



005010140

Богомолова Татьяна Геннадиевна

УЛУЧШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ГОРОДСКИХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ИХ
КИСЛОРОДНОГО РЕЖИМА

специальность
25.00.36 – геоэкология (в строительстве и ЖКХ)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

9 ФЕВ 2012

Москва
2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Московский государственный строительный университет” (ФГБОУ ВПО МГСУ).

Научный руководитель – доктор технических наук профессор
Боровков Валерий Степанович

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор
Сметанин Владимир Иванович
- кандидат технических наук
Шевченко Константин Иванович

Ведущая организация: ГУП «Мосводосток»

Защита состоится « 1 » марта 2012 г. в 14.00 час. на заседании диссертационного совета Д 212.138.07 при ФГБОУ ВПО “Московский государственный строительный” университет по адресу: 129337, Москва, Ярославское шоссе, д.26, в зале заседаний Ученого Совета МГСУ.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ФГБОУ “ВПО Московский государственный строительный университет”.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах просим присылать по адресу: 129337, Москва, Ярославское шоссе, д.26, МГСУ, Ученый Совет.

Автореферат разослан «27» января 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А.Д.Потапов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Сегодня в мире около трех четвертей населения проживает в городах. Рост количества городов и численности населения в каждом из них остается одной из определяющих тенденций развития современной цивилизации. Водотоки и водоемы в пределах урбанизированных территорий постоянно испытывают мощное негативное воздействие процессов урбанизации, являясь приемниками загрязняющих веществ, поступающих с поверхностным стоком, с очищенными сточными водами из атмосферы и с загрязненными грунтовыми водами.

Экологическое состояние городских водных объектов, являющихся наряду с городскими лесными насаждениями «природными» территориями в крупном городе, имеет важнейшее значение для поддержания здоровья населения, обеспечивает выполнение полноценных рекреационных функций и сохранение внутриводоемных экосистем. Под экологическим благополучием понимается комплекс факторов, обеспечивающих стабильное состояние водоема и прилегающей территории в пределах нормативных показателей качества воды, уровня загрязненности грунтового ложа и прибрежной зоны, обеспечивающих гарантированное отсутствие угроз здоровью населения и существованию водоемной биоты в соответствии с назначением водоема и характером водопользования: в целях рекреации, водоснабжения, рыбобразведения и водоотведения.

Одним из важнейших факторов, обеспечивающих экологическое состояние городских водных объектов, является количество растворенного в воде кислорода, который определяет активность самоочистительных процессов. Необходимость тщательного исследования этих процессов определяет актуальность темы диссертации, посвященной углубленному изучению кислородного режима и явлений, влияющих на процессы загрязнения и самоочищения воды в городских водных объектах.

Объектом исследований в данной диссертационной работе являются массообменные процессы растворения атмосферного кислорода воздуха через водную поверхность, потребление его загрязненными донными отложениями и влияние массообменных процессов на кислородный баланс городских водных объектов.

Рабочая гипотеза. Улучшение экологического состояния городских водных объектов может быть достигнуто за счет улучшения их кислородного режима на основе более точного прогнозирования процессов растворения кислорода и потребления его донными отложениями, при проектировании природоохранных мероприятий, инженерных систем, мониторинге и экологической реконструкции водных объектов.

Цель диссертационного исследования — совершенствование методов прогнозирования кислородного режима городских водных объектов при проектировании природоохранных мероприятий, инженерных систем, мониторинге их экологической реконструкции.

Задачи исследований:

1. Анализ методов расчета растворения и потребления кислорода в водоемах при различных условиях на поверхности, состоянии дна и степени проточности для выбора базовых расчетных зависимостей и выявления параметров требующих экспериментальной проверки.
2. Разработка программы и плана экспериментальных исследований, разработка методики, создание экспериментальных стендов и подбор оборудования для измерения кислородного режима.
3. Проведение экспериментальных исследований растворения и потребления кислорода при различных условиях на водной поверхности, степени проточности, при различном количестве и составе загрязненных донных отложений в условиях их покоя и при взмучивании.
4. Разработка предложений по совершенствованию методов прогнозирования кислородного режима городских водных объектов и рекомендаций по проектированию инженерных систем для регулирования кислородного режима в целях улучшения экологического состояния городских водных объектов.

Метод исследований.

Для решения поставленных задач принят экспериментально-аналитический метод исследования, предусматривающий использование физических моделей и расчетно-аналитических подходов в комбинации с экспериментальным определением величин, не поддающихся расчету.

Достоверность результатов исследований обусловлена согласованием их с известными закономерностями, характеризующими массообменные процессы и результатами ранее проведенных исследований других авторов; применением апробированных методик и стандартной измерительной техники; применением для опытов натуральных донных грунтов из московских городских водных объектов; тщательным проведением основных и контрольных опытов.

Научная новизна результатов исследований:

1. Подтверждена экспериментальными исследованиями зависимость скорости растворения кислорода в воде от его дефицита, площади контакта воздухе и воды, скорости движения и состояния поверхности воды в водоеме, получены зависимости, учитывающие эти факторы.
2. Установлен состав и степень влияния факторов на поглощение растворенного в воде кислорода загрязненными донными отложениями, в том числе:
 - площади контакта отложений с водой, толщины слоя отложений;
 - гранулометрического и биологического состава отложений;
 - экранирования отложений слоем песчаного и глинистого грунта;
 - взмучивания отложений турбулентным водным потоком.
3. Экспериментально доказано, что потребление кислорода в воде и донных отложениях определяется, главным образом, микробиологическими процессами.

4. Получены зависимости и разработаны научно обоснованные рекомендации по расчету кислородного режима городских водных объектов при наличии загрязненных донных отложений, обоснованы предложения по использованию инженерных методов и систем для регулирования кислородного режима в целях улучшения экологического состояния городских водных объектов.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Совершенствование мониторинга и разработка инженерных мероприятий и систем для обеспечения кислородного баланса городских водных объектов при проектировании их экологической реконструкции в целях улучшения их экологического состояния.

2. Усовершенствование учебного процесса в высших учебных заведениях при подготовке инженеров-экологов с использованием полученной базы данных и новых зависимостей.

3. Выявление проблемных вопросов и задач, требующих дальнейших исследований массообменных процессов в загрязненных городских водных объектах для регулирования кислородного режима, совершенствования их мониторинга для улучшения их экологического состояния.

