS OF OZONIZATION OF WATER SOLUTIONS FOR DISINFECTION OF PLANTS

ABSTRACT

Estimates of ozone concentration in water and solutions used for irrigation of agricultural plants and disinfection of various objects have been carried out. The expediency of using bubbles of ozone-containing gas with a diameter of less than 100 microns and optimal ratios of the processed volume and productivity of the ozonizer is shown.

Keywords: Concentration, ozone, disinfection, bubbles, diffusion, mass transfer, dissolution, laminar mode.

ВВЕДЕНИЕ

Процессы, в основе которых лежит контакт между газом и жидкостью, широко распространены в различных областях науки и техники, в том числе химической промышленности и медицине. Перспективным процессом является полив растений озонированной водой и обеззараживание растворов. Растворение газов в воде зависит от многих физико-технологических факторов [1]. Процесс растворения озона является предметом многочисленных исследований. Наиболее полные обзоры представлены в [2,3]. Определение растворимости озона усложняется его нестойкостью и спонтанным разложением в жидкостях.

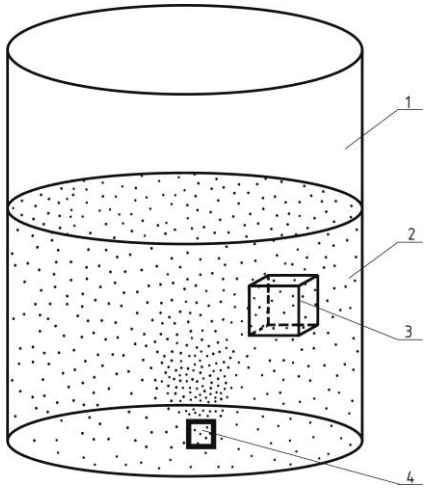
ЛИТЕРАТУРЫ И МЕТОДОЛОГИЯ

Растворимость газа, в том числе озона, пропорциональна его парциальному давлению P_a в газовой смеси:

$$(C_a)=K_r(P_a) \qquad (1)$$

Для растворения озоносодержащего газа в воде и водных растворах необходим контактный аппарат, в котором происходит взаимодействие газа с раствором. На рис. 1 представлена модель контактной емкости для озонирования с барботированием пузырьков озоносодержащего газа.

При наличии в воде совокупности пузырьков объем газожидкостной смеси может быть определен как сумма объемов жидкой и газовой фазы V_h+V_a. Таким образом, объемное газосодержание ε при барботировании определяется (1-рисунок) формулой:



1-емкость, 2-водный раствор, 3-единичный объем, 4-барботер.

Рисунок 1- Модель озонирования водных растворов

$$\varepsilon = V_a/(V_h+V_a) \qquad (2)$$

Для примера можно рассмотреть характерную обработку воды в контактном аппарате потоком газовых пузырьков с их удельным газосодержанием ε=0,01 (1%). Такой процесс реализуется при обработке емкости 20-30 литров потоком газа с расходом порядка 0,25 л/с. Следует отметить, что существуют процессы с характерным объемным газосодержанием до 0,3 и даже более (например, в производстве дрожжей).

В рассматриваемом примере (при ε=0,01) в единичном объеме воды (1 л) оказывается V_a=10 см^3 газа в виде пузырьков. Предполагая, что все пузырьки имеют одинаковый диаметр D_b и равномерно распределены по объему, можно рассчитать площади контактирования газа с водой S, количество пузырьков N и другие параметры в зависимости от диаметров пузырьков (таблица 1). В других случаях эти значения будут пропорциональны ε.

Таблица 1- Расчетные параметры контактирования пузырьков с водой для ε=0,01

Диаметр пузырька D_b, мм	0,2	0,5	1,0	2,0
Количество пузырьков N, шт	2388573	152866	19108	2388
Площадь поверхности S, см^2	1500,0	600,0	300,0	150,0
Отношение S/V_a, см$^{-1}$	15,00	6,00	3,00	1,50

При одинаковом суммарном объеме газа в единице объема воды суммарная площадь поверхности сферических пузырьков S_N растет с увеличением количества пузырьков N согласно зависимости типа:

$$S_N=S_1N^{1/3} \qquad (3)$$

Величина удельной поверхности контакта фаз газ- жидкость в единице объема жидкости, то есть отношение площади пузырьков к их объему описывается соотношением: $\frac{6\varepsilon}{D_b}$.

