

Г. В. ОРЕХОВ**ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЙ СПОСОБ АЭРАЦИИ ОТКРЫТЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ****HYDROMECHANICAL METHOD OF AERATION OF OPEN WATER BODIES UNDER CONDITIONS OF URBAN DEVELOPMENT**

Открытые водные объекты на территориях с плотной городской застройкой испытывают повышенное антропогенное воздействие и в связи с этим нуждаются в восстановительных работах, реконструкции и поддержании нормативного санитарного состояния воды. Многие из них являются замкнутыми, не имеющими проточности. В статье рассматриваются технические подходы для поддержания кислородного режима водных массивов городских водоёмов, являющегося важнейшим показателем, определяющим нормализацию биологических процессов, происходящих в водной среде. В настоящее время единственным способом поддержания необходимых гидробиологических характеристик водоёмов на урбанизированных территориях является создание специальных гидротехнических систем искусственной струйной аэрации водных массивов и циркуляционных течений в таких объектах.

Ключевые слова: городские водные объекты, контр-вихревые течения, гидравлические расчёты, математические модели течений

Многочисленные природные открытые водные объекты являются сложными многоуровневыми экосистемами [1–3]. Это прямым образом относится и к городским водным объектам, которые являются неотъемлемыми элементами геосистемных образований, то есть ландшафтов. Однако водные объекты, расположенные на территориях, с плотной городской застройкой, испытывают дополнительные, по отношению к природным, воздействия негативного характера. Наблюдаемый сейчас интенсивный процесс урбанизации территорий создаёт сложную совокупность взаимосвязанных между собой проблем городской среды. Это в первую очередь загрязнение среды обитания: воздуха, почвы, воды. При этом на первое место можно поставить городские водные объекты, которые страдают от загрязнения в большей степени [4]. Реки, озёра, пруды на городских территориях постоянно испытывают воздействие процессов урбанизации как фактора техногенеза. Перечисленные водные объекты по существу превращаются в приёмники

Open water bodies in areas with dense urban development experience an increased anthropogenic impact and, therefore, need restoration work, reconstruction and maintenance of the normative sanitary state of water. Many of them are closed, without flow. The article discusses technical approaches for maintaining the oxygen regime of urban water bodies, which is the most important indicator that determines the normalization of biological processes occurring in the aquatic environment. At present the only way to maintain the necessary hydrobiological characteristics of water bodies in urbanized areas is to create special hydraulic systems for artificial jet aeration of water bodies and circulation currents in such objects.

Keywords: urban water bodies, counter-eddy currents, hydraulic calculations, mathematical models of flows

загрязняющих веществ, поступающих со сточными и поверхностными водами [5–7].

Можно утверждать, что состояние подавляющего большинства водоёмов, расположенных на урбанизированных территориях, экологически неполноценны и не могут самостоятельно поддерживать естественную эволюцию, сформировавшуюся в результате длительного срока и создающую биологическое разнообразие и равновесие.

Многие городские водные объекты (число их постоянно увеличивается) находятся в таком состоянии, что одни только природоохранные меры не могут существенно изменить ситуацию к лучшему. В настоящее время ведётся большая работа по восстановлению и реконструкции городских водных объектов, часть из которых имеет историческое значение. Эта работа заключается в основном в одноразовом оздоровлении водоёма [8]. В этот комплекс работ, как правило, входят: очистка донных отложений, укрепление береговых откосов, проведение ландшафтных работ. Но через достаточно

короткий промежуток времени водоём вновь снижает свои санитарно-экологические показатели. Следовательно, возникает необходимость создания новых подходов системного характера, позволяющих при планировании работ по восстановлению водных объектов в условиях плотной городской застройки осуществлять комплексное решение экологических и инженерно-мелиоративных задач.

Устойчивое улучшение экологического состояния городских водных объектов может быть достигнуто только за счет совершенствования технологий очистки и разработки принципов и эффективных способов экологического регулирования. Одним из таких подходов является создание инженерных систем по поддержанию в водоёме растворённого кислородного баланса, который уже сам по себе является одним из главных показателей нормального санитарного состояния воды, позволяющего поддерживать на должном уровне биоразнообразие водного массива [9].

Приводятся материалы по созданию гидромеханической системы насыщения водных масс кислородом воздуха и одновременному созданию циркуляционного движения этих масс. В основу положен контрвихревой струйный аэратор, позволяющий создать условия максимального возможного насыщения кислородом воздуха струи воды, которая за счёт своей кинетической энергии формирует циркуляционное течение в водоёме [10]. Приводится алгоритм гидравлического расчёта контрвихревого аэратора, который позволяет определить его основные геометрические характеристики и параметры аэрированной струи.

Далее, зная кинетическую энергию падающей струи аэратора, необходимо определить:

- количество струйных аэраторов для установки в конкретном водоёме;
- координаты установки устройств в акватории;
- ориентацию падающих аэрированных струй по сторонам света для организации направленного движения водных масс (создания циркуляции).

Указанные выше параметры необходимо связать с батиграфической характеристикой водоёма и геометрией акватории. В результате оптимального соотношения вышеуказанных параметров должно быть найдено минимальное энергопотребление всей инженерной системы аэрации, состоящей из насосной системы, подающих трубопроводов, контрвихревых аэраторов. Важную роль в решении этой оптимизационной задачи играет математическое моделирование движения водных масс в водоёме в результате работы аэраторов, с помощью

которого при проектировании инженерной системы аэрации водоёма, определяется наилучший эксплуатационный вариант [11].

