

УДК 502.36

*А.В. Остякова, П.Б. Казан***ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИНЖЕНЕРНЫХ
МЕРОПРИЯТИЙ
ПО РЕГУЛИРОВАНИЮ СТОКА
ВОДЫ, ПЕРЕФОРМИРОВАНИЮ
РУСЛА И ЕГО ОЧИСТКЕ
ОТ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ДОННЫХ
ОТЛОЖЕНИЙ**

Рассмотрены некоторые аспекты перестроения донного рельефа при взаимодействии между открытым водным потоком и деформируемым руслом, уточнены физическое представление и аналитические зависимости, характеризующих взаимодействие потока и русла на начальной стадии формирования донного рельефа для прогнозирования эффективности инженерных мероприятий по направленному регулированию речного стока, перестроению русла и его очистке от загрязненных донных отложений.

Ключевые слова: экологическое прогнозирование, русловые процессы, перестроение рельефа, открытые водотоки, кинематические и динамические характеристики русловых потоков.

Водные объекты в значительной мере формируют экологическую структуру города, в свою очередь, урбанизированные территории в большой степени определяют требования к внешнему виду и режимам водных объектов. Городские водотоки выполняют две основные функции. С одной стороны, они являются элементами городской водоотводящей системы, обеспечивающими водоотведение и водоочистку, в этом случае к ним предъявляются требования очистки проходящей через них воды. С другой стороны, они являются самостоятельными природными объектами, используемыми в различных целях и являющимися самостоятельными элементами городской инфраструктуры и природного комплекса, в этом случае они должны иметь экологически благополучное состояние, в них должна полноценно функционировать экологическая система, обеспечивающая требуемые санитарные нормы и возможность функционального использования, они должны выполнять функцию природных «коридоров».

Экологическое состояние водных объектов в городах при строительстве в настоящее время, как правило, ухудшается из-за нарушения формирования стока, изменения температурного, химического режимов, а также различных типов загрязнения воды (например, сточные воды, снеготаяние и др.) и, как следствие, прогрессирующего заиления речных русел. Особенно это ощущается в настоящее время, когда открытые водотоки находятся под возрастающим слабоконтролируемым и многоплановым антропогенным воздействием.

УДК 502.36

*A. V. Ostyakova, P. B. Kagan***ECOLOGICAL ASPECTS
OF ENGINEER ACTIVITY
TO RUNOFF CONTROL
OF WATER, CHANNEL
REFORMING
AND ITS CLEANING
OF FOULED BOTTOM
SEDIMENTS**

Some aspects of the base relief reforming are considered by the interaction between the open water and deformable channel. Physical representation and analytic dependences that are characterizes the interaction of stream and channel in the initial phase of the base relief formation are refined to predict the effectiveness of engineer activity for management of water flow, channel reforming and its cleaning of fouled bottom sediments.

Key words: ecological forecast, river bed evolution, relief reforming, open water, kinematic and dynamic characteristics of channel flow.

Эрозионно-аккумулятивные процессы наиболее чутко реагируют на изменения условий поверхностного стока воды, вызванные как климатическими осцилляциями или тектоническими движениями, так и антропогенным воздействием. Центр Русской равнины в последние 300 лет практически не испытывал сколько-нибудь существенных климатических колебаний, и тектоническая ситуация в пределах Русской платформы была стабильной, почти все изменения интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов были антропогенного происхождения. На отдельных участках рек скорость плановых перемещений русла может достигать до нескольких десятков метров в год, а высотные деформации могут составлять несколько десятков сантиметров [1]. В качестве примера, можно привести [2] историю строительства БНС-2 (береговая насосная станция) комбината химических волокон [11], которую сразу же после окончания строительства стало заносить песком. Неучет русловых процессов при строительстве подводного перехода магистрального газопровода через р. Чумыш привело к тому, что на участке этого перехода крупномасштабные берегоукрепительные работы начались уже на следующий год после ввода его в эксплуатацию. Можно также привести массу других примеров русловых процессов, в т.ч. и на урбанизированных территориях.