В обобщенном виде скорость растворения озона и других газов в воде и растворах может быть представлена в виде формулы:

$$G_{oz} = \frac{dm}{dt} = K_h S(C_s - C_t) \qquad (4)$$

где G_{oz}, dm/dt - скорость растворения озона, кг/с, K_h - коэффициент массопередачи озона из газовой фазы в жидкость, м/с, S - общая площадь контакта газовой фазы с раствором, $м^2$, C_s - равновесная концентрация озона в растворе, $кг/м^3$, C_t - концентрация растворяемого озона в растворе, $кг/м^3$.

Интенсивность процесса растворения (массопереноса) озона в растворах при прочих равных условиях может быть повышена за счет роста каждого из членов приведенного уравнения. Разница между равновесной и текущей концентрацией озона, обеспечивает максимальную скорость массопереноса. Увеличение площади поверхности контакта газовой и жидкой фаз достигается за счет мелкого дробления пузырьков и предотвращения объединения мелких пузырьков в крупные.

Коэффициент массопередачи озона из газовой фазы в жидкость зависит помимо физических свойств самого раствора от гидродинамической обстановки, создаваемой у границы раздела фаз. С учетом удельной поверхности контакта фаз можно представить уравнение (4) в следующем виде:

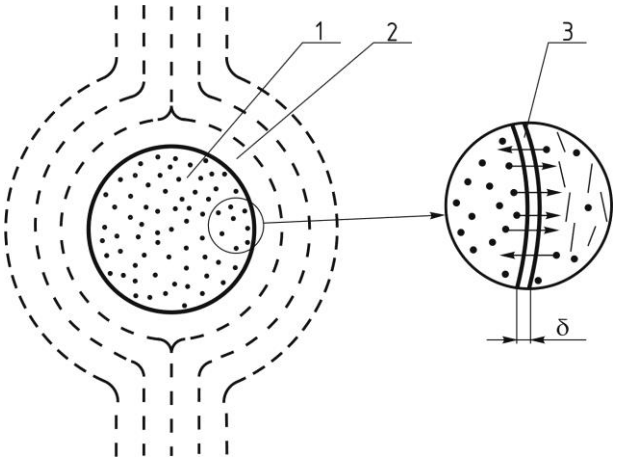
$$\frac{dC_t}{dt} = \frac{6K_h\varepsilon(C_S - C_t)}{D_b} \qquad (5)$$

Механическое перемешивание раствора увеличивает турбулентность движения и удлиняет время нахождения в ней пузырьков озоносодержащего газа. Средняя скорость движения газа через аэрируемый раствор может отличаться от скорости движения пузырьков в спокойной жидкости. Наиболее интенсивный массообмен между раствором и пузырьками газа, по-видимому, происходит в момент их образования (ввода) в зоне диспергирования и перемешивания.

В основе массопередачи газов при аэрации лежит диффузия молекул из газовой фазы в жидкостную. Начало систематического изучения диффузии было положено в трудами Фика. В соответствии с «пленочной» теорией Льюиса и Уитмена величину пленочного коэффициента массопередачи рекомендуется определять как отношение коэффициента псевдостационарной молекулярной диффузии D ($м^2/с$) к толщине жидкостной пленки δ (м)

В соответствии с теорией «проницания» (пенетрации), разработанной Хигби, перенос газа из пузырька в жидкость происходит за счет нестационарной молекулярной диффузии через слой постоянно обновляющейся в процессе движения пузырька воздуха жидкостной пленки. Массопередача происходит путем нестационарной диффузии.

Было сделано предположение [3], что процесс обновления поверхности раздела фаз под действием образующихся на ней турбулентных вихрей должен быть связан с работой, совершаемой на границе раздела фаз и обусловлен наличием поверхностного натяжения. При ламинарном режиме всплывания сферического пузырька газа справедлива теория Льюиса-Уитмена и в качестве коэффициента массопередачи жидкой пленки принимается коэффициент псевдостационарной диффузии. На рис. 2 представлена модель переноса озона из пузырька в водный раствор.