Задача разбивается на две основные части. Первая часть – способ доставки кислорода воздуха в прорабатываемый водный массив. Для контрвихревых струйных систем кислород воздуха в воду транспортируется точечно, струёй. Вторая часть – распределить растворённый в воде кислород в массиве таким образом, чтобы его концентрация (количество растворённого кислорода в единице объёма) была примерно одинаковой и соответствовала нормативным требованиям. Она решается путём массопереноса искусственно созданным течением за счёт кинетической энергии струи аэратора.

Таким образом, помимо аэраторов, которые доставляют кислород воздуха и создают течение в водоёме, необходимо бы количество аэраторов применительно к конкретному водоёму с его батиграфическими и топографическими характеристиками, координаты установки аэраторов в акватории водного объекта и вектор направления (ориентация по сторонам света) действия струй, формирующих течение. Течение в замкнутом водоёме при наличии нескольких струй будет представлять собой циркуляцию водных масс в границах водоёма.

Для решения поставленной задачи необходимо знать основные гидравлические характеристики контрвихревого аэратора, которые определяются расчётом, основанным на экспериментальных исследованиях (физическое моделирование) контрвихревых систем [12]. Инструментом, с помощью которого можно расчётным путём определить оптимальную кинематику течения воды, концентрацию растворённого кислорода, является математическое моделирование, с помощью которого, задаваясь начальными и граничными условиями, подбирается наиболее оптимальная для конкретного водоёма инженерная система струйной аэрации, обеспечивающая минимальное потребление электроэнергии из городской сети.

Принцип работы контрвихревого струйного аэратора основан на эффектах взаимодействия двух (или более) противоположно вращающихся и коаксиально расположенных закрученных потоков воды [13]. Один эффект связан с образованием полости разрыва сплошности потока с пониженным давлением (ниже атмосферного). Область разрыва сплошности потока формируется в зоне оси устройства. Другой эффект генерирует чрезвычайно высокую степень турбулентности в круглоцилиндрической камере взаимодействия двух

потоков – в камере смешения воды и воздуха. В камере происходит интенсивная аэрация водного потока. Эжектирующая способность контрвихревого аэратора прямым образом связана с величиной вакуума. Уровень турбулизации потока отвечает за степень диспергирования воздушной фазы аэрированной струи, выходящей из устройства.

Течение внутреннего и внешнего закрученных потоков воды в контрвихревом аэраторе происходит в виде двух обособленных кольцевых течений, показанных на рис. 1. Их геометрические параметры следующие: r_1 и r_2 – наружные радиусы соответственно внутреннего и внешнего закрученных потоков, $r_{я1}$ и $r_{я2}$ – радиусы паровоздушного ядра этих потоков. Кольцевые течения состоят из воды, а в приосевых зонах этих течений находятся паровоздушные массы. В концевой точке разделительного патрубку (точка А на рис. 1) внутренний и внешний противоположно закрученные потоки встречаются и начинают взаимодействовать в цилиндрической камере смешивания с радиусом $r_1 = R_{кc}$. В камере смешивания за счёт сил вязкости генерируется повышенная турбулентность, которая приводит к интенсивной аэрации водного потока мелкодисперсными пузырьками воздуха. При этом многократно ускоряется процесс растворения кислорода воздуха в воде за счёт резкого увеличения площади контакта газовой и жидкостной фаз.

Площади проточной части внутреннего и внешнего закрученных потоков, занятых водой, соответственно составляют:

$$W_1 = W'_1 \pi r_1^2 \text{ и } W_2 = W'_2 \pi r_2^2, \quad (1)(1')$$

где W' – коэффициент площади, занятой водой,

$$W'_1 = \frac{\pi(r_1^2 - r_{я1}^2)}{\pi r_1^2} = 1 - \frac{r_{я1}^2}{r_1^2} \quad \text{и} \quad (2)(2')$$

$$W'_2 = \frac{\pi(r_2^2 - r_{я2}^2)}{\pi r_2^2} = 1 - \frac{r_{я2}^2}{r_2^2}.$$

Расход одного завихрителя, формирующего внутренний и внешний закрученные потоки 1 или 2 равен

$$Q = m \pi r^2 \sqrt{2gH}. \quad (3)$$

В (3) m – коэффициент расхода, H – действующий напор, g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$. Коэффициент расхода для внутреннего закрученного потока обозначим как m_1 , а внешнего – m_2 . Коэффициент расхода всего потока на выходе из аэратора – m .

Момент количества движения каждого из двух закрученных потоков, создаваемых завихрителем, при радиусе центра тяжести выходного сечения этого завихрителя относительно продольной оси (оси симметрии) аэратора

$$M = \rho Q u_r r_i. \quad (4)$$

Здесь

$$u_r = m A \sqrt{2gH}, \quad (5)$$

где A – геометрическая характеристика завихрителя, которая, например, для тангенциального типа выражается зависимостью

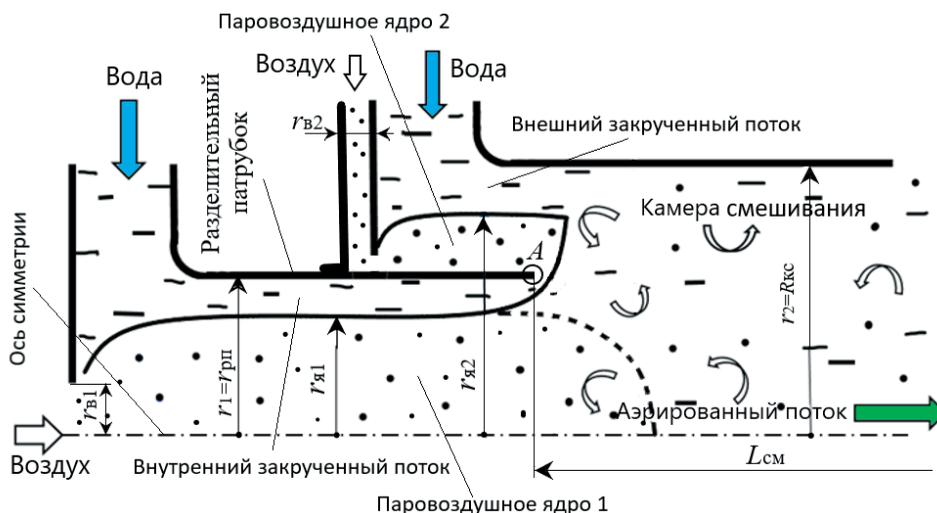


Рис. 1. Схема течения в контрвихревом аэраторе

$$A = \frac{\pi r \left(r + \frac{a}{2} \right)}{ab}. \quad (6)$$

В формуле (6) a и b – размеры входного поперечного сечения завихрителя [10].