На защиту выносятся:

- методика и результаты экспериментальных исследований кислородного режима водных объектов при наличии загрязненных донных отложений;

- рекомендации по расчету кислородного режима водных объектов при проектировании природоохранных мероприятий и предложения по комплексу инженерных мероприятий для улучшения качества воды в загрязненных городских водных объектах в целях улучшения их экологического состояния.

Апробация работы.

Результаты исследований обсуждались на заседаниях кафедры инженерной геологии и геоэкологии, кафедры управления природно-техногенной средой и кафедры гидравлики Московского государственного строительного университета, а также на Международной межвузовской научно-практической конференции молодых ученых, докторов и аспирантов «Строительство – формирование среды жизнедеятельности», г. Москва, апрель 2010.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов и рекомендаций, списка литературы из 188 наименований и приложения; работа изложена на 173 страницах машинописного текста и иллюстрирована 44 рисунками.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации; сформулированы рабочая гипотеза, цель и задачи исследований; описана методика экспериментов; отмечены достоверность и научная новизна результатов, практическая значимость выводов и рекомендаций.

В первой главе рассмотрены основные факторы, определяющие кислородный режим и общее экологическое состояние водных объектов урбанизированных территорий.

Состояние водных объектов является важнейшим показателем экологического благополучия города, так как они являются неотъемлемыми элементами всей ландшафтно-архитектурной системы мегаполиса, поддерживают гомеостаз ландшафта, выполняют санитарно-биологическую, климатообразующую, культурно-историческую, рекреационную функции. Состояние большинства водных объектов и степень ландшафтно-экологического обустройства их природно-территориального комплекса, а также состояние инженерных сооружений сегодня не соответствуют современному уровню и темпам благоустройства городских территорий.

Загрязнения рек и водоемов в пределах городов можно условно разделить на мутьевые (механические) и химические. Мутьевые загрязнения, состоящие из взвешенных частиц, вносятся в реки, поверхностным стоком с городской территории, со сбросами хозяйственно-фекальных и условно чистых промышленных и дренажных вод. Попавшие в реку мелкодисперсные частицы взвеси адсорбируют на своей поверхности многие химические загрязнения. При оседании взвеси увеличивается слой донных отложений, содержащий химические соединения различной природы. Окисление примесей в донных отложениях ухудшает кислородный режим и способствует вторичному загрязнению воды за счет процесса диффузии примесей в водную массу. Кислородный режим является результатом взаимодействия двух разных процессов – процесса поступления кислорода и его расходования на окислительные процессы в воде и в донных отложениях.

Гидравлический режим водотока определяет поведение как мутьевых, так и других видов загрязнений. Для прогнозирования качества воды и управлением кислородным режимом необходимо учитывать гидродинамические характеристики потока, влияющие на обменные процессы. Улучшение кислородного режима водного объекта может быть достигнуто, прежде всего, за счет снижения поступления загрязненных стоков, а также различными гидравлическими способами (воздействием на гидравлический режим водного объекта) либо гидротехническим (очисткой русла от загрязненных донных отложений), а также их комбинацией. Самым эффективным методом очистки русла является удаление загрязненных донных отложений, которые активно потребляют кислород и являются источником вторичного загрязнения речной воды.

Процесс деградации городских водных объектов сложно приостановить и обеспечить необходимый уровень их экологической безопасности только целенаправленным воздействием на факторы, определяющие этот процесс. В настоящее время естественной самоочистительной способности водоемов недостаточно для окисления массы загрязнений, поступающих в водные объекты с водосборной площади, из атмосферного воздуха, с грунтовыми водами. В отличие от природных условий, стабильные и экологически безопасные условия существования городского водного объекта должен обеспечивать человек. Гра-

мотная эксплуатация водных объектов может осуществляться на основе детальных исследований их кислородного режима.

Во второй главе выполнены расчетно-аналитические исследования процессов реэрации воды и потребления кислорода донными отложениями.

На обменные процессы, протекающие в воде при участии кислорода, решающее влияние оказывает диффузионный пограничный слой, образующийся между контактирующими фазами. В общем случае контакта движущихся жидкостей действуют механизмы молекулярной и турбулентной диффузии.

При данной температуре и давлении скорость массообмена в отсутствие движения водных масс пропорциональна градиенту концентрации и обратно пропорциональна толщине диффузионного слоя, который является наименее изученной величиной.

Для экспериментального определения толщины диффузионного слоя δ предлагается использовать балансовое уравнение, основанное на законе Фика

$$D_m \frac{C_{np} - C_{cp}(t)}{\delta(t)} \cdot F \Delta t = \Delta C F h, \quad (1)$$

где D_m – коэффициент молекулярной диффузии кислорода в воде;

C_{np} – предельная концентрация кислорода при данной температуре;

$C_{cp}(t)$ – средняя концентрация кислорода в пробе, в момент времени t ;

$\Delta C = C_{cp}(t + \Delta t) - C_{cp}(t)$ – приращение концентрации кислорода в пробе за время Δt ;

F – площадь контактной поверхности «воздух-вода»;

h – глубина водной массы.

Уравнение (1) позволяет экспериментально определить $\delta(t)$, определяя изменение средней концентрации кислорода в пробе за время Δt . Скорость перемещения нижней границы диффузионного слоя за счет броуновского движения при молекулярной диффузии определялась с использованием формулы А.Эйнштейна, описывающей среднее квадратичное разбегание молекул $\delta_p(t)$ при броуновском движении в течение времени τ .

$$\delta_p^2(t) = 2 D_m \tau \quad (2)$$

Поскольку А.Эйнштейном рассматривался симметричный процесс «разбегания» молекул, примем изменение толщины поверхностного слоя $\delta_x = \frac{1}{2} \delta_p$ и концентрацию кислорода в поверхностном диффузионном слое C_{np} . Вследствие диффузионного процесса запас кислорода в поверхностном слое со временем увеличивается, и скорость перемещения нижней границы диффузионного слоя может быть найдена как

$$u_a = \frac{1}{2} \frac{d\delta_p(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2 D_m}{\tau}} \quad (3)$$

Результаты расчета толщины поверхностного диффузионного слоя и скорости перемещения его нижней границы при $D_M = 2 \cdot 10^{-5}$ см²/с приведены в таблице.

τ , с	1	10	60	3600	86400
δ_p , см	$6,3 \cdot 10^{-3}$	0,02	0,049	0,379	1,87
$u_a \cdot 10^3$, см/с	3,16	0,999	0,409	0,052	0,0107

Расчетные данные показывают, что по истечении первой минуты от начала процесса толщина поверхностного диффузионного слоя оказывается близкой к 0,5 мм и в течение суток увеличивается почти до 2 см.

