

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ОБУСТРОЙСТВО ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВЫХ АЭРАТОРОВ ПОТОКА

Кузнецова Ю.А., Ржепкин А.Ю.

ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет», Йошкар-Ола, Россия (424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3), e-mail: KuznetsovaYA@volgatech.net, RzhepkinAY@volgatech.net

Предложена конструкция устройства для аэрации вод, работающая под действием ветровых волн на поверхности водоема. Для оценки эффективности работы предложенного устройства в прикладной программной среде MathCAD построена и реализована расчетная модель процессов, происходящих в аэраторе. Программа позволяет определить объем растворенного воздуха в трубке устройства, изменение давления воздуха в корпусе аэратора, скорость распространения волн давления в трубке аэратора, объем вытесняемого воздуха за период работы устройства. Для выбранных параметров вычислен объем вытесняемого воздуха за произвольный период работы устройства в зависимости от частоты колебаний и влияния гидроударных процессов. На основе уравнений Стритера – Фелпса в среде MathCAD построена модель кислородного баланса при наличии загрязнения. Получена зависимость концентрации кислорода от времени для принятых условно начальных параметров. Программа позволяет выполнить расчет для конкретных значений параметров, полученных в результате натурных измерений.

Ключевые слова: экология водоемов, аэрация жидкости, кислородный баланс, диффузия кислорода в жидкость, волновой аэратор.

ECOLOGICAL CONSTRUCTION OF FACILITIES IN WATER BODIES ON THE BASIS OF WAVE FLOW AERATOR

Kuznetsova Y.A., Rzhepkin A.Y.

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia (424000, Yoshkar-Ola, Lenin Square, 3), e-mail: KuznetsovaYA@volgatech.net, RzhepkinAY@volgatech.net

Design of the water aeration device, working under wind waves on the water body surface, is suggested. To evaluate the effectiveness of the proposed device, a computable model of processes occurring in the aerator is built and implemented in MathCAD. The program allows to determine the dissolved air volume in the device tube, the air pressure change in the aerator body, the wave propagation velocity in the aerator tube, the air volume displaced during the device operation. For the selected parameters, the air volume displaced during the random period of the device operation is calculated, depending on the oscillation frequency and hydraulic impact processes. On the basis of Streeter-Phelps equations, an oxygen balance model in the presence of contamination is built in MathCAD. Dependence of oxygen concentration on time for the accepted conditionally initial parameters is obtained. The program allows to perform the calculation for specific parameter values derived from in-situ measurements.

Keywords: ecology of water bodies, liquid aeration, oxygen balance, diffusion of oxygen into liquid, wave aerator.

Одним из направлений совершенствования систем инженерно-экологического обустройства поверхностных водоемов и водотоков является создание эффективных, автономных и недорогих средств аэрации жидкости [3, 4, 6]. При попадании загрязнения в водоток начинается процесс его окисления, на что затрачивается растворенный в воде кислород. В результате концентрация кислорода в воде может значительно понизиться, что приводит к эвтрофированию водного объекта. Аэрация водоемов ускоряет окислительные процессы, тем самым способствуя их очищению.

В одномерном приближении процессы, формирующие кислородный баланс в реке при наличии органических загрязнений, описываются дифференциальными уравнениями [2]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\omega L) + \frac{\partial}{\partial l}(QL) = \frac{\partial}{\partial l}\left(\omega D_l \frac{\partial L}{\partial l}\right) - k_1 \omega L;$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\omega c) + \frac{\partial}{\partial l}(Qc) = \frac{\partial}{\partial l}\left(\omega D_l \frac{\partial c}{\partial l}\right) - k_1 \omega L + k_2 \omega (c_p - c),$$

где ω – площадь поперечного сечения русла, м²; Q – расход воды, м³/с; k_1 – коэффициент скорости биохимического окисления загрязнения, 1/с; k_2 – коэффициент скорости реэрации, 1/с; D_l – коэффициент продольной диффузии, м²/с; L – биохимическое потребление растворенного кислорода, кг/м³; c – концентрация растворенного кислорода, кг/м³; c_p – концентрация растворенного кислорода выше створа выброса загрязнения, кг/м³.