Используя основные соотношения (1–6), выполняют расчет проточной части аэратора методом последовательных приближений с использованием графиков, построенных предварительно на основании методических расчетов.

В основу расчёта закладываются условия, связанные с различными видами течений, присутствующих на различных участках проточной части аэратора: продольно-осевое (течение Пуазеля), продольно-циркуляционное (закрученное), спутное и на выходе из камеры смешивания вновь продольно-осевое. Это следующие условия:

– соблюдение закона неразрывности для общего потока воды, формируемого внутренним и внешним закрученными потоками

$$Q = Q_1 + Q_2; \quad (7)$$

– обеспечение достаточно полного гашения энергии циркуляции воды на выходе из аэратора, которое достигается при отношении моментов количества движения (4) внутреннего и внешнего противоположно закрученных потоков воды

$$k = \frac{M_1}{M_2} = 0,8 - 1,2; \quad (8)$$

– обеспечение требуемого коэффициента эжекции в диапазоне

$$k_{эж} = \frac{Q_v}{Q} = 0,5 - 2,0, \quad (9)$$

где Q_v – объёмный расход воздуха, поступающего в аэратор.

Обозначим

$$k = \frac{r_2}{r_1}, \quad (10)$$

при этом k назначается в пределах 0,7-0,8.

Для выполнения гидравлического расчета вихревого аэратора (определения гидравлических и геометрических характеристик завихрителей и камеры смешивания) требуются следующие исходные данные:

– давление воды $P_{вх}/\rho g$ на входе в аэратор, которое создаёт насосная система. В случае истечения струи воды из аэратора не в атмосферу, а под уровень воды в прорабатываемом

водоёме, необходимо учитывать глубину погружения выходного устройства – H_s ;

– расход воды Q , проходящий через аэратор;

– средняя по сечению скорость водовоздушного потока $V_{вв}$ на выходе из камеры смешивания;

– коэффициент эжекции воздуха $k_{эж}$, определяющий требуемую среднюю плотность водовоздушного потока $\rho_{вв}$ на выходе из камеры смешивания.

В ходе гидравлического расчета определяются:

– диаметр камеры смешивания $D_{кв} = 2r_2$;

– размеры входного сечения каждого из завихрителей, a и b ;

– расход воды, пропускаемой каждым завихрителем, Q_1 и Q_2 ;

– диаметр воздушного ядра каждого из закрученных потоков, $r_{я1}$ и $r_{я2}$;

– диаметры разделительного патрубка, $r_{рп} = r_1$ и воздуховодов, $r_{в1}$ и $r_{в2}$.

Согласно [13], для решения задачи используются соотношения:

$$m_1^2 A_1 r_1^3 = k m_2^2 A_2 r_2^3; \quad (11)$$

$$m_1 = \frac{W'_1 \sqrt{W'_1}}{\sqrt{2 - W'_1}}; \quad m_2 = \frac{W'_2 \sqrt{W'_2}}{\sqrt{2 - W'_2}}; \quad (12)(12')$$

$$A_1 = \frac{1 - W'_1}{W'_1} \sqrt{\frac{2}{W'_1}}; \quad A_2 = \frac{1 - W'_2}{W'_2} \sqrt{\frac{2}{W'_2}}. \quad (13)(13')$$

Составляется замкнутая система нелинейных уравнений:

$$\frac{W'_1 \sqrt{W'_1}}{\sqrt{2 - W'_1}} + \frac{k W'_2 \sqrt{W'_2}}{\sqrt{2 - W'_2}} - m = 0; \quad (14)$$

$$\frac{W'_1 \sqrt{W'_1} (1 - W'_1)}{2 - W'_1} - \frac{k^3 W'_2 \sqrt{W'_2} (1 - W'_2)}{2 - W'_2} = 0.$$

$$K_{эж} = \frac{k^2 W'_2 \sqrt{W'_2} (2 - W'_1)}{W'_1 \sqrt{W'_1} (2 - W'_1) + k^2 W'_2 \sqrt{W'_2} (2 - W'_1)} \left(\frac{1}{W'_2} - 1 \right). \quad (15)$$

Скорость водовоздушного потока на выходе из камеры смешения будет равна:

$$V_{см} = (1 + k_{эж}) m \sqrt{2gH}. \quad (16)$$

При решении задачи определения геометрической формы и размеров аэратора имеется в виду, что при заданной комбинации параметров m , $k_{эж}$, k система (15) имеет однозначное

решение при условии, что W'_1 и W'_2 являются действительными положительными числами, меньшими единицы.

По результатам методических расчетов построены графики на рис. 2, по которым производятся графоаналитические расчеты параметров контрвихревых аэраторов.

В результате определяются значения: относительных площадей живых сечений двух закрученных потоков – W'_1 и W'_2 , коэффициентов расхода завихрителей – m_1 и m_2 , геометрических характеристик завихрителей – A_1 и A_2 , расходов воды, проходящих через каждый завихритель – Q_1 и Q_2 , а также относительных радиусов паровоздушного ядра внутри потока и на торцевой стенке завихрителя – $\bar{r}_{я1}$, $\bar{r}_{я2}$, $\bar{r}_{я ст 1}$, $\bar{r}_{я ст 2}$.