Водотоки, обеспечивающие водоснабжение крупных городов, обычно являются зарегулированными, их сток изменяется в зависимости от потребностей города. Накопление загрязняющих отложений в русле приводит к ухудшению качества воды, уменьшению пропускной способности речного русла. При изменении водности потока, вызванном территориальным и временным перераспределением стока в связи со срезкой паводков, накоплением весеннего стока либо с дополнительным обводнением для отведения стока, происходит интенсификация процессов размыва на одних участках русла и процессов заиления — на других участках. Этому также способствуют мероприятия, изменяющие кинематические характеристики речного потока, связанные с работами по изменению формы речного русла в градостроительных целях — дноуглублением и расширением русла, его зарастанием. Например, следствием искусственного дноуглубления р. Москвы для улучшения условий судоходства и работы гидротехнических сооружений в пределах города явилось уменьшение скорости течения и интенсификация процессов заиления [3]. В зоне влияния крупных водозаборов происходит изменение структуры водного потока и заиление русла.

Существенным фактором, влияющим на протекание долговременных русловых процессов, является геоморфология речной долины, которая, в свою очередь, тесно связана с геологией базовых пород, в которые врезаются речные русла. Геоморфология речной долины характеризуется различной степенью распластанности, которая, как показали исследования, зависит от физико-механических свойств русловых грунтов и гидравлических характеристик речного потока. В случае если русловые грунты являются несвязными (пески, галечники), темп внутрирусловых переформирований существенно зависит от крупности донного материала и его гранулометрического состава. При более плотном донном материале вес частиц грунта, препятствующий их перемещению водным потоком, возрастает, что приводит к снижению темпа русловых переформирований. Форма частиц донного грунта влияет на взаимное зацепление частиц грунта и поэтому также влияет на условия их подвижки.

Состав руслового аллювия формируется как за счет поступления твердого стока с водосборной площади, так и за счет переработки руслового мате-

риала водным потоком (истирание, дробление), приводящей к уменьшению крупности частиц донного грунта по длине водотока [4]. При хозяйственном использовании водосборных площадей, в т.ч. при вырубке лесов, осушении болотных массивов, распашке земель, состав и количество твердого стока существенно изменяется, что приводит к нарушению сложившегося динамического равновесия между потоком и руслом и, как правило, к преобладанию прогрессирующих процессов заиления. Присутствие в твердом стоке органических загрязнений антропогенного и техногенного происхождения в процессе консолидации осаждающихся наносов приводит к появлению дополнительных сил связности между частицами донного грунта и затрудняет размыв донных отложений водным потоком. Поэтому на городских территориях в водотоках с зарегулированным стоком не обеспечивается самостоятельная очистка русла реки (самопромыв) от загрязненных донных наносов, которые откладывались и накапливались в маловодные годы. Происходит нарушение динамического равновесия системы, резко снижается способность потока к саморегулированию, т.е. нарушается ход руслового процесса.

Как известно, русло, взаимодействуя с потоком воды, в целом составляет единую физическую саморегулирующуюся систему. Поток воды деформирует русло, а развивающийся донный рельеф влияет на пропускную способность, поле скоростей и турбулентность в потоке [5, 6, 7]. Таким образом, происходит формирование русла под воздействием течения (рис. 1).

