

УДК 502.52

СВОЙСТВА МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ НАНОСОВ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РУСЛОВОЙ ПРОЦЕСС И САМООЧИЩЕНИЕ РЕЧНОЙ ВОДЫ

© 2012 г. Н. В. Суйкова, Ю. В. Брянская, В. С. Боровков

Московский государственный строительный университет

129337 Москва, Ярославское шоссе, 26

Поступила в редакцию 15.03.2010 г.

Проанализирована роль мелкодисперсных наносов техногенного происхождения в русловом процессе, рассматриваются особенности осаждения частиц различной плотности и формы, вопросы хлопьеобразования и консолидации осадков в придонной области потока, приводятся экспериментальные данные о величине сцепления между частицами, предложена зависимость для его расчета, определен класс наносов, для которых сцепление определяет критическую скорость размыва. На основе сопоставления процессов самоочищения речной воды и осаждения мелкодисперсных наносов показано, что седиментационные процессы играют важную роль в самоочищении речной воды.

Ключевые слова: русловой процесс; мелкодисперсные наносы; скорость осаждения; русловые отложения; техногенные взвеси; силы сцепления; кислородный режим; концентрация загрязнений.

В последние десятилетия в связи с увеличением объема сточных вод, отводимых в реки, все более актуальной становится проблема повышения их самоочистительной способности, особенно в пределах урбанизированных территорий. Несмотря на повышение степени очистки сточных вод, внедрение систем замкнутого водоснабжения, использование и повышение самоочистительной способности рек и водоемов остается актуальным [13].

Традиционно считается, что самоочищение речной воды определяется действием химических и микробиологических процессов, происходящих непосредственно в самой воде [9]. Влияние мелкодисперсных наносов (мелкозернистые пески, илистые и пылеватые частицы), поступающих в речной поток с урбанизированных территорий, на качество воды и состояние речного русла изучено недостаточно.

В составе наносов, поступающих в речные потоки с урбанизированных территорий, доля наносов техногенного происхождения нарастает, что связано с загрязнением поверхностного стока продуктами износа автомобильных шин и асфальтовых покрытий, сопровождающимся попаданием в сток различных нефтепродуктов; твердыми осадками из дымовых выбросов ТЭЦ и промпредприятий, которые смываются поверхностным стоком и, в конце концов, оказываются в речном потоке. Существенная доля техногенных взвесей поступает с технологическими сточными водами промпредприятий и во многих случаях дополняется поступлением из недостаточно

очищенных хозяйственно-бытовых сточных вод. Экспедиционные исследования, выполненные МГСУ на реках Центрального региона России, показали, что в составе русловых отложений доля наносов техногенного происхождения нарастает и в пределах урбанизированных территорий достигает 40–80%.

Техногенные взвеси поступают в водотоки в пределах городов, населенных пунктов из ливневой канализации, водовыпусков промпредприятий, системы водоотведения очистных сооружений, а также с неорганизованным поверхностным стоком, поступающим в малые элементы городской речной сети. При этом наиболее крупные частицы взвеси (обычно песчаные) осаждаются вблизи устьевых участков водовыпусков, в то время как мелкодисперсные взвеси осаждаются медленно и в течение длительного времени находятся в водном потоке во взвешенном состоянии, участвуя в химических и микробиологических процессах, влияющих на качество воды.

СВОЙСТВА МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ВЗВЕСЕЙ ТЕХНОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Анализ взвесей техногенного происхождения в поверхностном стоке и в речной сети г. Москвы, выполненный в [10] показал, что в составе взвесей присутствуют частицы различной крупности и формы с сильно различающейся плотностью и шероховатостью поверхности. Учитывая недоста-

точную изученность влияния формы частиц, их плотности и шероховатости поверхности на скорость осаждения и коэффициент гидродинамического сопротивления частиц, были выполнены экспериментальные исследования с модельными частицами различной формы, плотности и крупности, с различной шероховатостью их поверхности.

Известно, что для шарообразных частиц скорость осаждения w определяется зависимостью

$$w = 3.62 \sqrt{\frac{\rho_T - \rho}{\rho}} \sqrt{\frac{d_{ш}}{C_D}}, \quad (1)$$

где ρ , ρ_T – плотность воды и частицы; $d_{ш}$ – диаметр шарообразной частицы; C_D – коэффициент сопротивления, зависящий от формы частицы и числа Рейнольдса $Re = \frac{w d_{ш}}{\nu}$.

При $Re_S > 10^3$ в зоне автомодельности для шарообразных частиц $C_{Da} = 0.44$.

С учетом известного решения Стокса [17], справедливого при малых числах Рейнольдса, была предложена следующая аппроксимационная зависимость для частиц шарообразной формы [3]:

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{1}{2} C_{Da} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{100}{C_{Da} Re}} \right), \quad (2)$$

где первое слагаемое характеризует вклад сопротивления трения.