Относительный радиус ядра закрученного потока внутри потока определяется по формуле

$$\bar{r}_{яi} = \frac{r_{яi}}{R_i} = \sqrt{1 - W'_i}. \quad (17)$$

Относительный радиус паровоздушного ядра закрученного потока на торцевой стенке внутреннего завихрителя составляет

$$\bar{r}_{я ст 2} = \frac{r_{я ст 2}}{R_2} = (1 - W'_2) \sqrt{\frac{2}{2 - W'_2}}. \quad (18)$$

При этом W'_2 определяется по формуле

$$W'_2 = \left(\sqrt[3]{\frac{A_2}{2\sqrt{2}} + \sqrt{\frac{A_2^2}{8} - \frac{1}{27}}} + \sqrt[3]{\frac{A_2}{2\sqrt{2}} - \sqrt{\frac{A_2^2}{8} - \frac{1}{27}}} \right)^{-2}. \quad (19)$$

Относительный радиус воздуховода для подачи атмосферного воздуха в центр внутреннего закрученного потока должен отвечать условию

$$\frac{r_{в1}}{r_1} \leq \bar{r}_{я ст 2}. \quad (20)$$

Изложенная последовательность расчета позволяет определить основные геометрические размеры устройства и гидравлические параметры. Однако следует учесть, что в инженерных системах водооборота и аэрации городских водных объектов давление воды на входе в завихрители контрвихревых аэраторов должно приниматься примерно одинаковым и минимальным, определяемым требованиями устойчивой и эффективной работы аэраторов. По результатам многочисленных экспериментов, на входе в аэратор вполне достаточно иметь давление воды, не превышающее 8-10 м вод. ст. [10]. В дополнение к этому надо отметить, что многие городские водоёмы достаточно близки по своим батиграфическим характеристикам, и насосные системы для создания искусственной аэрации развивают примерно одинаковый напор. Аэраторы, рассчитанные на это давление, будут иметь геометрически подобную форму проточной полости, независимо от их производительности, а последняя будет определять лишь абсолютные размеры аэратора.

Принцип подобия аэраторов, аналогичный принципу подобия гидравлических турбин [14], позволяет существенно упростить процесс их проектирования, заменяя сложный гидравлический расчет подбором аэратора, геометрически подобного рассчитанному ранее на такое же входное давление.

Формула подобия аэраторов имеет вид

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{H_1}{H_2}} \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2, \quad (21)$$

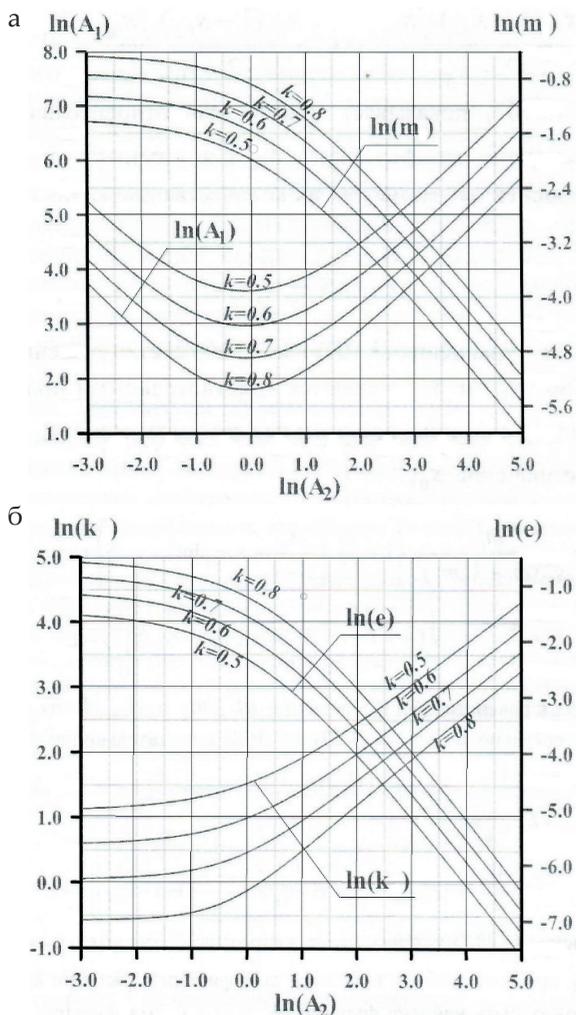


Рис. 2. Номограммы для графоаналитического определения параметров аэратора:
 а – параметры $\ln(A_1)$ и $\ln(m)$ в функции $\ln(A_2)$;
 б – параметры $\ln(k)$ и $\ln(e)$ в функции $\ln(A_2)$

где Q – производительность аэратора по воде; H – действующий напор на входе в аэратор; D – характерный размер вихревого аэратора, за который целесообразно принимать диаметр камеры смещения $D_{\text{кц}} = 2r_2$ (см. рис. 1). Индекс 1 в (21) относится к известному (ранее рассчитанному) аэратору, индекс 2 – к новому проектируемому, размеры которого отличны от известного.