Для ряда практических задач можно предположить, что формирование качества воды не зависит от конвективного переноса и диффузии вещества, тогда процесс кислородного баланса в реке при наличии загрязнения описывается дифференциальными уравнениями Стритера – Фелпса [5]:

$$\begin{cases} \frac{dL}{dt} = -k_1 L; \\ \frac{dD}{dt} = k_1 L - k_2 D, \end{cases}$$

где D , L – дефицит и концентрация кислорода, кг/м³; k_1 – коэффициент скорости биохимического окисления загрязнения, 1/с; k_2 – коэффициент скорости реэрации, 1/с.

Величины коэффициентов k_1 и k_2 можно определить по данным натурных исследований или по эмпирическим зависимостям из уравнения Г. В. Стритера [2, 5] следует:

$$k_1 = \frac{2,3}{\tau} \lg \frac{C_0}{C_\tau}, \text{ где } C_0 \text{ – начальная концентрация загрязняющего вещества, кг/м}^3; C_\tau \text{ – концентрация того же вещества через время } \tau \text{ (сут), кг/м}^3.$$

Коэффициент скорости реэрации k_2 характеризует скорость поступления кислорода из атмосферы при постоянной температуре. Этот процесс протекает до полного насыщения воды кислородом в пределах его растворимости при данных значениях температуры и давления.

Шедшилл, Элмор, Букингем [5] предложили определять коэффициент реэрации k_2 по зависимости:

$$k_2 = 5,75 \cdot 10^{-5} V_l^{0,969} H^{-1,673},$$

где V_l – средняя скорость потока, м/с; H – средняя глубина русла, м.

Анализ процесса диффузии кислорода в жидкость

Математическая модель изменения концентрации кислорода в воде при наличии загрязнений построена на основе уравнений Стритера – Фелпса [5] и балансового подхода Дж. Форрестера и реализована в программной среде MathCAD (рис. 2).