Для учета влияния формы частицы на ее сопротивление используется параметр формы f , характеризующий отношение площади поверхности частицы к поверхности шара, эквивалентного частице по объему,

$$f = \left(\frac{d_S}{d_{ш}} \right)^2. \quad (3)$$

Для частиц естественного и техногенного происхождения величина f изменяется в достаточно широких пределах

окатанные без резких выступов (глина, песок, шамот, алюмосиликат, свинцовый блеск), $f \leq 1.2$;

острозернистые, продолговатые (неокатанный песок, антрацит, искусственный графит), $1.2 < f \leq 1.5$;

частицы с резко выраженной продолговатой формой (кокс, сланец, угольная пыль), $1.5 < f \leq 4$.

Можно предположить, что при одинаковом весе сопротивление трения частицы будет увеличиваться с ростом f , и при малых числах Рейнольдса коэффициент сопротивления частицы произвольной формы можно приближенно определить как

$$C_S = \frac{24}{Re} f. \quad (4)$$

В зоне автомодельности по числу Re влияние формы частицы предлагается учитывать коэффициентом формы

$$k_\Phi = \frac{C_{Sa}}{C_{Da}}, \quad (5)$$

где C_{Sa} – коэффициент сопротивления реальной (не шарообразной) частицы в зоне автомодельности.

Анализ опытных данных разных авторов [5, 14, 15] показал, что связь между величинами f и k_Φ выражается простой зависимостью

$$k_\Phi = 8(f - 1) + 1, \quad (6)$$

которая требует дополнительного анализа и объяснения.

Рассматривая второе слагаемое под радикалом в зависимости (2) как комплекс, отражающий влияние сопротивления трения и сопротивления формы, можно предположить, что с учетом установленных связей для частиц произвольной формы формула (2) может быть записана в виде

$$C_S = \frac{24}{Re} f + 0.22 k_\Phi \left(1 + \sqrt{1 + \frac{220 f}{Re k_\Phi}} \right). \quad (7)$$

Результаты исследований сопротивления цилиндрических тел различного диаметра и длины [3] (рис. 1) показали, что для мелкодисперсных наносов в зависимости (7) преобладает роль первого слагаемого, а при значениях $\frac{Re f}{k_\Phi} > 5$ становится заметной роль второго слагаемого.

Дополнительный фактор, влияющий на процесс осаждения взвесей в речном потоке – турбулентность водного потока [12], взаимодействие которой с частицами взвеси приводит к повышению концентрации наносов вблизи дна, где интенсивность турбулентности снижается. Окончательная фаза осаждения взвесей завершается в вязком подслое, где скорость течения невелика, роль турбулентности незначительна или отсутствует вовсе, что позволяет применить для этой фазы осаждения результаты, приведенные выше.

ХЛОПЬЕОБРАЗОВАНИЕ ПРИ ОСАЖДЕНИИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ВЗВЕСЕЙ

В настоящее время принято считать, что вокруг твердой частицы (например, двуокиси кремния SiO_2 , из которой, как известно, состоит песок) образуется двойной электрический слой из ионов [4], образующихся вследствие ионизации твердого вещества и выделения иона водорода из молекул воды. По оценкам [6] толщина слоя связанной воды $\delta_{пр}$ составляет 1–2 микрона. По мере осаждения частиц в водном потоке концентрация C в придонной зоне потока нарастает, и гравита-

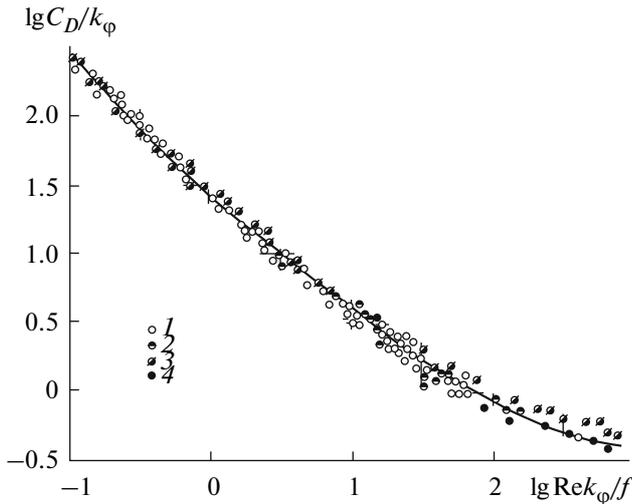


Рис. 1. Коэффициент сопротивления несферических частиц: 1–2 – медные и капроновые цилиндры, 3–4 – данные Шлихтинга и Ричардса.

ционное давление может преодолеть силы отталкивания ионов, связанных с твердой частицей. При сближении частиц на расстояние, меньшее, чем $\delta_{пр}$, отталкивание между частицами сменяется притяжением. Легко установить, что при равномерном распределении шарообразных частиц в объеме расстояние между ними зависит от их крупности и относительной объемной концентрации C .

$$\delta = d \left(\frac{1}{\sqrt[3]{C}} - 1 \right).$$

При $\delta < \delta_{пр}$ возникновение притяжения между частицами может приводить к хлопьеобразованию и далее к структурированию водогрунтовой смеси. Хлопьеобразование и структурирование водогрунтовой смеси может происходить лишь при весьма высоких относительных объемных концентрациях $C > 0.3-0.5$, т.е. непосредственно вблизи дна.