Учитывая сказанное выше, можно принять без особых погрешностей в расчёте $H_1 = H_2$. Тогда (21) приобретает более простой вид:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2. \quad (22)$$

Далее приведем краткое описание математической модели для расчета движения аэрированных струй в мелководных замкнутых городских водоемах в результате работы струйных контрвихревых аэраторов. Данная модель относится к классу моделей мелкой воды, предполагающая малые значения вертикального масштаба по отношению к горизонтальному. Водные объекты, о которых идёт речь в настоящей статье, отвечают именно таким характеристикам. Городские водные объекты, пруды, небольшие озёра, водохранилища небольшого объёма, образованные подпорными сооружениями на водотоках в пределах городской застройки, имеют, как правило, глубину водного массива несколько метров при длине водоёма от сотни до нескольких сотен метров, реже километров. Кроме того, течение (циркуляция) низкоскоростного потока в мелких замкнутых (не проточных) водоёмах городской инфраструктуры можно рассматривать без учёта явления стратификации по глубине. Это означает, что толща воды в таких водоёмах полностью перемешивается за счёт низкопотенциального потока в результате конвективного переноса, искусственно созданного аэратором (или аэраторами) движения. Такой подход позволяет существенно упростить сложные решения полных уравнений Навье-Стокса и перейти к двумерным (в плане) уравнениям Сен-Венана, что вполне удовлетворяет запросам практики [15].

Запишем их в интегральной форме:

$$\int_{\Omega} \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} d\Omega + \int_{\sigma} \frac{1}{2} gh^2 \bar{n} d\sigma + \int_{\sigma} q_n \bar{v} d\sigma + = - \int_{\Omega} (a\bar{q}) d\Omega - \int_{\Omega} gh \nabla z d, \quad (23)$$

$$\int_{\Omega} \frac{dh}{dt} d\Omega + \int_{\sigma} q_n d\sigma = 0,$$

$$\frac{\bar{q}_i^{r+1} - \bar{q}_i^0}{\tau} + gh_i^r \nabla \zeta^{r+1} + a_i^r \bar{q}_i^{r+1} + \frac{\bar{K}_i^r}{\omega_i} = 0, \quad h_i^r = \frac{1}{3} (h_i^r + h_j^r + h_k^r), \quad (25)$$

$$a = 0.5\lambda |\bar{q}| h^{-2}, \quad \lambda = 2gn^2 h^{-1/3}, \quad \beta = 0.0000027. \quad (24)$$

В (23) Ω – область интегрирования в координаты x, y ; σ – граница области Ω ; \bar{n} – вектор внешней нормали к σ ; \bar{q} – вектор удельных расходов воды; q_n – проекция \bar{q} на нормаль; ζ – отметка поверхности воды; z – отметка дна; $h = \zeta - z$ – глубина; $\bar{v} = \bar{q} / h$ – вектор средней по глубине скорости потока; λ – коэффициент гидравлического трения; n – коэффициент шероховатости в формуле Маннинга; ∇ – дифференциальный оператор Гамильтона; t – время; n – коэффициент шероховатости.

Граничное условие на твердых границах (поверхность дна водоёма) – равенство нулю нормальной компоненты расхода (вода не проходит через дно за пределы водоёма, фильтрационный расход из водоёма в грунт равен нулю) $q_n = 0$. На жидких границах может быть задан либо удельный расход $\bar{q}(t)$, либо уровень $\zeta(t)$ или определена связь между расходами и уровнями воды $\bar{q}(\zeta)$. Последнее условие не используется, так как уровень воды в водоёме принимается установившимся.

Расчетная область Ω разбивается на треугольную сетку (рис. 3). В узлах сетки задаются отметки дна z и вычисляются значения ζ, h, \bar{v} . В центрах тяжести треугольников ijk вычисляется вектор \bar{q} .

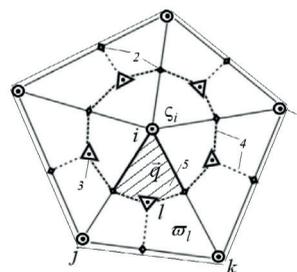


Рис. 3. Элемент расчетной области:
1 – узлы; 2 – середины сторон треугольников;
3 – центры тяжести треугольников;
4 – граница шаблона для ζ ;
5 – пересечение шаблонов для ζ и \bar{q}

Величины ζ, \bar{q}, z, h рассматриваются в виде кусочно-постоянных функций. Тогда выбирается в качестве области интегрирования произвольный треугольник с вершинами ijk и площадью ω_i . Выражения (25) представляют собой дискретный аналог (23) в виде:

где τ – шаг по времени, r – число итераций; $\nabla\zeta^{r+1}$ – определяется через ζ_l^{r+1} , ζ_j^{r+1} , ζ_k^{r+1} и координаты вершин треугольника l .

С помощью (25) удельный расход \vec{q}_l^{r+1} можно выразить в виде:

$$\vec{q}_l^{r+1} = \vec{F}_l^r - D_l^r \nabla \zeta_l^{r+1}, \quad \vec{F}_l^r = \frac{1}{1 + a_l^r \tau} \left(\vec{q}_l^r + \frac{r}{\omega_l} \vec{K}_l^r \right), \quad D_l^r = \frac{\tau g h_l^r}{1 + a_l^r \tau}. \quad (26)$$

Выбирая шаблон для ζ_r , получаем

$$\frac{\zeta_i^{r+1} - \zeta_i^0}{\tau} \Omega_i + \sum_{l=1}^{m_i} (q_n^{r+1} L)_l = 0, \quad \Omega_i = \frac{1}{3} \sum_{l=1}^{m_i} \omega_l, \quad (27)$$

где m_i – число треугольников, сходящихся в вершине i ; L – длина части границы шаблона, лежащей внутри треугольника l .