При турбулентном движении водного потока процесс переноса кислорода в массу жидкости осуществляется в основном за счет турбулентного перемешивания. Под действием крупномасштабных вертикальных пульсаций скорости V' , захватывающих всю глубину потока h , поверхностный диффузионный слой перемешивается со всей водной массой в течение периода времени T_0 , который определяется как $T_0 = \frac{h}{V'}$. Имеющиеся данные по интенсивности вертикальных пульсаций скорости при равномерном течении в каналах показывают, что среднеквадратичное значение V' зависит от скорости течения V и коэффициента гидравлического сопротивления λ :

$$V' = \frac{1}{2} V \sqrt{\frac{\lambda}{8}}. \quad (4)$$

При механическом возбуждении движения и перемешивания водной массы выражение (4) является приближенным и должно уточняться.

С учетом соотношения (4) периодичность перемешивания поверхностного слоя со всей водной массой записывается в виде:

$$T_0 = \frac{2h}{V} \sqrt{\frac{8}{\lambda}}. \quad (5)$$

Поскольку поверхностный диффузионный слой насыщается атмосферным кислородом, принимаем его толщину с использованием соотношения (2). При этом поток кислорода в толщу водной массы с учетом (5) можно записать в виде:

$$j_T = \frac{C_{np} \sqrt{2D_M T_0}}{T_0} = D_T \frac{C_{np}}{\delta_{v1}}, \quad (6)$$

где δ_{v1} – вертикальный масштаб пульсаций скорости.

Поскольку крупномасштабные вертикальные пульсации скорости захватывают всю глубину потока ($\delta_{v1} \sim h$), получаем с использованием (5) следующее выражение для коэффициента турбулентной диффузии:

$$D_{\tau} = h \sqrt{\frac{2D_M}{T_0}} = \left(\frac{\lambda}{8}\right)^{0,25} \sqrt{VhD_M}. \quad (7)$$

Это выражение с введением в него молекулярной вязкости воды ν запишется в виде:

$$\frac{D_{\tau}}{D_M} = \left(\frac{\lambda}{8}\right)^{0,25} \sqrt{\frac{Vh \nu}{\nu D_M}}, \quad (8)$$

где $\frac{\nu}{D_M}$ - число Шмидта, которое для воды близко к 500;

$\frac{Vh}{\nu} = \text{Re}$ - число Рейнольдса.

При $\sqrt{\lambda} \approx 0,2$ получаем:

$$\frac{D_{\tau}}{D_M} = 7,5 \sqrt{\text{Re}}. \quad (9)$$

Выражение (9) требует экспериментальной проверки в связи с рядом допущений, принятых при его выводе.

Потребление кислорода на окисление органических примесей, имеющих в водной массе, обычно описывается уравнением Стриттера – Фелпса:

$$\frac{dx(t)}{dt} = -k'_1(L_0 - x(t)), \quad (10)$$

где $L_0 = \text{БПК}_5$;

$x(t)$ – количество кислорода, потребленного за время t ;

k'_1 - константа скорости потребления кислорода.

Исследования МГСУ показали, что достаточно быстрое снижение скорости потребления кислорода загрязненными речными водами связано в большей мере с седиментацией взвесей, чем с окислением органических примесей, имеющих в воде.

Установленная опытным путем зависимость k'_1 от времени указывает на то, что уравнение Стриттера – Фелпса является упрощенной формой описания процесса потребления кислорода и должно уточняться.

Более высокий темп расходования кислорода в донных отложениях по сравнению с его поступлением через водную поверхность, может приводить в некоторый момент времени к возникновению дефицита кислорода D_{ef} , который характеризуется разностью между предельной концентрацией кислорода C_{np} и его действительной концентрацией $C(t)$ в данный момент времени:

$$D_{ef} = C_{np} - C(t). \quad (11)$$

В результате действия сложного комплекса факторов (окисление примесей, седиментация взвесей, консолидация донных отложений, снижение концентрации кислорода в воде) интенсивность расходования кислорода снижается во времени и процесс его потребления становится вялотекущим. Возникший в на-

чальный период значительный дефицит кислорода D_{ef0} резко интенсифицирует процесс растворения атмосферного кислорода. Реаэрация воды при этом протекает во времени существенно быстрее, чем происходит потребление кислорода. Это приводит к увеличению концентрации кислорода в воде и снижению его дефицита.

Принимая во внимание низкий темп стабилизации загрязненных донных отложений во времени и предполагая малый темп расходования кислорода по сравнению с его поступлением, приближенное балансовое соотношение, характеризующее изменение дефицита кислорода в водной массе глубиной h только за счет поступления кислорода, можно записать в виде:

$$-d(D_{ef}) = D_m \frac{C_{np} - C(t)}{\delta_{II}} \cdot \frac{dt}{h}. \quad (12)$$

Составление более точного выражения станет возможным только после изучения процесса потребления кислорода донными отложениями, который до настоящего времени не был исследован.

Интегрирование уравнения (12) с граничным условием $t=0$, $D_{ef}=D_{ef0}$ позволяет получить решение:

$$\lg \frac{D_{ef}}{D_{ef0}} = -\frac{D_m}{2,3\delta_{II}h} t, \quad (13)$$

которое предполагает малую продолжительность времени t и пренебрежимо малый темп расходования кислорода в водной массе по сравнению с темпом его поступления. Тем не менее, решение (13) совпадает по форме с уравнением, приводимым И.Д. Родзиллером:

$$\lg \frac{D_{ef}}{D_{ef0}} = -k_2 t, \quad (14)$$

где k_2 – коэффициент реаэрации.

Сопоставление выражений (13) и (14) позволяет получить зависимость для коэффициента реаэрации:

$$k_2 = \frac{D_m}{2,3\delta_{II}h}. \quad (15)$$

Учитывая приближенность исходного уравнения (12), зависимость (15) для коэффициента реаэрации покоящейся жидкости должна быть проверена экспериментально.

В условиях покоящейся жидкости над слоем загрязненных отложений при его сквозной пористости массообмен осуществляется механизмом молекулярной диффузии. Если водная масса находится в движении, динамические параметры потока оказывают влияние на процесс диффузии в грунте. Диффузия кислорода из водного потока в слой донных отложений зависит от характеристик потока, состояния поверхности границы раздела «вода–грунт», состава донных грунтов и фильтрационной обстановки в слое отложений.