СЦЕПЛЕНИЕ В МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ РУСЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ

При сближении частиц в процессе их осаждения на расстояние $\delta < \delta_{пр}$ возникающее между ними притяжение приводит к появлению сил сцепления между частицами, которые могут влиять на устойчивость грунтов к размыву.

Диполи молекул воды, связанные силами притяжения с частицей, находятся в так называемой “потенциальной яме”. Для того чтобы поднять энергию молекулы связанной воды от уровня “потенциальной ямы” до уровня энергии молекул свободной воды, необходимо выполнить работу

против сил сцепления между частицами. Анализ электродинамического взаимодействия между шарообразными частицами [1] позволил установить факторы, влияющие на величину сцепления, и определить, что напряжение сцепления обратно пропорционально диаметру частиц. При средних значениях влияющих факторов расчетная зависимость для напряжения сцепления оказалась близкой к экспериментальной формуле [11]

$$\sigma_c = 5 \times 10^{-3} \frac{1}{d} \text{ Н/м}^2. \quad (8)$$

Напряжение от веса частицы, возникающее в “пятнах контакта” ее с окружающими частицами, можно определить следующим образом:

$$\sigma_G = \frac{g(\rho_T - \rho) \frac{\pi d^3}{6}}{2 \frac{\pi d^2}{4}} = \frac{g}{3} (\rho_T - \rho) d. \quad (9)$$

Сопоставление напряжений σ_c и σ_G позволило установить, что для кварцевых частиц

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_G} \cong 3 \times 10^{-7} \frac{1}{d^2}, \quad (10)$$

где d – диаметр частицы, м; размерность числового коэффициента m^2 .

Это соотношение показывает, что силы сцепления соизмеримы с весом частиц при $d < 0.5$ мм и должны учитываться при расчетах устойчивости грунтов к размыву. Выражение (10) позволяет также количественно связать верхнюю границу мелкозернистых грунтов с частицами крупностью $d = 0.1$ мм, при которой вес частиц составляет не более 3% от силы сцепления и может не учитываться при расчетах устойчивости частиц к размыву. При $d > 3$ мм силы сцепления составляют не более 3% от веса и могут не учитываться при расчетах устойчивости частиц к размыву. Такие грунты могут считаться крупнозернистыми. В интервале крупности зерен $0.1 < d < 3$ мм необходим учет, как сил веса, так и сил сцепления.

Приведенная выше зависимость (8) была экспериментально установлена лишь для ограниченного диапазона крупности частиц от 0.09 до 0.15 мм и оценена как “грубо приближенная” [11]. В связи с этим были выполнены измерения сцепления в широком диапазоне изменения крупности песчаных частиц с использованием метода шарового штампа [16]. Экспериментальные исследования проводились на однородных кварцевых песках при различной крупности частиц, изменяющейся в широких пределах – от 0.07 мм до 1.25 мм и различном их влагосодержании. Нагрузка на штамп изменялась от 50 до 200 г.

По результатам измерений сил сцепления в водонасыщенных песчаных грунтах различной крупности при различных нагрузках (рис. 2) была

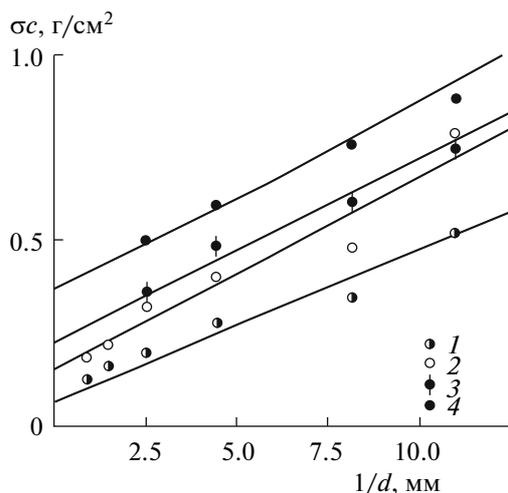


Рис. 2. Сцепление в мелкозернистых грунтах различной крупности при различной нагрузке на штамп: 1 – $P = 50$, 2 – $P = 100$, 3 – $P = 150$, 4 – $P = 200$ г.

установлена обратно пропорциональная зависимость сил сцепления от диаметра частиц грунта, что качественно согласуется с результатами измерений [11]. По полученным данным определено также существенное возрастание сил сцепления с увеличением нагрузки на штамп. Поскольку, как отмечается в [16], сцепление существенно зависит от влагосодержания, возникло предположение, что с увеличением нагрузки на штамп уменьшается локальное влагосодержание в зоне воздействия штампа на грунт. Специальное исследование влагосодержания в этой зоне, выполненное кондуктометрическим способом, показало, что объемное влагосодержание в грунте в рабочем диапазоне нагрузок на штамп изменяется незначительно – уменьшается на 3–4%.