1-пузырек озоносодержащего газа, 2-водный раствор, 3-граница раздела.
Рисунок 2- Модель переноса озона из пузырька в водный раствор

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При движении псевдотвердого пузырька газа, сопровождаемого скольжением пристеночного слоя жидкости в ламинарном и переходном режимах и во всех турбулентных режимах, справедлива теория Хигби, и в качестве коэффициента массопередачи жидкой пленки принимается коэффициент нестационарной диффузии.

Пленочный коэффициент массоотдачи определяется в рамках теории Хигби, согласно которой коэффициент массопередачи K_h связан с относительной скоростью движения пузырька w уравнением типа:

$$K_h = \left(\frac{4Dw}{\pi D_b}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

где D-коэффициент молекулярной диффузии газа в водном растворе, w-скорость движения газового пузырька, D_b-диаметр пузырька.

Скорость всплывания пузырька определяется параметрами раствора, диаметром пузырька и другими факторами. Для воды можно ориентировочно считать, что пузырьки диаметром 10-20 мкм всплывают со скоростью 1-2 мм/с, диаметром 100-200 мкм со скоростью 1-2 см/с, а диаметром 1-2 мм со скоростью 10-20 см/с. При дальнейшем росте диаметров пузырьков скорость их подъема не превышает 30-35 см/с.

Для оценки насыщения воды и водных растворов озоном при барботировании озоносодержащими газами необходимо определить основные факторы, влияющие на концентрацию озона в воде.

При использовании генератора озона любой конструкции наиболее важной характеристикой является производительность по озону m (г/ч, мг/с) и максимальная концентрация озона на выходе озонатора C (г/м^3, мг/л), которая зависит от технических параметров и особенностей конструкции генератора озона.

При подаче озона (озоносодержащего газа) с производительностью m в контактный аппарат с обрабатываемым объемом воды или раствора в предположении полного растворения озона в обрабатываемом объеме V (м^3, л) и учетом периода полураспада озона τ (минут, с) зависимость концентрации озона C(t) от времени обработки t будет определяться формулой:

$$C(t) = \frac{m\tau\left[1 - exp\left(-\frac{0{,}693t}{\tau}\right)\right]}{Vln2} \qquad (7)$$

где C(t)- концентрация озона, мг/л, m-производительность генератора озона, мг/с, V- обрабатываемый объем, л, t- время обработки, с, τ- период полураспада озона, с, ln2=0,693.С учетом характерного процесса полураспада озона в воде и воздухе при бесконечно долгой обработке объема V генератором озона с производительностью m не представляется возможным получить предельную концентрацию озона (C_∞) свыше mτ/Vln2, то есть свыше 1,44mτ/V.

К сожалению, такие расчетные характеристики не реализуются из-за ряда ограничивающих факторов. Так даже при большой производительности по озону на выходе генератора озона концентрация ограничена за счет физических принципов синтеза озона и в озоносодержащих газах для чистого озона реально не превышает нескольких процентов. На концентрацию озона заметно влияет температура, примеси в обрабатываемой среде, а также степень растворения озона в обрабатываемом растворе.

Известно [4], что растворимость озона в воде подчиняется закону Генри и зависит от температуры, что демонстрирует таблица 2. В таблице представлен

коэффициент Бунзена β, показывающий отношение растворенного объема озона к объему воды.

Таблица 2- Растворимость озона в воде [4]

Температура, ºС	Коэффициент Бунзена, β	Растворимость, г/л
0	0,526	1,130
10	0,408	0,875
20	0,321	0,688
30	0,258	0,563

Возвращаясь к формуле для пленочного коэффициента массопередачи в модели Хигби и подставляя выражение для вычисленной скорости пузырька $w=2{,}72\cdot10^5(D_b^2)$, м/с в эту формулу можно оценить значение коэффициента K_L, а именно:

$$K_L = \left(\frac{4Dw}{\pi D_b}\right)^{\frac{1}{2}} = 589\,(D \cdot D_b)^{\frac{1}{2}} \qquad (8)$$

где D- коэффициент диффузии озона в воде, $м^2/с$, D_b-диаметр пузырька, м.