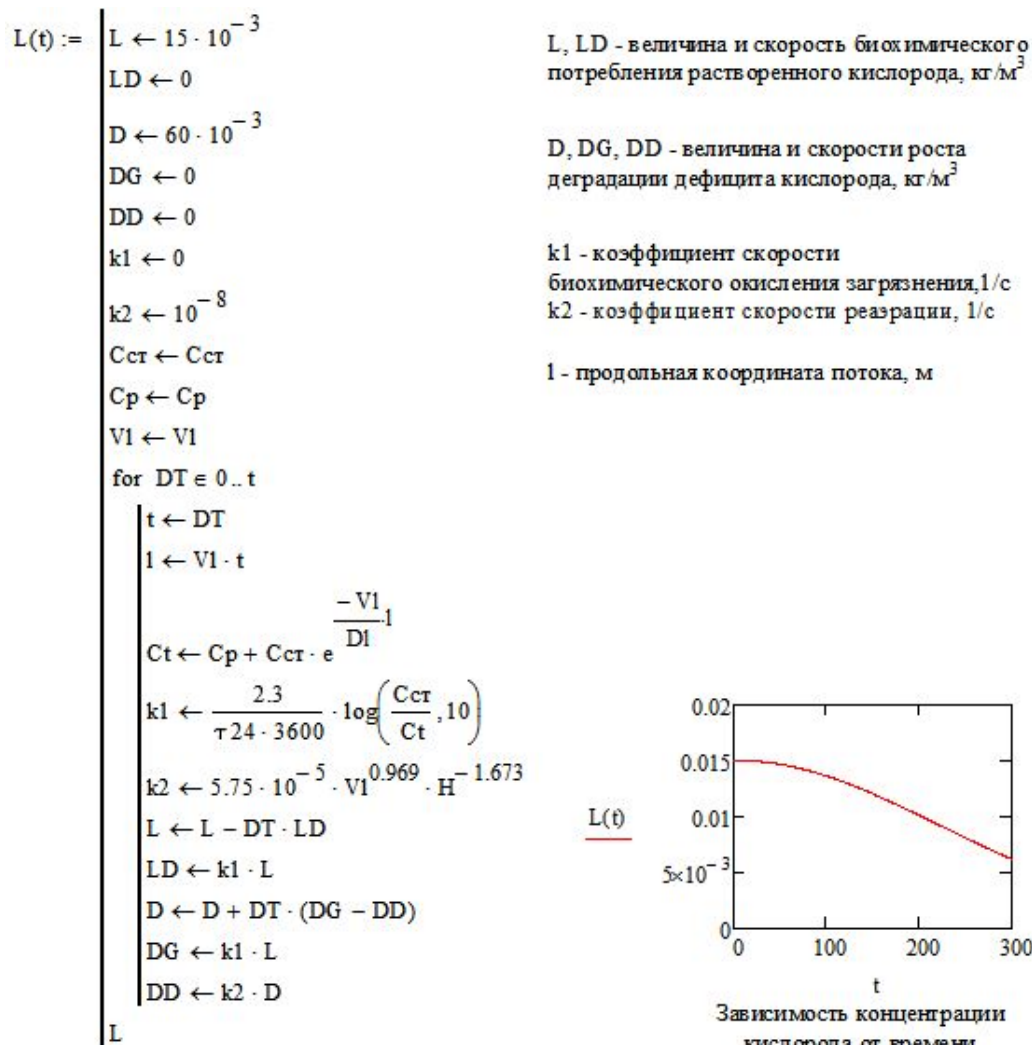


Рис. 2. Программа и результаты расчета зависимости концентрации кислорода от времени

В приведенном расчете приняты следующие значения исходных параметров:

- текущее время $t = 0 \dots 360$ с;
- период определения БПК $\tau = 5$ сут;
- продольный коэффициент турбулентной диффузии $D_1 = 1$ м²/с;
- средняя глубина потока $H = 2$ м;
- продольная скорость водного потока $V_1 = 0,5$ м/с;
- фоновая концентрация загрязнения водного объекта $C_p = 2 \cdot 10^{-3}$ кг/м³;
- концентрация загрязнения в створе выброса загрязнения $C_{ст} = 10$ кг/м³.

При необходимости расчет может быть выполнен для конкретных значений параметров, полученных в результате натурных измерений.

Конструкция устройства для аэрации вод

Предлагаемая конструкция (рис. 1) представляет собой поверхностный аэратор, работающий по принципу поршневого насоса, в качестве вытеснителя в котором выступает свободная поверхность жидкости, изменяющая свое положение за счет ветровых волн на поверхности водоема или водотока. В качестве корпуса может использоваться пластиковая бутылка, к которой присоединяется трубка для отвода и воздушный клапан для забора воздуха [1].

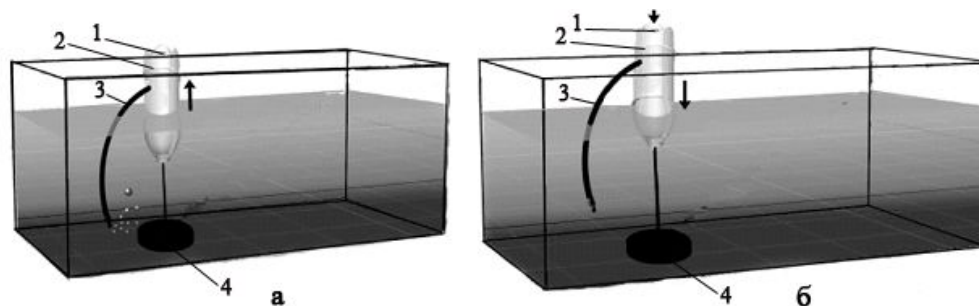


Рис. 1. Принцип работы волнового аэратора [1]:

а – фаза вытеснения воздуха из корпуса; б – фаза заполнения корпуса воздухом;

1 – клапан; 2 – корпус; 3 – трубка; 4 – груз

Работоспособность устройства была проверена в ходе лабораторных экспериментов в гидравлическом лотке лаборатории гидротехнических сооружений ФГОУ ВПО «ПГТУ». Результаты измерения концентрации кислорода при работе устройства хорошо согласуются с данными расчетов эффективности работы устройства представленными ниже.