Делая преобразования, получаем:

$$\zeta_i^{r+1} = \zeta_i^0 - \frac{\tau}{\Omega_i} \sum_{l=1}^{m_i} \left[\left(F_n^r - D^r \frac{\partial \zeta^{r+1}}{\partial n} \right) L \right]_l. \quad (28)$$

Далее, записывая выражение (28) для всех узлов сетки, получаем систему линейных алгебраических уравнений для ζ_i^{r+1} . Здесь $i = 1 \dots N$, где N число узлов расчётной области. Уравнение (28) связывает значения ζ^{r+1} в узле i с соседними с ним узлами. Определив ζ_i^{r+1} во всех узлах и подставив их значения в (26), найдем согласованные с уравнением неразрывности векторы удельных расходов на всех элементах (треугольниках) сетки.

Уравнение неразрывности потока, проходящего через замкнутую расчётную область течения

$$\frac{\omega_l}{3} \frac{\partial \zeta_l^r}{\partial t} + Q_h + \tilde{Q}_h = 0, \quad (29)$$

где $Q_h = (gL)$ – расход жидкости через часть границы (длиной L) шаблона для ζ_i , лежащей внутри треугольника l ; \tilde{Q}_h – полный расход через часть границы треугольника l , образованной половинами сторон треугольника с вершинами в узле l . Сумма этих расходов представляет собой расход воды через границу четырёхугольника, заштрихованного на рис. 3.

С использованием (28) получаем:

$$\tilde{Q}_{li} = -Q_{li} + \frac{\omega_l}{3\Omega_i} \sum_{i=1}^m Q_{li}. \quad (30)$$

Согласно (30):

$$\sum_{i=1}^m \tilde{Q}_{li} = 0, \quad (31)$$

следует, что сумма расходов, втекающих в узел i , равна сумме вытекающих расходов.

Скорость воды в узле i можно определить по формуле:

$$\vec{v}_i = \frac{\left(\sum_{\tilde{Q}_{li>0}} \vec{v}_l \tilde{Q}_{li} \right)}{\left(\sum_{\tilde{Q}_{li>0}} \tilde{Q}_{li} \right)}, \quad (32)$$

где $\vec{v}_l = \vec{q}_l / h_l$ и суммирование проводится только по втекающим (положительным) расходам. Приведённые выше зависимости позволяют определить расходные и кинематические параметры в объёме всего водоёма в зависимости от координат расположения аэраторов.

Для определения осредненных по глубине водоёма значений концентраций растворённого кислорода используется уравнение конвективного переноса тепла в плане (33), допуская, что

естественная диффузия кислорода в воде очень мала по сравнению с созданным аэраторами конвективным течением:

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial U h C}{\partial x} + \frac{\partial V h C}{\partial y} = -\alpha(C - C_e), \quad (33)$$

где h – глубина; V , U – осредненные по глубине скорости течения по осям X и Y соответственно; C – осредненная по глубине объемная концентрация кислорода; C_e – имеющаяся концентрация кислорода в водоеме; α – коэффициент, который в общем случае может зависеть от времени, пространственных координат, текущей локальной концентрации C .

Начальными условиями для (33) являются: поверхность дна водоёма $Z(x, y, 0)$ и соответствующие ей мгновенные поля $V(x, y, 0)$, $h(x, y, 0)$, $C(x, y, 0)$.

Граничные условия на входе потока в водоём задаются объёмной концентрацией растворённого кислорода и зависит от параметров контрвихревого аэратора (одного или нескольких) и условий перемешивания падающей в водоём струи на начальном участке.

Уравнение (33) относительно концентрации кислорода решается методом конечных элементов на треугольных сетках и согласовано со схемой для уравнения неразрывности жидкой фазы.

Далее необходимо в численной модели и её расчётной области сформировать участки для работы аэратора и насоса. Схемы этих участков на треугольной сетке показаны на рис. 4. Фрагмент участка, где расположен аэратор, можно представить в виде восьмигранника, со сторонами jk , который моделирует начальный участок взаимодействия струи аэратора с водоёмом. Участок привязан на расчётной области водоёма координатами X_a , Y_a . В пределах восьмигранника (заштрихован на

схеме рис. 4, а) расположена грань B_a , имитирующая струйный аэратор с производительностью Q_a направлением истечения струи, ориентированной по сторонам света и глубиной водоёма h в месте установки аэратора. На границе A_a (граница на противоположной стороне восьмигранника) задаётся производительность струи аэратора с обратным знаком по отношению к Q_a . Заштрихованная область вырезает из расчетной области на треугольной сетке участок взаимодействия струи аэратора с массой жидкости в водоеме, который не моделируется в рамках рассмотренной модели.

Такая же картина наблюдается на участке установки насосного оборудования (рис. 4, б). Заштрихованный восьмиугольник содержит жидкую грань B_n , имитирующую работу насоса с подачей Q_n . Этот участок имеет координаты X_n , Y_n .

Исходными данными для расчёта являются:

- батиграфическая характеристика водоёма, устанавливающая связь площади водного зеркала и объёма от отметки уровня воды или глубины воды. Эти данные можно получить прямыми промерами по намеченным створам или с помощью ультразвуковых приборов по определению контура дна водоёма;
- начальная, природная концентрация растворённого кислорода в нескольких точках водоёма;
- количество аэраторов и расход струи каждого аэратора, координаты установки аэраторов;
- подача насоса, координаты установки заборного устройства насосного оборудования;
- концентрация растворённого кислорода в струе аэратора.