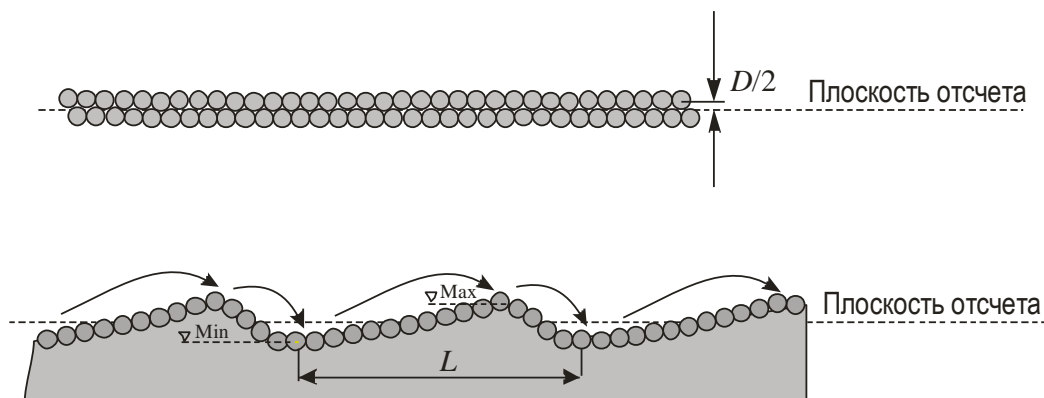


Рис. 1. Схема образования микроформы от гладкого состояния дна

Изменение гидравлического режима водотока может быть связано также с действием естественных факторов (дождевые паводки, кратковременное половодье), а также с факторами антропогенного и техногенного характера (санитарные попуски, сбросы из водохранилищ, частичное опорожнение водохранилищ при разрушении гидравлических сооружений и ограждающих дамб). Весьма важно прогнозирование взаимодействия потока и русла при гидравлической промывке загрязненных русел на урбанизированных территориях. Такой опыт реализуется на р. Москве в пределах города, когда расход значительно увеличивается лишь на несколько часов в связи с ограниченными запасами воды.

Нарушение динамического равновесия происходит ежегодно во время весенних половодий, когда при одних и тех же расходах на подъеме и спаде половодья мутность потока различная из-за изменения поступления количества взвеси с водосборной площади [9]. Особенно отчетливо такое явление можно наблюдать в городских водотоках, например, в русле р. Москвы в черте города. Характерно быстрое таяние загрязненного снега на территории города, вызывающее нарастание мутности потока воды в период до наступления максимальных расходов воды. «Перегрузка» потока наносами вблизи

мест их поступления в речной поток приводит к тому, что на данных участках преобладают процессы осаждения частиц наносов до тех пор, пока система поток — русло не выйдет на равновесный режим. Понимание закономерностей движения речных наносов важно для исследования вопросов руслового процесса (взаимодействия руслового потока и его ложа, а также для прогнозирования взаимодействия потока и русла). Несоответствие расхода наносов деформациям русла приводит к нарушению динамического равновесия системы поток — русло, что, в свою очередь, может привести к деформациям русла реки: заилению, размывам и пр.

Для поддержания нормального хода руслового процесса на урбанизированных территориях приходится осуществлять систему инженерных мероприятий по направленному регулированию стока воды и наносов, а также по очистке русла от загрязненных донных отложений. В составе этих инженерных мероприятий представляется перспективным использование кратковременных залповых попусков (сбросов), которые могут быть осуществлены с помощью имеющихся регулирующих сооружений с использованием в большей или меньшей степени запасов воды, накопленных в водохранилищах системы водообеспечения города. Режим этих залповых попусков, с одной стороны, должен обеспечивать размыв и удаление отложений, накопившихся в русле за период между попусками, а с другой стороны, не должен приводить к чрезмерному расходованию водных ресурсов.

Наиболее перспективными в настоящее время представляются технологии, связанные с кратковременным изменением гидравлического режима водотока, приводящим к перемещению донного грунта и возникновению в русле донных форм (см. рис. 1), параметры которых изменяются во времени в процессе взаимного приспособления потока и русла.

В связи с этим для обоснования оптимальных параметров залповых попусков с учетом обратного влияния внутрирусловых образований на гидравлические характеристики водного потока требуется знание закономерностей руслового процесса при кратковременном взаимодействии потока и русла. Особенности взаимодействия потока и русла на начальной стадии формирования нового донного рельефа связаны с тем, что параметры водного режима (расход воды, продолжительность сброса, глубина и скорость водного потока, форма гидрографа сброса) могут задаваться искусственно для достижения наилучших показателей по очистке русла и экономному расходованию воды.

При осуществлении залповых сбросов стационарный режим потока и русла с небольшим расходом, предшествующим сбросу, достаточно быстро изменяется на другой стационарный режим с постоянным расходом, соответствующим параметрам сброса. Одним из методов удаления загрязнений и использования самоочищающей способности руслового потока является гидравлическая промывка русла, которая производится в половодье путем дополнительного кратковременного попуска из имеющихся водохранилищ. При этом происходит размыв отложений и трансформируется донный рельеф, слабо развитый вследствие кратковременности попуска.