Влияние факторов, связанных с турбулентным движением воды, на процесс ее реэрации через свободную поверхность, а также массообменные процессы, приводящие к потреблению кислорода донными отложениями, в частности, коэффициент диффузии, изучены недостаточно и требуют выполнения специальных экспериментальных исследований.

Кислородный баланс слоя воды толщиной h при отсутствии либо малой роли окислительных и кислородообразующих процессов в самой воде определяется двумя факторами: потреблением кислорода загрязненными донными отложениями и поступлением кислорода через свободную поверхность. При анализе процесса изменения концентрации кислорода в этом случае может быть использовано следующее уравнение изменения концентрации в слое воды толщиной h :

$$-dC = \frac{1}{h} [u_a(C_{np} - C(t)) - u_r C(t)] dt, \quad (16)$$

где u_a – скорость перемещения фронта диффузии кислорода в воде;
 u_r – скорость перемещения фронта диффузии в поровом пространстве донных отложений.

Интегрируя уравнение (16) с начальными условиями $t=0$, $C(t)=C_{np}$, получаем:

$$\left(\frac{u_r}{h} + 1 \right) \frac{C}{C_{np}} - \frac{u_a}{u_r} = \exp \left[- \frac{1}{h} (u_a + u_r) \frac{t}{h} \right]. \quad (17)$$

Уравнение (17) может быть использовано для определения скорости потребления кислорода загрязненным донным грунтом с использованием результатов измерений, относящихся к начальной стадии процесса с ярко выраженной нестационарностью. Расчет кислородного баланса в водотоке также возможен с использованием зависимости (17), однако его выполнение требует данных о значениях u_a и u_r для речного потока. Если для скорости поступления кислорода u_a получены лабораторные данные, то по влиянию характеристик речного потока на значение u_r данных пока не имеется, Это является задачей настоящих исследований.

Диффузия примеси в растворе, заполняющем поровое пространство, зависит от геометрической формы порового пространства, адгезионных свойств твердого скелета грунта, наличия фильтрационных токов и их направленности, а также от неравномерности распределения давления по поверхности грунта. В связи с тем, что часть ионов порового раствора оказывается связанной с частицами грунта, молекулярная диффузия в поровом пространстве протекает иначе, чем в свободном растворе, особенности ее изучены недостаточно.

Коэффициент молекулярной диффузии в грунте отличается от коэффициента молекулярной диффузии в воде, причем скорость передвижения вещества в пористой среде меньше, чем в жидкости. Для определения влияния свойств грунта на коэффициент молекулярной диффузии необходимы дальнейшие экспериментальные исследования.

В третьей главе рассмотрены задачи, методика и техника экспериментальных исследований, которые выполнялись по следующим направлениям:

1. Установить факторы, влияющие на процесс диффузии кислорода в речную воду через свободную поверхность потока с целью обоснования и разработки инженерного метода расчета этого процесса.

2. Выявить факторы, определяющие интенсивность и длительность процесса потребления кислорода загрязненными донными отложениями с целью разработки рекомендаций по его расчету.

Экспериментальные исследования процесса растворения кислорода (реаэрации воды) выполнялись с учетом закона Фика при различном начальном перепаде концентраций, различной площади контакта фаз в условиях одинакового (или близкого) перепада концентраций кислорода и изменяющейся толщины слоя воды. Опыты выполнялись в условиях покоящейся и движущейся жидкости. Серия опытов с движущейся жидкостью выполнялась на кольцевом канале с лопастным активатором движения воды, скорость вращения которого регулировалась.

Основной измерявшейся величиной было содержание растворенного кислорода в воде. В процессе контрольных лабораторных и натуральных исследований, проводившихся с целью оценки проб грунта и воды, измерялись также температура воды, скорость и глубина водного потока. Исследовался гранулометрический состав отложений, концентрация взвеси в воде. Измерения проводились с использованием стандартных приборов. Измерение содержания кислорода во всех случаях измерялось кислородомером «Экотест – 2000», который одновременно позволял контролировать и температуру пробы. Пределы измерения концентрации растворенного кислорода 0-12 мг/л с погрешностью $\pm 5\%$. Пределы измерения температур 0 – 30⁰С с погрешностью 0,5%.

Экспериментальные исследования по изучению интенсивности и длительности процесса потребления кислорода загрязненными донными отложениями были значительно более сложными. В этой серии экспериментов исследовалась степень влияния на процесс потребления кислорода площади контакта и соотношения объемов «грунт-вода», изменения механического состава отложений за счет добавки кварцевого песка, характер и степень влияния взмучивания донных отложений. В экспериментах использовались лабораторные стенды, позволяющие изменять условия опытов в достаточно широких пределах. Обработка опытных данных производилась с учетом приведенных выше результатов расчетно-аналитического исследования.

Общий методический прием для всех экспериментальных исследований с донными отложениями – предварительное выдерживание пробы («грунт-вода») в течение трех суток в целях стабилизации экологической системы в пробе. Традиционная характеристика потребления кислорода – значение БПК₅ вычислялось по результатам измерений в целях сопоставления с опытными данными других исследователей.

Для приготовления проб использовалась отстаивавшаяся в течение нескольких суток водопроводная вода, которая подвергалась неоднократному анализу на потребление кислорода.

В четвертой главе рассмотрены результаты экспериментальных исследований реэрации воды за счет поступления кислорода через свободную поверхность массива воды.

Реэрация исследовалась как при покоящейся жидкости, так и при ее движении в условиях различной площади контактной поверхности «вода-воздух», которая в опытах изменялась в 13,6 раза, а также при различном значении начального дефицита кислорода, который регулировался различным количеством добавки реагента, связывающего кислород, растворенный в воде.

Измерения подтвердили, что для условий неподвижной жидкости процесс реэрации качественно согласуется с законом Фика. Во всех случаях достаточно отчетливо выделяется начальная фаза «быстрой» реэрации водной массы, продолжительность которой составляет 3-5 часов, в течение которой толщина поверхностного диффузионного слоя, определенная на основе балансового соотношения (1), достигает толщины 0,15 см (рис. 1) с последующим снижением до 0,06 см на интервале времени в 20 часов и далее устанавливается близкой к 0,03 см. Систематического влияния других факторов на толщину поверхностного диффузионного слоя выявлено не было.