Измерения сцепления методом шариковой пробы в песчаном грунте при различном общем влагосодержании показали, что при сохранении существенной зависимости сцепления от нагрузки на штамп влияние изменения общей влажности на силу сцепления невелико. По-видимому, возрастание сил сцепления с увеличением нагрузки на штамп связано не столько с уменьшением влагосодержания во всей зоне действия штампа, сколько с некоторым выдавливанием под нагрузкой частично связанной воды из зон контакта частиц грунта, что может существенно увеличивать силы сцепления. Учитывая, что в водных потоках частицы верхнего слоя грунта, подверженного размыву, не несут нагрузки, предлагается их сцепление с нижележащим слоем грунта определять экстраполяцией экспериментальных графиков $\sigma_c = f(P)$ к значению $P = 0$. Экстраполяция не вызывает затруднений в связи с линейным характером зависимости $\sigma_c = f(P)$ (рис. 3). Сопо-

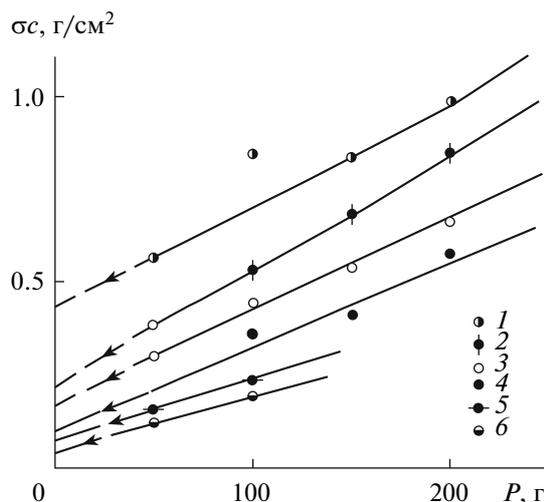


Рис. 3. Определение сцепления для частиц верхнего слоя грунта: 1 – $d = 0.07-0.1$, 2 – $d = 0.1-0.14$, 3 – $d = 0.14-0.3$, 4 – $d = 0.3-0.49$, 5 – $d = 0.49-0.8$, 6 – $d = 0.8-1.25$ мм.

ставление сцепления σ_c (при $P = 0$), установленного по предлагаемой методике для водонасыщенных мелкодисперсных грунтов различной крупности (рис. 4), с формулой Ц.Е. Мирцхулавы (8) обнаруживает удивительную их сходимость в широком диапазоне изменения крупности зерен наносов – от 0.07 мм до 1.25 мм.

Полученные данные о факторах, влияющих на сцепление в водонасыщенных мелкодисперсных грунтах, а также зависимость (8), подтвержденная экспериментально, могут быть использованы, в частности, при обосновании гидравлических режимов для поддержания в благоприятном экологическом состоянии речных русел на урбанизированных территориях.

ТЕХНОГЕННЫЕ ВЗВЕШЕННЫЕ НАНОСЫ И КИСЛОРОДНЫЙ РЕЖИМ РЕЧНОГО ПОТОКА

Мелкодисперсные техногенные взвеси, поступающие в водотоки с урбанизированных территорий, адсорбируют на своей сильно развитой поверхности значительное количество загрязняющих примесей различной физической и химической природы. Под воздействием химических и микробиологических процессов загрязняющие примеси трансформируются, распадаются, окисляются, образуют новые соединения. Окислительные химические и микробиологические процессы происходят за счет кислорода, растворенного в речной воде, вследствие чего содержание кислорода снижается. Наиболее активно трансформация загрязняющих веществ, особенно органических, осуществляется водной микрофлорой, для которой они служат питательной средой,

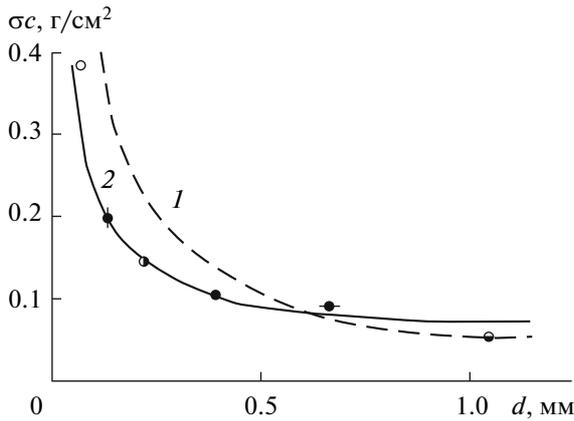


Рис. 4. Сцепление в верхнем слое грунта для частиц различной крупности: 1 — расчет по зависимости Ц.Е. Мирцхулавы [13], 2 — экспериментальные данные.

причем микроорганизмы закреплены на частицах взвеси [9]. Поэтому движение частиц взвеси в водном потоке, влияющее на массообменные процессы с окружающей жидкостью, в том числе и на приток кислорода в зону жизнедеятельности микроорганизмов, с этой точки зрения представляет дополнительный интерес.