Оценка эффективности работы предлагаемого устройства

Для расчета параметров аэраторов построена модель, использующая теорию возникновения гидроударных процессов в трубопроводе, при периодическом изменении давления в воздушной полости на одном из его концов [7].

Ниже приведена программа расчета параметров аэратора в программной среде MathCAD. Особенностью составленной в среде MathCAD программы расчета является возможность подбора материала трубки (вариант_1 – полиэтилен; вариант_2 – винипласт; вариант_3 – стеклопласт; вариант_4 – резина) с автоматическим вычислением модуля упругости, коэффициента Пуассона и плотности. Выбор материала осуществляется присвоением соответствующему материалу значения равного единице. При отсутствии варианта в качестве материала программой автоматически выбирается вариант_1 – полиэтилен.

Модуль упругости материала плавника, Па,

$$E_m := \begin{cases} 2,0 \cdot 10^9 & \text{if } _ \text{вариант } _ 1 \rangle 0 \\ 3,0 \cdot 10^9 & \text{if } _ \text{вариант } _ 2 \rangle 0 \\ 1,0 \cdot 10^{10} & \text{if } _ \text{вариант } _ 3 \rangle 0 \\ 50 \cdot 10^{11} & \text{if } _ \text{вариант } _ 4 \rangle 0 \\ 2,0 \cdot 10^9 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Коэффициент Пуассона,

$$\mu := \begin{cases} 0,5 & \text{if } _ \text{вариант } _ 1 \rangle 0 \\ 0,3 & \text{if } _ \text{вариант } _ 2 \rangle 0 \\ 0,3 & \text{if } _ \text{вариант } _ 3 \rangle 0 \\ 0,3 & \text{if } _ \text{вариант } _ 4 \rangle 0 \\ 0,5 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Плотность материала, кг/м³,

$$\rho_m := \begin{cases} 1050 & \text{if } _ \text{вариант } _ 1 \rangle 0 \\ 1350 & \text{if } _ \text{вариант } _ 2 \rangle 0 \\ 1500 & \text{if } _ \text{вариант } _ 3 \rangle 0 \\ 1120 & \text{if } _ \text{вариант } _ 4 \rangle 0 \\ 1050 & \text{otherwise} \end{cases}$$

В расчетах в среде MathCAD приняты следующие исходные данные:

- ускорение свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;
- диаметр трубки $d = 0,05 \text{ м}$;
- толщина стенок трубки $\delta = 0,0003 \text{ м}$;
- длина трубки $L = 0,5 \text{ м}$;
- площадь сечения трубки $F = \pi d^2 / 4 = 1,963 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$;
- изменение объема бутылки при волновых колебаниях $W_\sigma = 1,0189 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$;
- коэффициент растворимости воздуха при нормальных условиях $k_p = 0,016$;
- плотность воды при температуре 20°C $\rho_{\text{вод}} = 999,97 \text{ кг/м}^3$;
- плотность воздуха при температуре 20°C $\rho_{\text{возд}} = 1,4128 \text{ кг/м}^3$;
- скорость звука в воздухе $c_{\text{возд}} = 300 \text{ м/с}$;
- давление насыщающих паров при температуре 20 град $p_{\text{ин}} = 2,33 \cdot 10^3 \text{ Па}$;
- модуль упругости жидкости $E_{\text{жс}} = 2,03 \cdot 10^9 \text{ Па}$;
- частота колебаний бутылки $\nu_\sigma = 0,188 \text{ 1/с}$;

- период работы аэратора $T_a = 60$ мин.