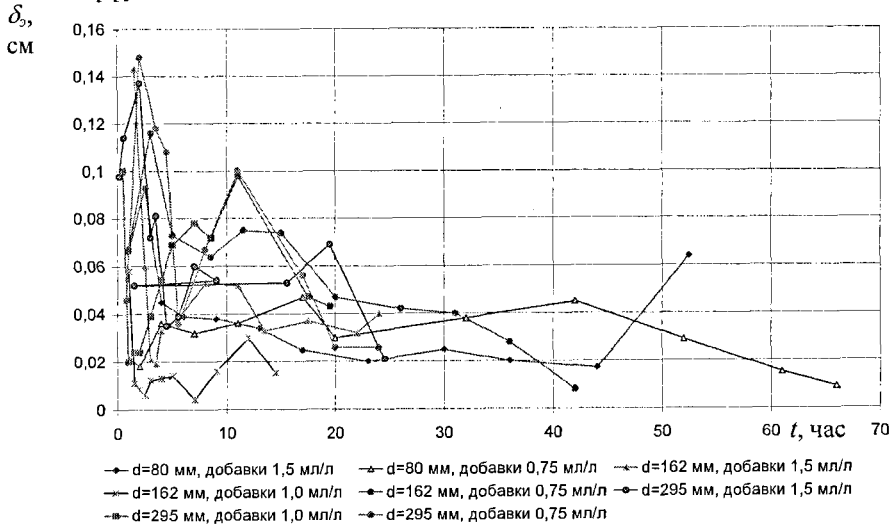


Рис. 1

Полученные данные о наблюдающейся тенденции к уменьшению толщины эквивалентного диффузионного слоя в первые сутки наблюдений, возможно, объясняются остаточным влиянием связывающей добавки, которая продолжает реагировать с кислородом в течении данного времени.

Исследования дефицита кислорода в покоящейся водной массе при ее естественной реэрации позволили установить, что коэффициент реэрации k_2

уменьшается с глубиной водной массы h , что согласуется с расчетной зависимостью (15) и увеличивается пропорционально начальному дефициту кислорода D_{ef0} (рис.2).

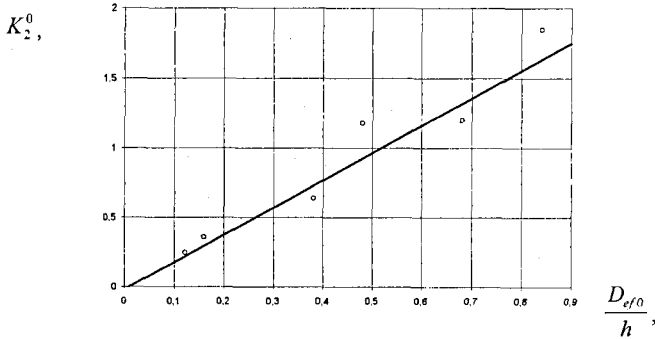


Рис. 2

Полученные данные аппроксимируются следующей зависимостью:

$$k_2^0 = 2 \frac{D_{ef0}}{h}, 1/\text{сут.} \quad (18)$$

Возникновение дефицита кислорода в водной массе, содержащей окисляемые примеси зависит как от потребления кислорода на их окисление, так и от процесса растворения кислорода в воде. Обобщение данных измерений разных авторов показало, что константа скорости потребления кислорода k_1' в зависимости (10) для малых водотоков уменьшается с течением времени:

$$k_1 = \frac{6,5}{\sqrt{t}}, \quad (19)$$

где $t = \frac{x}{V}$, V – скорость водного потока, x – расстояние от выпуска сточных вод.

Исследование диффузионного потока кислорода в движущуюся воду показало, что интенсивность процесса переноса значительно возрастает с увеличением скорости течения. Создание движения жидкости на замкнутом стенде связано с ее турбулизацией и интенсивным перемешиванием, которое приводило к практически мгновенному распределению поступающего кислорода по всему объему. В этом случае толщина диффузионного слоя оказывается совпадающей с глубиной потока.

По сравнению со статическими условиями процесс реаэрации значительно более интенсивен, и стабильная концентрация кислорода достигается в течение $2 \div 3$ часов, в то время как в статических условиях при близкой площади поверхности контакта «вода-воздух» и той же концентрации связывающей добавки процесс реаэрации продолжается от нескольких десятков часов до нескольких суток (рис.3).

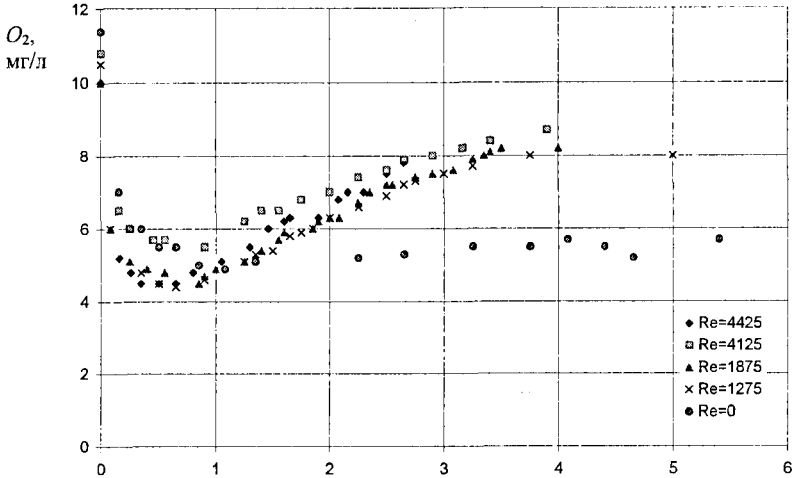


Рис. 3

Обработка результатов измерений с учетом того, что при движении жидкости поступающей через поверхность кислород распределяется равномерно в жидком объеме глубиной h , дала возможность, опираясь на закон Фика, экспериментально определить коэффициент диффузии D_T в виде:

$$D_T = \frac{\Delta C_i h^2}{\Delta t (C_{np} - C_i)}, \quad (20)$$

где C_i — концентрация кислорода в момент времени t ;

ΔC_i — изменение концентрации кислорода за интервал времени Δt .

Результаты выполненных измерений позволили установить, что числовой коэффициент в соотношении (9) близок к 10 и оно приобретает вид:

$$\frac{D_T}{D_M} = 10 \sqrt{Re}. \quad (21)$$

Значение D_T в среднем на 2-3 порядка превышает коэффициент молекулярной диффузии D_M в диапазоне исследованных числе Рейнольдса.