Учитывая очевидную связь между количеством загрязняющих веществ в воде и потреблением кислорода на их окисление под воздействием микроорганизмов, утилизирующих эти вещества, в практике очистки сточных вод в качестве обобщенной количественной характеристики их загрязненности обычно принимают биохимическое пятисуточное потребление кислорода (БПК₅) [9], затрачиваемое на окисление загрязнений. Если характеризовать содержание органических загрязнений в речной воде в начальный момент времени величиной БПК₅ = L₀, а в момент времени t через L_t, то можно записать

$$L_t = L_0 - x_t,$$

где x_t — количество кислорода, потребленного за время t.

При этом скорость потребления кислорода равна

$$\frac{dx_t}{dt} = -K'_1(L_0 - x_t), \quad (11)$$

где K'₁ — константа скорости потребления кислорода в условиях его неограниченного запаса, характеризующая темп снижения содержания загрязняющих веществ в воде.

Интегрируя это уравнение, получаем

$$-\ln(L_0 - x_t) = K'_1 t + C.$$

Постоянную интегрирования находим из граничных условий t = 0, x_t = 0, тогда

$$C = -\ln L_0.$$

При этом решение принимает следующий вид

$$\frac{x_t}{L_0} = 1 - e^{-K'_1 t}. \quad (12)$$

Иногда это решение записывают иначе

$$\frac{x_t}{L_0} = 1 - 10^{-K_1 t}, \quad (13)$$

где K₁ = K'₁ lg e.

Опыты показали, что константа скорости потребления кислорода слабо возрастает с ростом температуры

$$K_1 = K_{1(20^\circ\text{C})} \times 1.047^{T-20^\circ\text{C}}.$$

В среднем K₁ может быть принята равной 0.1. Выражение (13) характеризует уменьшение содержания загрязняющих веществ в воде, которое характеризуется количеством кислорода, необходимым для их окисления.

Следует еще раз подчеркнуть, что причина снижения количества загрязняющих веществ данным анализом не вскрывается, и было бы неверно связывать ее только с окислением примесей.

Экспериментально доказано [7], что константа потребления кислорода K₁ в водотоках зависит от гидродинамических характеристик водного потока. В речном потоке коэффициент K₁, характеризующий темп снижения содержания загрязняющих веществ в воде, увеличивается в 25–30 раз по сравнению с данными, полученными при отсутствии движения воды, и может достигать значений 2.5–3.0. Следует отметить, что процессы превращения органических веществ в естественных водных объектах всегда конкретны, зависят от многих факторов, и их исследования, по существу, лишь начинаются. На рис. 5 представлено изменение величины K₁ вдоль речного потока от места выпуска сточных вод, полученное в результате натуральных исследований на малых реках. Данные показывают, что значение K₁ не остается постоянным, а изменяется с течением времени t = x/V (т.е. с расстоянием вдоль речного потока, отнесенным к скорости течения). Это указывает на то, что полученное выше решение не отвечает реальным процессам, приводящим к снижению концентрации загрязняющих примесей в речном потоке. И.Д. Родзиллер [13] объясняет непостоянство K₁ причинами чисто биохимического характера, предлагая использовать для описания процесса

трансформации загрязняющих веществ так называемое бимолекулярное уравнение

$$\frac{dx_t}{dt} = K(L_0 - x_t)^2. \quad (14)$$

В условиях водотока дополнительное влияние оказывает поступление кислорода в водный поток, перемешивание водных масс, процессы диффузии примесей, коагуляция и осаждение взвесей и т.п.

В связи с этим экспериментально исследовался процесс растворения атмосферного кислорода в воде при различном его дефиците, в статических условиях и при перемешивании водных масс. Содержание кислорода измерялось прибором Эко-тест-2000. Дефицит кислорода в воде создавался растворением в ней различных количеств добавки $MnCl_2 + (NaOH + HI)$, связывающей кислород.

Лабораторные исследования растворения кислорода в покоящейся и движущейся жидкости, выполненные в МГСУ, позволили установить влияние начального дефицита, площади контакта и скорости движения воды на процесс растворения кислорода.

Потребление кислорода часто приводит к уменьшению его концентрации в воде настолько, что поступление кислорода через свободную поверхность потока не может восполнить его расход. При этом возникает дефицит кислорода, который может быть выражен в мг/л, либо в долях полного дефицита. При отсутствии потребления кислорода в воде имеющийся начальный дефицит кислорода снижается вследствие поступления кислорода через водную поверхность. Изменение дефицита кислорода в этом случае может быть описано зависимостью [4]

$$\frac{D_t}{D_0} = 10^{-K_2 t}, \quad (15)$$

где D_0 – начальный дефицит кислорода; D_t – дефицит кислорода в момент времени t ; K_2 – “константа” скорости растворения кислорода, зависящая от температуры, состояния водной поверхности и интенсивности перемешивания водных масс. Среднее значение константы K_2 обычно принимается равным 0.2.