Далее приводятся результаты расчета, полученные для волнового аэратора с полиэтиленовой трубкой (вариант_1).

Скорость водо-воздушной смеси в трубке $v = \frac{W\delta}{F} = 0,052$ м/с.

Объем воды в трубке $W_{\text{ВОД}} = F \cdot L = 9,817 \cdot 10^{-4}$ м³.

Объем растворенного воздуха в трубке $W_{\text{ВОЗД}} = k\rho \cdot W_{\text{ВОД}} = 1,571 \cdot 10^{-5}$ м³.

Плотность водо-воздушной смеси $\rho_{\text{СМ}} = \frac{\rho_{\text{ВОЗД}} \cdot W_{\text{ВОЗД}} + \rho_{\text{ВОД}} \cdot W_{\text{ВОД}}}{W_{\text{ВОЗД}} + W_{\text{ВОД}}} = 984,245$ кг/м³.

Напор насыщающих паров при температуре 20°C $H_{\text{НП}} = \frac{P_{\text{НП}}}{g \cdot \rho_{\text{ВОЗД}}} = 168,115$ м.

Изменение давления воздуха в бутылки при изотермическом законе

$$P_{\text{ВОЗД}} = \rho_{\text{ВОЗД}} \cdot c_{\text{ВОЗД}}^2 = 1,272 \cdot 10^5 \text{ м.}$$

Изменение напора воздуха в бутылки при изотермическом законе

$$H_{\text{ВОЗД}} = \frac{P_{\text{ВОЗД}}}{\rho_{\text{ВОЗД}} \cdot g} = 9,174 \cdot 10^3 \text{ м.}$$

Напор в трубке с учетом противодействия водяных паров $H\delta = H_{\text{ВОЗД}} + H_{\text{НП}}$, м.

Модуль упругости смеси $E_{\text{СМ}} = E_{\text{Ж}} \cdot \frac{\rho_{\text{СМ}}}{\rho_{\text{ВОД}}}$, Па.

Скорость распространения по трубке волн изменения давления

$$a = \sqrt{\frac{E_{\text{СМ}}}{\rho_{\text{М}}}} \cdot \left[1 + (1 - \mu^2) \cdot \frac{d}{\delta} \cdot \frac{E_{\text{СМ}}}{E_{\text{М}}} \right] = 1,736 \cdot 10^5 \text{ м/с}$$

Отношение модуля упругости смеси к модулю упругости материала трубки

$$\frac{E_{\text{СМ}}}{E_{\text{М}}} = 0,999$$

$$a_0 = \frac{a}{\sqrt{1 + \frac{E_{\text{СМ}}}{E_{\text{М}}} \cdot \frac{d}{\delta}}} = 1,342 \cdot 10^4$$

Скорость ударной волны в трубке, м/с.

Повышение напора в первой фазе колебания бутылки (прямой гидравлический удар)

$$\Delta H_{\text{1np}} = \frac{a}{g} \cdot v = 918,544 \text{ м.}$$

$$\rho_y = \frac{a \cdot v}{2 \cdot g \cdot H_6} = 0,049$$

Ударный параметр трубки

$$\text{Через время } t = l/a \text{ после уменьшения объема воздуха в трубке } t_1 = \frac{L}{a} = 2,879 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

возникает волна понижения напора $\Delta H_1''$, определяемая с учетом потерь напора в трубке,

$$\Delta H_{1n} = \Delta H_{1np} \cdot \left(1 - \frac{\Delta H_{1np}}{8 \cdot H_6 \cdot \rho_y^2} \right) = -3,753 \cdot 10^3 \text{ м.}$$

Распространение этой волны вызовет образование в трубке скорости движения воды в

$$\text{обратном направлении } v_{OBR} = \frac{g}{a} \cdot \Delta H_{1n} = -0,212 \text{ м/с.}$$

$$\text{Падение напора } \Delta H_n = \frac{a}{g} \cdot v_{OBR} = -3,753 \cdot 10^3 \text{ м.}$$