При залповом попуске, т.е. при относительно кратковременном взаимодействии, рассматриваются, по сути дела, режимы, близкие к критическим, поэтому можно предполагать, что увеличение концентрации взвеси будет сравнительно небольшим, и при анализе ряда гидравлических явлений влияние взвеси можно не учитывать.

Изменения в пределах русла происходят одновременно на всех структурных уровнях руслового процесса, однако масштаб времени их формиро-

вания существенно различен. Дискретная структура руслового процесса позволяет выделить характерные структурные уровни руслового процесса [9], различающиеся масштабами действующих на русло факторов и элементов русла и закономерностями руслового процесса, отвечающими каждому структурному уровню. Наиболее полная классификация структурных уровней руслового процесса приведена Н.С. Знаменской в [6], которая основана на постулатах гидроморфологической теории русловых процессов [10].

В качестве структурных уровней Н.С. Знаменская выделяет движение отдельных частиц, развитие микроформ, затем мезоформ, формирование морфологически однородных участков рек и речных систем и указывает на четкое проявление свойства руслового процесса (эмерджентности): каждый структурный уровень системы развивается по собственному закону, отличному от законов развития других элементов системы [9].

При этом на самых низших структурных уровнях (начальная стадия взаимодействия) рассматривается движение отдельных частиц в потоке (*сальтационное движение* в потоке) и образование так называемых микроформ с размерами порядка нескольких сантиметров, образующихся в течение нескольких секунд (часов), что делает возможным исследование в условиях лаборатории и сопоставление с натурным экспериментом.

К высшим структурным уровням относятся русловые формы, образующиеся в течение нескольких лет, такие как излуины, острова, осередки, т.е. макромасштабные образования. В условиях залповых попусков, половодий, а также для улучшения экологического состояния водотоков при помощи гидравлической промывки переформирование руслового рельефа происходит в течение нескольких часов, что соответствует структурному уровню микроформ на диаграмме (рис. 2).

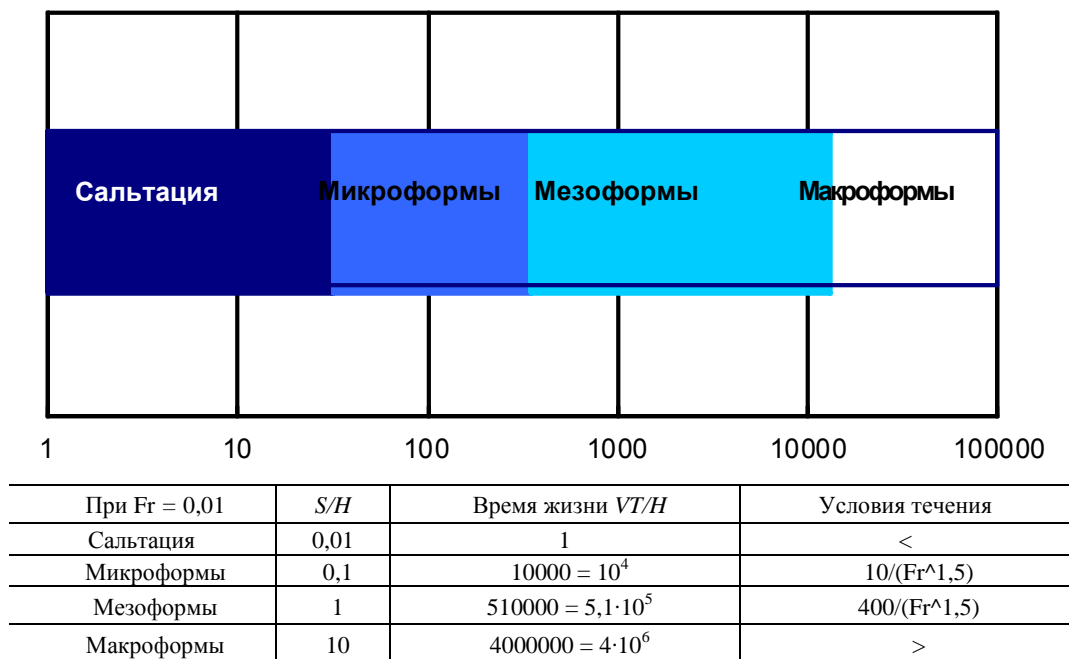


Рис. 2. Диаграмма характерных масштабов различных структурных уровней русловых формирований