Таким образом, рассмотренная модель на основании исходных данных позволяет рассмотреть кинематическую картину движения водных масс при работе инженерной системы аэрирования,

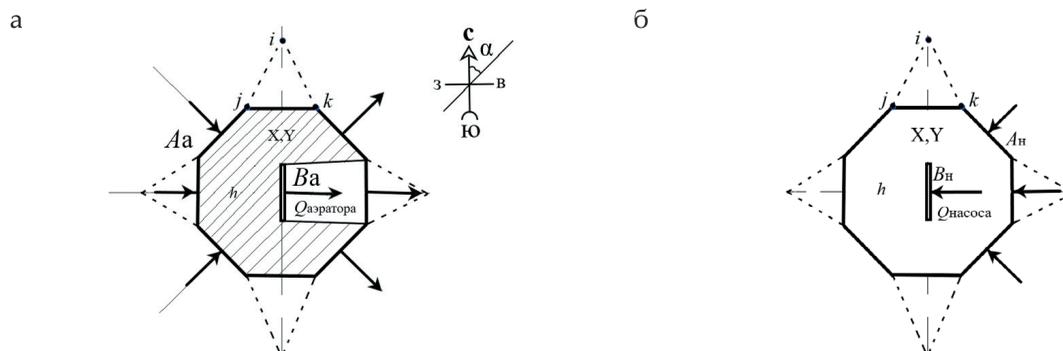


Рис. 4. Схемы участков, не входящих в область моделирования:

- а – участок установки аэратора с гранью взаимодействия струи с водным массивом; б – участок установки насосного оборудования с гранью забора воды из водоёма; A_a – граница поступления воды; B_a – граница, через которую задаётся расход аэрированной струи; B_n – граница, через которую задаётся подача насоса; A_n – граница поступления воды

включающая струйные контрвихревые аэраторы, насосное оборудование и трубопроводы, соединяющие насос с одним или несколькими установленными аэраторами. Она позволяет определить расчётные значения концентрации растворённого кислорода в воде в различных точках водного массива. Кроме этого, данная модель является мощным инструментом для решения задачи оптимизации работы системы искусственной аэрации, сводя до необходимого минимума энергозатраты на её эксплуатацию.

На рис. 5 показана схема поля линий тока с векторами скорости для замкнутого водоёма.

Использование рассмотренных расчётных схем и моделей необходимо на этапе проектирования систем искусственной аэрации городских водных объектов при создании новых водоёмов и при реставрации существующих.

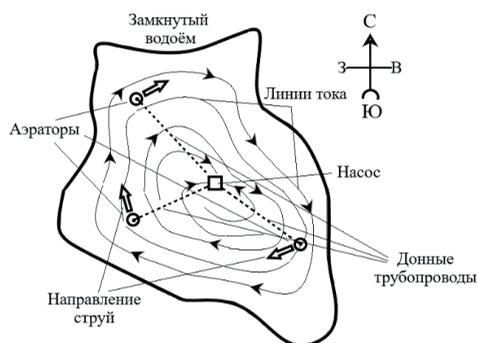


Рис. 5. Пример организации искусственных циркуляционных течений в замкнутом водоёме

Выводы

1. Открытые водоёмы на урбанизированных территориях довольно быстро деградируют из-за сильного антропогенного воздействия в результате хозяйственной деятельности человека.

2. Единственным способом поддержания качества воды в таких водоёмах является принудительное транспортирование кислорода воздуха в водные массы, что возможно реализовать с помощью инженерных систем струйной аэрации и искусственной циркуляции.

3. В качестве струйных аэраторов могут быть использованы различные системы. Наиболее эффективным для решения поставленных задач является контрвихревой струйный аэратор, который в результате эффектов такого течения позволяет эффективно захватывать и транспортировать растворённый в водных массах кислород воздуха в водоём. Аэрированная струя, выходящая из аэратора, дополнительно насыщается кислородом при её вхо-

де в водный массив водоёма. Падающая струя передаёт свою кинетическую энергию водным массам, приводя их в движение, создавая направленные циркуляционные движения.

4. С помощью модели мелкой воды на этапе проектирования или реконструкции инженерных систем аэрации водного объекта достигается оптимальное расположение аэрационных установок в акватории и создаётся требуемая кинематика потока.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Викулина В. Б. Мониторинг состояния водных объектов. М.: Изд-во Московский государственный строительный университет, 2010. 130 с.
2. Соболев С. В., Февралёв А. В., Грачёва О. А. Рекреационное использование малых водохранилищ. Н. Новгород: ННГАСУ, 2010. 247 с.
3. Волшаник В.В., Суздалева А.А. Классификация городских водных объектов. М.: АСВ, 2008. 112 с.
4. Орехов Г. В., Мамин П. Г., Евдокимов П. В. Водохозяйственные и экологические проблемы освоения территории Новой Москвы // Интернет-журнал Науковедение. 2015. Вып. №2. 158TVN2155.
5. Hou L., Zhang L., Li F., Huang S., Yang J., Ma C., Z. C.-P. Yu A. Hu. Urban ponds as hotspots of antibiotic resistance in the urban environment. J. of Hazardous Materials. V. 403, 2021. 124008.
6. Berglund B., Fick J., Lindgren P.E. Urban wastewater effluent increases antibiotic resistance gene concentrations in a receiving northern European river. Environ. Toxicol. 2015. Chem. 34, pp.192-196. <https://doi.org/10.1002/etc.2784>
7. Cacace D., Fatta-Kassinos D., Manaia C.M., Cytryn E., Kreuzinger N., Rizzo L., Karaolia P., Schwartz T., Alexander J., Merlin C., 2019. Antibiotic resistance genes in treated wastewater and in the receiving water bodies: a pan-European survey of urban settings. Water Res. 2019. pp. 320-330. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.06.039>.
8. Мамин П. Г., Орехов Г.В., Байрашева А.А. Урбанизация и экологическая безопасность территории новой Москвы. М.: АСВ, 2015, 112 с.
9. Амирова Н.Н., Боровков В.С., Волшаник В.В., Доркина И.В. Состав и объёмы работ по восстановлению малых рек и водоёмов на селитебных территориях // Материалы Десятой Всероссийской научной конференции «Экологические проблемы развития музеев-заповедников». М.: Институт наследия, 2008. С. 395-403.
10. Ахметов В. К., Волшаник В. В., Зуйков А. Л., Орехов Г. В. Физическое моделирование контрвихревых сооружений и оборудования / под ред. Г. В. Орехова. М.: НИУ МГСУ, 2017. 399 с.
11. Орехов Г. В., Баяраа У. Беликов В. В. Методы увеличения эффективности аэрации открытых водных объектов на урбанизированных территориях // Вестник МГСУ. 2009. №2. С.278-291.
12. Орехов Г. В. Струйная контрвихревая аэрация в инженерных системах городских водных

объектов // Вестник Евразийской науки. 2019. Т. 11. № 76SAVN319.