Числовой коэффициент в формуле (21) получен при создании движения на стенде с помощью лопастного активатора. При естественном турбулентном движении открытого водного потока этот коэффициент может отличаться от

найденного в лабораторных условиях, что должно быть проверено данными специальных исследований.

Растворение кислорода в водной массе существенно влияет на процесс изменения дефицита кислорода, возникающего в воде по тем или иным причинам и описываемого уравнением (14). Опытные данные по реэрации водной массы в статических условиях при одновременном введении связывающей добавки согласуются с уравнением (14). Экспериментально подтверждено установленное расчетом снижение коэффициента реэрации покоящейся водной массы от глубины h и зависимость его от начального дефицита кислорода в виде (18).

Исследование показало, что возникающий при движении механизм турбулентной диффузии существенно ускоряет реэрацию водной массы, причем коэффициент реэрации k_2 обнаруживает отчетливое влияние глубины h и скорости водного потока V (рис.4).

Получена зависимость, отражающая в безразмерной форме влияние указанных факторов:

$$\frac{k_2}{k_2^0} = 1 + 4,5 \sqrt{\frac{u^2}{gh}}. \quad (22)$$

Выражение под знаком радикала представляет собою число Фруда, известное в гидравлике как критерий подобия открытых водных потоков.

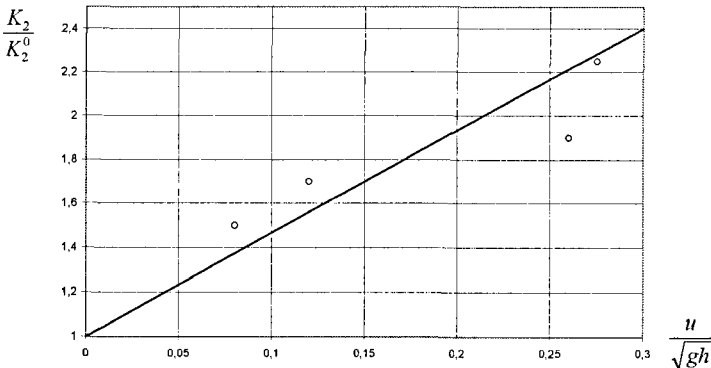


Рис.4

В пятой главе представлены результаты измерений потребления кислорода из воды загрязненными донными отложениями через контактную поверхность с водой в условиях покоящейся и движущейся жидкости.

Анализ имеющихся данных о значении и характере изменения константы окисления примесей в речном потоке позволяет предположить, что наряду с процессом окисления примесей, в речном потоке действуют значительно более мощные факторы, приводящие к интенсивному снижению содержания примесей в речной воде. Этот механизм связан с сорбированием примесей частицами мелкой взвеси и постепенным осаждением на дно водотока. Загрязненность

речной воды, повышенная сверх фоновой, обычно прослеживается на 10-15 километровых участках рек ниже выпусков сточных вод. Примерно на этом же участке происходит осаждение мелкой взвеси. Это подтверждено результатами натуральных исследований МГСУ по изучению состояния дна на участках рек ниже промышленных городов. Так называемый процесс самоочищения речной воды связан, таким образом, в значительной мере не с окислением примесей, а с их аккумуляцией в донных отложениях. Потерянные водой органические примеси продолжают окисляться на дне реки, однако условия их микробиологического окисления будут существенно отличаться от тех, которые имели место в речном потоке.

Потребление кислорода загрязненными донными отложениями происходит вследствие того, что в них протекают аэробные процессы биохимического окисления различных веществ. Поскольку в толще отложений имеется «сырье» для этих процессов, их течение будет зависеть от интенсивности подачи кислорода на данную глубину. Подача кислорода в донные отложения происходит за счет обменных процессов между водной массой и поровой водой, насыщающей донные отложения. По мере продвижения по поровым каналам в толщу грунта кислород расходуется на процессы окисления, поэтому ниже некоторой границы процессы превращения веществ носят анаэробный характер, т.е. происходят без участия кислорода.

Таким образом, прогнозирование кислородного режима водного объекта и его регулирование в целях улучшения жизнедеятельности биоты и повышения экологической стабильности и безопасности требует конкретных данных о потреблении кислорода загрязненными донными отложениями.

Факторами, влияющими на интенсивность потребления кислорода, будут площадь поверхности контакта грунта с водой, толщина слоя грунта и его гранулометрический состав, а также соотношение между объемом грунта $W_{гр}$ и объемом воды $W_{в}$ в испытываемой пробе. Объем воды является влияющим фактором, так как он при отсутствии поступления кислорода определяет его начальный запас, постепенно затрачиваемый на окисление донных отложений. Первая серия экспериментов была выполнена при постоянном объеме воды.

Опыты показали, что поток кислорода из воды в слой отложений определяется площадью контакта воды с грунтом и концентрацией кислорода в воде (рис.5).

Организмы, обитающие в донных отложениях, могут оказывать влияние на интенсивность потребления кислорода и процессы превращения в донных отложениях. Среди организмов, которые наиболее распространены в донных грунтах, чаще всего отмечаются черви-олигохеты, подвижность которых зависит от содержания кислорода в воде.

Основное потребление кислорода происходит на микробном уровне, и деятельность крупных организмов в грунте может оказывать лишь малое влияние на процесс потребления кислорода, что было доказано опытами с кипячением проб загрязненного грунта.

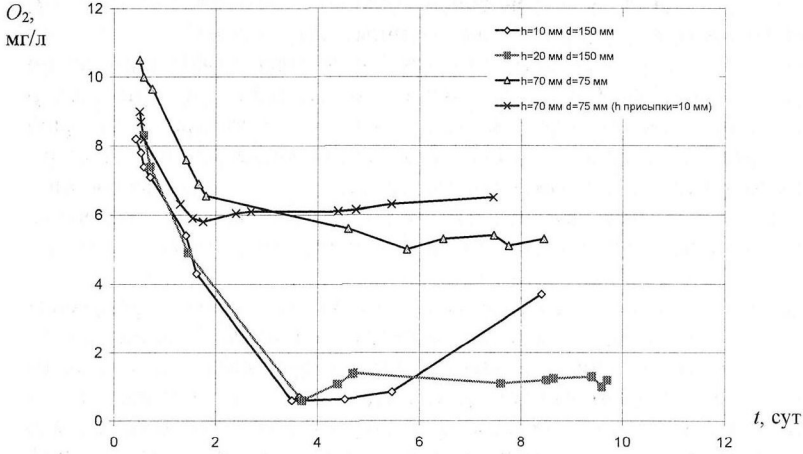


Рис. 5.