Результаты выполненных исследований показали, что растворение кислорода во всех случаях удовлетворительно описывается уравнением (15). Однако коэффициент K_2 изменяется в широких пределах – от 0.3 до 2.0. Анализ экспериментальных данных показал, что для покоящейся жидкости K_2^0 возрастает как с увеличением поверхности контакта воздух – вода ω_k , так и с увеличением начального дефицита D_0 . Данные по изменению значений K_2^0 , полученные экспериментально при

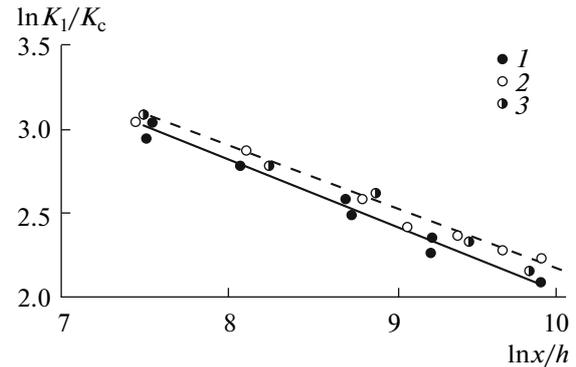


Рис. 5. Изменение константы потребления кислорода по длине водотока: 1 – р. Лейвойги, 2 – р. Раздан, 3 – р. Клязьма.

$t = 20^\circ C$, приведены на рис. 6. Они аппроксимируются соотношением

$$K_2^0 \approx \frac{2D_0}{h}, \quad (16)$$

где h – глубина водного объема.

Таким образом, приведенное выше значение $K_2 = 0.2$, по-видимому, относится к сравнительно небольшим дефицитам кислорода и большим глубинам водоема.

Выполненные экспериментальные исследования, а также анализ данных других авторов показали, что коэффициент скорости растворения кислорода K_2 возрастает как с увеличением скорости течения, так и с уменьшением глубины потока (рис. 7). Это позволяет предположить, что параметр, определяющий процесс растворения кислорода, – число Фруда. Основанием этому служат представленные данные, а также известный факт, что для открытых потоков число Фруда – параметр подобия процессов переноса в открытых потоках.

При одновременном действии процесса потребления и процесса растворения кислорода скорость изменения дефицита кислорода выражается следующим балансовым уравнением

$$\frac{dD}{dt} = K_1 L_t - K_2 D_t, \quad (17)$$

в результате интегрирования которого получается следующее уравнение:

$$D = \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (10^{K_1 t} - 10^{K_2 t}) \times 10^{-t} + D_0^{-K_2 t}. \quad (18)$$

Ход изменения содержания кислорода в воде при одновременном потреблении и растворении кислорода обнаруживает характерный минимум, отвечающий створу (или времени) наибольшего загрязнения. При средних значениях констант время наибольшего загрязнения воды составляет ~4 сут с момента начала процесса. Следует отме-

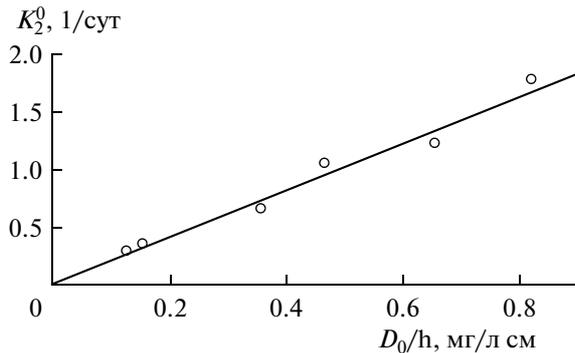


Рис. 6. Экспериментальные значения K_2^0 , полученные при $t = 20^\circ \text{C}$.

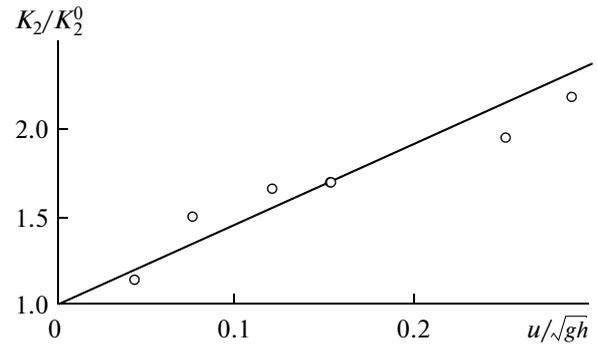


Рис. 7. Зависимость коэффициента скорости растворения кислорода в водном потоке K_2 от числа Фруда.

тить, что эти соотношения, так же как и приведенные ранее, по сути отражают также и вклад процесса осаждения взвесей, и влияние загрязненных донных отложений на кислородный баланс водотока.

СОРБИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ПРИМЕСЕЙ МЕЛКОДИСПЕРСНЫМИ НАНОСАМИ КАК ФАКТОР ОЧИЩЕНИЯ ВОДЫ И ЗАГРЯЗНЕНИЯ РУСЛА

Как уже отмечалось, простые аналитические модели процессов самоочищения речной воды от загрязняющих примесей не объясняют весьма быстрое протекание этих процессов, что, кстати говоря, положено в основу традиционной технологии аэробной очистки сточных вод на очистных сооружениях, в рамках которой продолжительность процесса составляет 6–8 ч. Вместе с тем исследования [8] показали, что распад многих органических примесей происходит весьма медленно, в течение нескольких лет. Такие значительные различия позволяют предположить, что на ход рассматриваемых процессов оказывает существенное влияние сорбция загрязнений мелкой взвесью с последующим ее осаждением, что в приведенном выше анализе не учитывается. Это предположение согласуется с приведенными выше результатами [7], полученными на малых реках, и данными исследований МГСУ, которые позволили обнаружить характерные признаки техногенного загрязнения русловых грунтов на расстоянии 10–15 км ниже городских территорий, что согласуется с протяженностью участков осаждения мелкодисперсных наносов [2]. Сорбирующая способность мелкой взвеси объясняется прежде всего чрезвычайно развитой их поверхностью. Так, 1 см^3 взвеси, измельченной до частиц крупностью в 10^{-3} мм , имеет поверхность 6 м^2 . Существенную роль в процессе сорбции играет “мозаичная” структура поверхности, неоднородность ее физических и химических свойств [13]. И.Д. Родзил-

лер отмечает, что мелкодисперсная взвесь минерального происхождения может обеспечивать удаление из воды диссоциирующих электролитов, веществ, находящихся в ионном состоянии, молекул органических веществ. Кинетика сорбционного процесса может быть описана уравнением первого порядка, описывающего изменения концентрации примесей в воде

$$\frac{dc}{dt} = -k_c c, \quad (19)$$

c – концентрация примеси в воде.

Форма (19) аналогична уравнению (11), описывающему изменение скорости потребления кислорода в связи с самоочищением воды, что указывает на необходимость совместного рассмотрения этих процессов.

Интеграл уравнения (19) с граничным условием $t = 0, c = c_0$ имеет вид

$$c = c_0 e^{-k_c t}, \quad (20)$$

где k_c – коэффициент сорбции, зависящий от удельной поверхности сорбента, способности вещества к сорбции, скорости обратного перехода с поверхности сорбента в воду.

Значение k_c обычно определяется экспериментально. При выводе предполагается, что, кроме концентрации c , все остальные параметры процесса сохраняются постоянными.

Весьма важное обстоятельство – зависимость коэффициента сорбции от концентрации мелкодисперсной взвеси c_m

$$k_c = k'_c c_m, \quad (21)$$

тогда

$$c = c_0 e^{-k'_c c_m t}, \quad (22)$$

откуда

$$k'_c = \frac{1}{tc_m} \ln \frac{c_0}{c}. \quad (23)$$

Следовательно, кинетика процесса сорбции будет существенно изменяться по мере осаждения взвеси, все более отклоняясь от уравнения первого порядка. Этот вывод качественно согласуется с характером изменения БПК в водотоках, что отмечалось в [1], где в связи с этим используется более сложное уравнение (14) для описания процесса трансформации загрязняющих веществ в воде.

Нерастворимые загрязняющие вещества органического происхождения, соединения тяжелых металлов, нефтепродукты, попадая в водоток, изменяют биоту и осаждаются на участках большей или меньшей протяженности в зависимости от степени дисперсности и гидравлической ситуации на участке водотока в месте поступления загрязняющих веществ [18]. Осаждение нефтепродуктов связано с их эмульгированием и сорбированием на частицах взвеси.

Таким образом, подтверждается роль сорбционных и седиментационных процессов в самоочищении воды, а процессы массообмена между загрязненными донными отложениями и речной водой требуют исследования.

При выпадении взвесей на дно водотока интенсивность их окисления снижается, что связано как с сокращением удельной поверхности при консолидации частиц в донных отложениях, так и с уменьшением интенсивности турбулентного перемешивания жидкости в непосредственной близости от дна. Растворенный в воде кислород изымается верхним слоем осадков и не поступает в более глубокие слои отложений. Поэтому активный аэробный процесс окисления примесей сменяется здесь вялотекущим анаэробным процессом. Тем не менее, в периоды высоких половодий, когда происходит подвижка донных наносов, их взвешивание и распределение в толще водного потока, окислительные процессы интенсифицируются, что вызывает дефицит кислорода, и в некоторых случаях является одной из причин гибели рыбы в периоды половодий.

Неконсервативные вещества, сорбированные взвесями, трансформируются в процессе разнообразных химических и микробиологических превращений, происходящих в донных отложениях. В результате таких превращений могут образовываться более опасные продукты, чем исходные реагирующие вещества. При этом концентрации вновь образующихся растворимых и легкоподвижных продуктов распада в грунте оказываются значительно выше концентраций этих веществ в воде. Таким образом, в грунте создаются источники вторичного загрязнения речной воды продуктами распада. Вторичное загрязнение может заметно ухудшать качество речной воды в течение длительного периода после прекращения

сбросов сточных вод, перехвата и очистки загрязненного поверхностного стока.