Можно также провести оценку объемного коэффициента массопередачи β, что дает выражение зависимости коэффициента объемной массопередачи от коэффициента диффузии и диаметра пузырьков:

$$\beta = \frac{6K_L\varepsilon}{D_b} = 3534\varepsilon\left(\frac{D}{D_b}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (9)$$

Принимая значение коэффициента диффузии газа $D=2{,}5\cdot10^{-9}$ $м^2/с$ (коэффициент диффузии кислорода в чистой воде), можно оценить удельную скорость поглощения озоносодержащего газа в водном растворе или массы газа, который абсорбируется из пузырьков в единицу времени на единицу объема жидкости. В таблице 3 приведены некоторые результаты численных расчетов поглощения озоносодержащего газа в воде.

Таблица 3- Результаты численных расчетов параметров поглощения озоносодержащих газов в водным раствором для ε=0,01

Диаметр пузырька, D_b, мм	0,2	0,5	1,0	2,0
Скорость всплывания, w, м/с	0,011	0,068	0,272	1,09
Коэффициент K_L,	$1{,}317\cdot10^{-5}$	$2{,}082\cdot10^{-5}$	$2{,}945\cdot10^{-5}$	$4{,}165\cdot10^{-5}$
Коэффициент β,	3,953	2,499	1,767	1,252

Коэффициент объемной массопередачи β прямо пропорционален ε и содержанию (концентрации) озона в газе. Из данных, представленных в

таблице 3 видно, что с ростом диаметра пузырьков поверхностный коэффициент массопередачи возрастает, но коэффициент объемной массопередачи заметно падает, что объясняется изменением поверхности контакта фаз.

В какой-то момент наступит равновесие концентраций. То есть существует коэффициент, точнее функция $f=f(t_b)$ передачи озона из пузырька в раствор, определяющая закономерность спада концентрации озона в пузырьке. Данный коэффициент должен быть пропорционален длине траектории и времени пребывания пузырька в растворе. Возможно, после прохождения некоторой критической длины для пузырьков определенного размера f уже не изменяется.

ВЫВОД

Определяя динамику измерения концентрации озона в воде и водных необходимо учитывать факторы, связанные с принципиальным ограничением начальной концентрации озона в озоносодержащем газе, значением коэффициента объемной массопередачи β, временем взаимодействия озона с водой (раствором определенного состава), температурой процесса.

В итоге изменение концентрации озона в воде или растворе- $C_h(t)$ при прочих равных условиях и достигаемую концентрацию после обработки за время t можно оценить по следующей формуле:

$$C_h(t) = \frac{\varphi f \beta m \tau}{V ln2} \cdot \int_0^t 1 - exp\left(-\frac{0{,}693t}{\tau}\right) dt \qquad (10)$$

где φ-коэффициент, определяющий максимально возможную концентрацию озона в данных условиях (пропорционален максимальной концентрации озона на выходе озонатора), f-коэффициент, пропорциональный времени движения пузырька в растворе (функция длины траектории и скорости пузырька), β-коэффициент объемной массопередачи, определяемый по формуле (9) с учетом того, что ε для озона ε_{oz} определяется как ε умноженная на процент содержания озона в газе, m- производительность озонатора, τ- период полураспада озона в растворе, V-объем контактного аппарата, t в интеграле формулы- время обработки объема озоном.

Так если оценить по формуле (10) длительное (более часа) насыщение объема воды 100 л озоном от генератора озона с производительностью 7,0 мг/с (более 25 г/ч) при ε=0,01 и содержании озона в газовой смеси 1% пузырьками

диаметром 0,2 мм при полном растворении озона (f=1) концентрация не превысит 1,21 мг/л. Для пузырьков диаметром 1 мм эта величина составит 0,52 мг/л.

REFERENCES

1. Намиот А.Ю. Растворимость газов в воде: Справочное пособие — М.: Недра, 1991, 167 с.
2. Bin A.K. // Ozone: Sci. Eng. 2006. Vol. 28. P. 67.
3. Gardini D.,Vaitati A., Canziani R. // Ibid. 2013. Vol. 34. P. 233.
4. Лунин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н. Физическая химия озона. М.: Изд-во МГУ, 1998. - 480 с.