Было установлено, что уничтожение крупных гидробионтов (олигохет, имеющих в отложениях) кипячением приводило к однократному изменению характера потребления кислорода в течении 20-часового периода, после чего процесс потребления кислорода восстанавливался (рис.6).

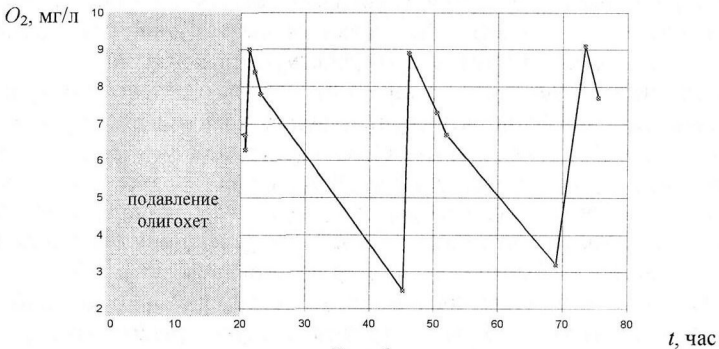


Рис.6

Обработка проб грунта, не содержащих олигохет, ионами серебра приводила к качественно близкому результату. Это позволило предположить, что и в том и в другом случаях уничтожалась микрофлора, жизнедеятельность которой приводит к потреблению основной массы кислорода, поступающего из воды в донные отложения.

Принимая во внимание, что возможно так же «прямое» потребление кислорода на химическое окисление донных отложений (без участия микрофлоры), были выполнены опыты большой продолжительности (до 90 суток), которые позволили установить, что темп окисления (стабилизации) загрязненных

донных отложений достаточно слабый. Установлено, что константа скорости окисления донных отложений, характеризующая изменение БПК₅, для проб с донными отложениями имеет малое значение и зависит от соотношения между толщиной слоя воды и грунта:

$$k_c = \frac{2}{3} \cdot 10^{-3} \frac{h}{h_r} \quad (23)$$

Установлено также, что потребление кислорода происходит в тонкой иловой пленке на поверхности донных отложений, имеющей толщину, близкую к 3% от общей толщины слоя загрязненных грунтов. Ниже этой пленки кислород не проникает.

Характеризуя процесс потребления кислорода загрязненными донными отложениями величиной $\frac{D_r}{\delta_r}$, имеющей размерность скорости, было установлено, что она зависит от соотношения между толщиной слоя воды и грунта:

$$\frac{u_r}{u_a} = 20 \left(\frac{h}{h_r} \right)^{0,65} \quad (24)$$

где $u_a = \frac{D_m}{\delta_m}$ - скорость поступления кислорода через поверхность воды.

Экранирование загрязненных донных отложений слоем песка может существенно уменьшить интенсивность потребления кислорода (рис.5).

Опыт с песчаным экраном позволил обнаружить явление постепенного погружения экрана в водонасыщенный загрязненный грунт, плотность которого значительно ниже плотности песка. По мере погружения эффективная толщина экрана уменьшалась, и режим равновесного состояния приближался к режиму незранированной пробы.

Потребление кислорода загрязненным грунтом происходит в слое толщиной $\delta = 0,05$ мм. По этой причине добавление чистого песка в массу загрязненного грунта не приводит к заметному изменению условий потребления кислорода донными отложениями

Установлено, что биохимическое потребление кислорода возрастает более чем в 5 раз при взмучивании загрязненных донных отложений по сравнению с потреблением кислорода в состоянии покоя. Увеличение потребления кислорода связано с резким возрастанием поверхности контакта между водой и частицами взвеси вследствие нарушения консолидации слоя отложений и разъединения мелкодисперсных частиц.

Установлена линейная связь между константой окисления загрязненных донных отложений и концентрацией кислорода в воде. Удельная константа превращения загрязненных донных отложений, приведенная к единичной концентрации кислорода, оказалась близкой к $(7,5 \div 7,8)10^{-3}$ л/(мг·сут).

При взмучивании биохимическая потребность в кислороде возрастает прямо пропорционально концентрации загрязненных грунтов, взмученных в воде.

В шестой главе описаны предложенные в МГСУ инженерные методы поддержания качества воды в городских водных объектах. Практика показывает, что в условиях крупного города невозможно обеспечить приемлемое качество воды в городских водных объектах, не производя постоянно или периодически специальных технологических мероприятий. Большое, исчисляемое тысячами в масштабе страны и сотнями для Москвы, число водных объектов, требующих очистки, вынуждает применять простые, дешевые, но эффективные технологии, ряд которых разработан и опробован на практике специалистами МГСУ при участии соискателя:

1. Технологии удаления донных отложений, обеспечивающего сохранение самоочистительной способности воды;
2. Технологии регулирования гидравлических (паводковых) режимов рек с целью промывки русла;
3. Технологии применения взмучивающих многоструйных установок на реках в периоды промывки русла;
4. Технологии применения искусственной аэрации водных масс с целью повышения их самоочистительной способности;
5. Технологии создания искусственного водооборота для водоемов с отсутствующей или слабой проточностью, что позволяет эффективно и экономично очистить ложе водного объекта и поддерживать требуемое качество воды в последующий период его эксплуатации.

В условиях сокращенной или отсутствующей проточности и невозможности постоянной подпитки водного объекта извне единственным способом поддержания стабильной экосистемы водоема и приемлемого качества воды является создание системы замкнутого насосного водооборота, обеспечивающей искусственную проточность или циркуляционное течение воды в изолированном водном объекте.

Идея создания замкнутого водооборота заключается в следующем. В нижнем течении участка реки, каскада прудов или в застойной зоне непроточного водного объекта вода забирается и подается к насосной станции, от которой по напорным водоводам она передается и поднимается в вышележащие участки. В месте выпуска воды или по трассе водовода могут быть размещены аэраторы, фонтаны или подобные им устройства для обогащения воды растворенным кислородом. С верхних участков реки или каскада прудов аэрированная вода самотеком спускается вниз, обеспечивая перемешивание всего массива и улучшение качества воды по всему течению водотока.