13. Ахметов В. К., Волишаник В. В., Зуйков А. Л., Орехов Г. В. Моделирование и расчёт контрвихревых течений / под ред. А. Л. Зуйкова. М.: МГСУ, 2012. 252 с.

14. Волишаник В. В., Орехов Г. В. Низконапорные гидравлические двигатели / МГСУ. М.: АСВ, 2009. 392 с.

15. Беликов В. В., Алексюк А. И. Модели мелкой воды в задачах речной гидродинамики. М.: Российская академия наук, 2020. 346 с.

REFERENCES

1. Vikulina V.B. *Monitoring sostoyaniya vodnykh ob`ektov* [Monitoring of the state of water bodies]. Moscow, MGSU Publ., 2010. 130 p.

2. Sobol S.V., Fevralev A.V., Gracheva O.A. *Rekreacionnoe ispol'zovanie malyykh vodokhranilishh* [Recreational use of small reservoirs]. NNGASU Publ., 2010. 247 p.

3. Volshanic V.V., Suzdaleva A.A. *Classification of urban water bodies* [Classification of urban water bodies]. Moscow, ASV Publ., 2008. 112 p.

4. Orekhov G.V., Mamin R.G., Evdokimov P.V. Water management and ecological problems of development of the territory of New Moscow, *Science of Science*, 2015, vol. 2, no.158TVN2155.

5. Hou L., Zhang L., Li F., Huang S., Yang J., Ma C., Yu Z.C.-P. Hu A. Urban ponds as hotspots of antibiotic resistome in the urban environment. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, vol. 403, 124008.

6. Berglund B., Fick J., Lindgren P.E. Urban wastewater effluent increases antibiotic resistance gene concentrations in a receiving northern European river. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2015, vol. 34, no. 1, pp.192-196. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.2784>

7. Cacace D., Fatta-Kassinos D., Manaia C.M., Cytryn E., Kreuzinger N., Rizzo L., Karaolia P., Schwartz T., Alexander J., Merlin C. Antibiotic resistance genes in treated wastewater and in the receiving water bodies: a pan-European survey of urban settings. *Water Research*, 2019, vol. 162, pp. 320-330. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.06.039>.

8. Mamin R.G., Orekhov G.V., Bairasheva A.A. *Urbanization and ecological security of the territory of the new Moscow* [Urbanization and ecological security of the territory of the new Moscow]. Moscow, ASV Publ., 2015. 112 p.

9. Amirova N.N., Borovkov V.S., Volshanic V.V., Dorkina I.V. Composition and volumes of work on the restoration of small rivers and reservoirs in residential areas. Materials of the Tenth All-Russian Scientific Conference "Environmental problems of development of museum-reserves". Moscow, Heritage Institute, 2008, pp. 395-403

10. Akhmetov V.K., Volshanic V.V., A. Zuikov A.L., Orekhov G.V. *Fizicheskoe modelirovanie kontrvikhrevykh sooruzhenij i oborudovaniya* [Physical Modeling of Counter-rotating Structures and Equipment]. Moscow, MGSU Publ., 2018. 399 p.

11. Orekhov G.V., Baiaraa U., Belikov V.V. Methods for increasing efficiency of aeration of open water bodies in urban areas. *Vestnik MGSU*, 2009, no.2, pp.278-291. (in Russian)

12. Orekhov G.V. Jet counter-vortex aeration in engineering systems of urban water bodies. *The Eurasian Scientific Journal*, 2019, vol. 11, 76SAVN319.

13. Akhmetov V.K., Volshanic V.V., A. Zuikov A.L., Orekhov G.V., *Modelirovanie i raschet kontrvikhrevykh techeniy* [Simulation and Calculation of Counter-Rotating Flows]. Moscow, MGSU Publ., 2012. 252 p.

14. Volshanic V.V., Orekhov G.V. *Nizkonapornnye gidraolicheskie dvigateli* [Low-head hydraulic motors]. Moscow, ASV Publ., 2009. 392 p.

15. Belikov V.V., Aleksyuk. A.I. *Modeli melkoj vody v zadachakh rechnoy gidrodinamiki* [Shallow water models in the problems of river hydrodynamics]. Moscow, Russian Academy of Sciences Publ., 2020. 346 p.

Об авторе:

ОРЕХОВ Генрих Васильевич

доктор технических наук, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, 26 E-mail: orehov_genrih@mail.ru

OREKHOV Genrikh V.

Doctor of Engineering Science, Professor of the Hydraulics and Hydraulic Engineering Chair Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU) 129337, Russia, Moscow, Yaroslavskoye hw, 26 E-mail: orehov_genrih@mail.ru

Для цитирования: Орехов Г.В. Гидромеханический способ аэрации открытых водных объектов в условиях городской застройки // Градостроительство и архитектура. 2022. Т. 12, № 3. С. 62–71. DOI: 10.17673/Vestnik.2022.03.9.

For citation: Orekhov G.V. Hydromechanical Method of Aeration of Open Water Bodies under Conditions of Urban Development. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2022, vol. 12, no. 3, pp. 62–71. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2022.03.9.