Волна понижения давления $\Delta H_1''$ больше исходного напора в трубке $\Delta H_1'' > H_6$, поэтому в трубке произойдет разрыв потока и установится напор

$$\Delta H_{ПРЕД} = H_6 \cdot H_{НИ} = 9,511 \cdot 10^3 \text{ м.}$$

Число выбросов воздуха за период работы аэратора

$$n_6 = 60 \cdot T_a \cdot \frac{1}{v_6}$$

Объем вытесняемого воздуха за период работы аэратора

$$Q_{ВОЗД} = \frac{0,707}{2} \cdot W_{ВОЗД} \cdot n_6 = 0,106 \text{ м}^3.$$

Выводы

1. Для оценки потребности в кислороде и вычисления количества аэраторов заданной производительности построена математическая модель кислородного баланса при наличии загрязнения на основе уравнений Стритера – Фелпса. Реализация модели в среде MathCAD позволяет оценить величину и скорость биохимического потребления растворенного кислорода в зависимости от времени действия загрязнения.

2. Разработана конструкция устройства для аэрации вод на основе утилизации полиэтиленовых бутылей, включающая корпус, трубку для подачи воздуха, воздушный клапан, удерживающий груз, работающая под действием ветровых волн на поверхности водоема.

3. Построена и реализована в среде MathCAD модель процессов, происходящих в аэраторе, включающая выбор параметров материала трубки, ее геометрических характеристик и режима работы бутылки при волновых воздействиях. Вычислены объем растворенного

воздуха, изменение давления воздуха в бутылки при изотермическом процессе, давление в газоотводной трубке с учетом противодействия насыщенных водяных паров, скорость распространения волн давления и скорость ударной волны.

4. Для оценки эффективности работы предлагаемого устройства вычислен объем вытесняемого воздуха за произвольный период работы аэратора в зависимости от частоты колебаний и влияния гидроударных процессов.

Список литературы

1. Габтрахманов И.Н. Проект волнового аэратора водоемов и водотоков / И.Н. Габтрахманов, научный руководитель – Ю.А. Кузнецова // «Научному прогрессу – творчество молодых», международная молодежная научная конференция по естественнонаучным и техническим дисциплинам (2012; Йошкар-Ола). 20–21 апр. 2012 г. [Текст]: [материалы и доклады]: в 3 ч. / редкол.: В.А. Иванов [и др.]. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2012. – С. 207-208.
2. Караушев А.В. Практические рекомендации по расчету разбавления сточных вод в реках, озерах, водохранилищах / А.В. Караушев, А.Я. Шварцман, М.А. Бесценная. – Л.: ГГИ, 1973. – 101 с.
3. Овсянников В.Г. Поверхностные механические аэраторы для биохимической очистки сточных вод / В.Г. Овсянников // Тр. ВНИИ ВОДГЕО. – 1970. – Вып 23. – С. 57-58.
4. Попкович Г.С. Системы аэрации сточных вод / Г.С. Попкович, Б.Н. Репин. – М.: Стройиздат, 1968. – 136 с.
5. Родзиллер, И.Д. Научные и инженерные основы прогнозирования качества воды водоемов и их защита от загрязнения сточными водами / И.Д. Родзиллер. – М.: Наука, 1976. – 247 с.
6. Рябов А.К. Искусственная аэрация природных вод / А.К. Рябов, Л.А. Сиренко. – Киев: Наукова думка, 1982. – 202 с.
7. Усаковский В.М. Инерционные насосы / В.М. Усаковский. – М.: Машиностроение, 1973. – 200 с.

Рецензенты:

Полянин И.А., д.т.н., профессор, зав. кафедрой транспортно-технологических машин, ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет», г. Йошкар-Ола.

Царев Е.М., д.т.н., профессор, профессор кафедры технологии и оборудования лесопромышленных производств ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет», г. Йошкар-Ола.