Выполненные исследования массообменных процессов между загрязненными донными отложениями и речной водой и их влияние на кислородный режим водотока позволили получить интересные и важные результаты, которые составят предмет отдельной статьи.

ВЫВОДЫ

Сопоставлением уравнений кинетики окислительных и сорбционных процессов в водной среде с привлечением данных натуральных измерений на реках подтверждено предположение о том, что самоочищение речной воды происходит в основном за счет сорбции загрязнений мелкодисперсными взвесями, осаждение которых в речное русло приводит к изменению физико-механических свойств русловых отложений.

Приведены данные лабораторных исследований гидродинамического сопротивления частиц различной крупности, плотности и формы при их осаждении. Предложена зависимость, позволяющая учесть влияние этих факторов на коэффициент сопротивления частиц.

Исследовано условие хлопьеобразования при осаждении взвесей, показано, что этот процесс возможен лишь в непосредственной близости от дна в зоне высоких концентраций взвеси.

Приведены результаты лабораторных исследований сцепления, возникающего между частицами мелкой взвеси в водонасыщенном слое донных отложений. Полученные опытные данные подтвердили приемлемость экспериментальной формулы Ц.Е. Мирцхулавы для расчета сцепления и существенно расширили область ее применения при прогнозировании размыва русловых грунтов.

Исследование процесса растворения кислорода в покоящейся жидкости и при ее движении позволило выявить характер и степень влияния глубины потока и скорости течения на процесс растворения кислорода. На основе опытных данных предложены зависимости для учета этого влияния при прогнозировании кислородного режима водотоков.

Результаты исследований, приведенные в статье, подтверждают важную роль в самоочищении воды сорбирования загрязнений частицами мелкой взвеси с последующим осаждением их на дно и формированием слоя загрязненных русловых отложений. Полученные данные полезны при расчете осаждения частиц техногенного происхождения, для определения условий размыва слоя отложений с учетом сцепления, а также при прогнозировании кислородного режима водоемов и водотоков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Боровков В.С.* Природа сил сцепления в водонасыщенных грунтах // Сб. тр. МИСИ. М., 1978. С. 33–40.
2. *Боровков В.С.* Руслые процессы и динамика речных потоков на урбанизированных территориях. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 286 с.
3. *Боровков В.С., Майрановский Ф.Г.* Аэрогидродинамика систем вентиляции и кондиционирования воздуха. М.: Стройиздат, 1978. 115 с.
4. *Воюцкий С.С.* Курс коллоидной химии. М.: Химия, 1964. 574 с.
5. *Горбис З.Р.* Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков. М.: Энергия, 1970. 399 с.
6. *Дерягин Б.В.* Теория устойчивости коллоидов и тонких пленок. М.: Наука, 1986. 205 с.
7. *Казарян Б.Г.* О некоторых особенностях процессов смешения и самоочищения водотоков в условиях Армянской ССР // Докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. по охране поверхностных и подземных вод. Таллин, 1967. С. 73–78.
8. *Каплин В.Т., Семенченко Л.В., Иванов Е.Г.* Распад фенольной смеси в природной воде (моделирование) // Гидрохим. материалы. 1968. Т. 46. С. 199–203.
9. *Карюхина Т.А., Чурбанова И.Н.* Химия воды и микробиология. М.: Госстройиздат, 1983. 168 с.
10. *Маркова И.М., Боровков В.С.* Характеристики русловых отложений и геоэкология водотоков на урбанизированной территории. // Матер. Третьей междунар. (VIII традиционной) науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и докторантов “Строительство – формирование среды жизнедеятельности”. М.: Изд-во МГСУ, 2005. С. 68–72.
11. *Мирицхулава Ц.Е.* Размыв русел и методика оценки их устойчивости. М.: Колос, 1966. 177 с.
12. *Михайлова Н.А.* Перенос твердых частиц турбулентными потоками воды. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 232 с.
13. *Родзиллер И.Д.* Прогноз качества воды водоемов-приемников сточных вод. М.: Стройиздат, 1984. 262 с.
14. *Романков П.Г., Курочкина М.И.* Гидромеханические процессы в химической технологии. Л.: Химия, 1974. 286 с.
15. *Романовский В.В.* Изучение скорости осаждения крупных наносов // Тр. ГГИ. 1966. Вып. 132. С. 90–109.
16. *Цытович Н.А.* Механика грунтов. М.: Высш. шк., 1979. 272 с.
17. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. 742 с.
18. *Brekhovskikh V.F., Debolsky V.K., Vishnevskaya G.N., Zolotareva N.S.* Erosion of cohesive bottom sediments: The influence of benthos // J. of Hydraulic Res. 1991. V. 29. № 2. P. 149–160.