Постоянное увеличение объемов воды, требующей искусственной аэрации заставляет разрабатывать эффективные системы аэрации, простые в изготовлении, надежные и экологически чистые в эксплуатации, малозатратные. Этим условиям удовлетворяют системы искусственной струйной аэрации, основным узлом которых являются разработанные в МГСУ вихревые аэраторы, превосходящие по эффективности, надежности, низкой стоимости изготовления, многовариантности исполнения известные аналоги. Наряду с вихревыми аэраторами

в зависимости от конкретных условий могут применяться также аэраторы других типов, фонтаны, перелазы уровней воды и другие способы аэрации.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.

1. Улучшение экологического состояния городских водных объектов может быть достигнуто регулированием их кислородного режима для активизации внутриводоемных самоочистительных процессов и осуществлением инженерных мероприятий по очистке от избыточного количества загрязненных донных отложений, которые потребляют кислород и вызывают вторичное загрязнение воды.

2. Изучен диффузионный процесс поступления атмосферного кислорода в покоящуюся водную массу через свободную поверхность. Подтверждена приемлемость закона Фика для описания этого процесса. Определена толщина поверхностного диффузионного слоя, которая для всех исследованных случаев при значительном изменении площади контакта, начального дефицита кислорода и времени взаимодействия водной массы с воздухом оказалась близкой к 0,5 мм, что позволяет производить расчет поступления кислорода в водоем при отсутствии проточности.

3. Выполненные экспериментальные исследования процесса потребления кислорода загрязненными водами показали, что он подчиняется закону мономолекулярного окисления Стриттера-Фелпса. Установлено, что для проточных водных объектов «константа» потребления кислорода уменьшается во времени и с расстоянием от места поступления загрязненных стоков.

4. Установлено, что изменение дефицита кислорода, возникающего в водных объектах с расходом его на процессы окисления, в условиях, когда не обеспечивается поступление кислорода в водную массу, отвечает уравнению первого порядка. Получена зависимость коэффициента реаэрации покоящейся водной массы от ее глубины и начального дефицита кислорода.

5. Исследованы процессы реаэрации движущейся водной массы. На основе физической модели обновляющейся поверхности с привлечением данных по турбулентности водных потоков и схемы А.Эйнштейна по насыщению поверхностного слоя, получены формулы для коэффициента турбулентной диффузии скорости перемещения диффузионного фронта и зависимости коэффициента реаэрации водного потока от числа Фруда.

6. Экспериментами большой продолжительности установлено, что окисление (стабилизация) загрязненных донных отложений является медленно изменяющимся процессом. Определена существенная зависимость «константы» окисления донных отложений от концентрации кислорода в воде и слабая изменчивость «констант» во времени, согласующаяся с данными других исследователей, что следует учитывать при прогнозировании кислородного режима на длительные периоды времени.

7. Обработка проб воды и загрязненных донных отложений ионами серебра и кипячением с последующим насыщением проб кислородом позволяет

заклучить, что крупные гидробиоты (олигохеты) оказывают слабое влияние на процесс расходования кислорода. Основным потребителем кислорода является микрофлора, «прикрепленная» к частицам мелкой взвеси в воде и в донных отложениях. Опытным путем установлено, что реабилитация микрофлоры в системе «вода-грунт» происходит в течение от 20 часов до 3 суток.

8. Установлено, что изменение гранулометрического состава загрязненных донных отложений слабо влияет на режим потребления кислорода. Экранирование загрязненных отложений песчаным экраном приводит к заметному снижению потребления кислорода на период времени в 15-20 суток (на 1см толщины экрана). В связи с этим песчаный экран не может рассматриваться как эффективный способ повышения экологической безопасности городских водоемов.

9. Потребление кислорода донными отложениями происходит в статических условиях в тонкой поверхностной иловой пленке. Установлено, что темп потребления кислорода пропорционален площади контакта «вода-грунт». Получена формула, характеризующая отношение средней скорости потребления кислорода к скорости его поступления через водную поверхность. Установлена зависимость константы окисления отложений от эквивалентной концентрации взвеси и отношения глубины водоема к толщине слоя отложений.

10. Предложен экспресс метод определения БПК₅ для донных отложений, учитывающий слабую изменчивость их окислительной способности во времени.

11. Установлено резкое возрастание потребления кислорода с ростом концентрации мелкой взвеси в воде при взмучивании донных отложений вследствие увеличения удельной поверхности контакта частиц взвеси с водной массой. Опыты показали пятикратное возрастание потребления кислорода при взмучивании донных отложений городских водоемов по сравнению с отложениями водоемов, не подверженных влиянию урбанизации.

12. Предложен комплекс инженерных мероприятий, включающий удаление загрязненных отложений, интенсивную аэрацию воды и создание искусственного водооборота для улучшения экологического состояния городских водных объектов.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:
в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Т.Г. Богомолова. Диффузия атмосферного кислорода в движущуюся массу жидкости. «Вестник МГСУ», 2009, № 3. с.205-211.
2. Т.Г. Богомолова. Анализ влияния загрязненных донных отложений на кислородный режим водоема. «Вестник МГСУ», 2009, № 4. с.36-38.
3. Т.Г. Богомолова, Ю.В. Брянская. Экспериментальные исследования потребления кислорода загрязненными отложениями. «Вестник МГСУ» № 2, 2010, с.120-123.

4. Т.Г. Богомолова, Ю.В. Брянская, И.М. Маркова. Диффузия соединений тяжелых металлов из загрязненных русловых отложений в речную воду. Журнал «Academia. Архитектура и строительство». М: 2010, № 3, с.538-543.
5. Т.Г. Богомолова, В.А. Курочкина. Загрязнение речных русел на урбанизированных территориях и инженерные мероприятия по улучшению их экологического состояния. «Вестник МГСУ» №4, 2010, с.399-404.
6. Т.Г. Богомолова, В.А. Курочкина. Загрязнение речных русел на урбанизированных территориях и проблемы их очистки для улучшения экологического состояния водотока. «Инженерные изыскания» №10, 2010, с. 56-58.

а также в других изданиях

1. Т.Г. Богомолова, Ю.В. Брянская. Потребление кислорода донными отложениями в водных источниках. Научные труды на XIII Междунар. Межвузовск. научно-практич. конф. «Строительство – формирование среды жизнедеятельности». 14-21 апр. 2010 г. М: изд-во АСВ, с.257-261.

Подписано в печать 24.01.2012

Объем 1,7 п. л.

Тираж 100

Формат 60x84/16

Заказ 27

ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет»

Отпечатано в Типографии МГСУ.

129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

Качество печати соответствует качеству предоставленных оригиналов