При анализе условий взаимодействия потока и русла на начальной стадии формирования донного рельефа, т.е. в течение залпового попуска, длящегося несколько часов, рассматривается изменение динамического равновесия именно на уровне движения отдельных частиц грунта и микроформ. Взаимодействие потока и русла при изменении гидравлического режима во

время залпового попуска до настоящего времени изучено слабо, натурные наблюдения требуют исключительно высокой точности, поэтому наиболее приемлемым для решения этой задачи является метод лабораторного физического моделирования.

При трансформации руслового рельефа происходит обратное воздействие русла на водный поток, при котором изменяются его динамические и кинематические характеристики. До настоящего времени характер и степень *таких* изменений не были изучены, не была выполнена обоснованная оценка пригодности для этих условий, ставших классическими, известных формул Прандтля — Никурадзе. Для анализа взаимодействия между потоком и руслом необходима достоверная информация о распределении скоростей в придонной области потока, которая будет зависеть от характеристик развивающихся микроформ. До настоящего времени такая информация отсутствовала.

Выполненные экспериментально-теоретические исследования позволили установить [11], что при продолжительности попуска, сопоставимой по длительности с длительностью гидравлической промывки, параметры рельефа (высота донных форм S) и параметры водного потока связаны зависимостью:

$$\frac{S}{hi\lambda} = 1600, \quad (1)$$

где h — глубина потока; i — уклон дна потока; λ — коэффициент гидравлического сопротивления русла.

Для практического использования этой зависимости при прогнозе русловых деформаций величина коэффициента гидравлического сопротивления русла, которая входит в эту зависимость, установлена в [13]. В свою очередь, коэффициент λ связан с распределением скоростей в потоке, которое зависит от степени развитости рельефа. Для исследования взаимосвязи между характеристиками течения и сопротивлением русла в открытых потоках с учетом логарифмического характера распределения скоростей по глубине произведено интегрирование профиля скорости (2) для определения средней скорости течения V , коэффициента гидравлического сопротивления λ и взаимосвязи между параметрами логарифмического профиля скорости (параметром Кармана κ и так называемой второй константой турбулентности B). При небольших размерах донных форм русло может работать как гидравлически гладкое. Принимая это во внимание, запишем профиль скорости в форме, используемой для гладкого режима сопротивления:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{u_* z}{\nu} + 5,5, \quad (2)$$

где u — скорость воды в данной точке; u_* — динамическая скорость; z — вертикальная координата точки; ν — коэффициент вязкости.

Интегрирование (2) и учет того, что $\frac{V}{u_*} = \frac{\sqrt{8}}{\sqrt{\lambda}}$, можно получить выражение для изменения параметра Кармана κ в зависимости от λ и B

$$\frac{\sqrt{8}}{\sqrt{\lambda}} = \frac{1}{\kappa} \left(\ln \frac{Vh}{\nu} + \ln \frac{u_*}{V} \right) - \frac{1}{\kappa} + B. \quad (3)$$

В открытых каналах число Рейнольдса определяется по формуле $Re = \frac{4Vh}{\nu}$, отсюда

$$\kappa = \frac{2,31 \lg(\operatorname{Re} \sqrt{\lambda}) - 3,426}{\frac{\sqrt{8}}{\sqrt{\lambda}} - B}. \quad (4)$$

Из (4) можно получить закон сопротивления:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{0,813}{\kappa} \lg(\operatorname{Re} \sqrt{\lambda}) - \frac{1,2}{\kappa} + \frac{B}{\sqrt{8}}. \quad (5)$$

Закон сопротивления (5) можно преобразовать. Так как $\lg \operatorname{Re} \sqrt{\lambda} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{\lambda}} - 0,8 \right)$ [10], то закон сопротивления примет вид

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{1}{\kappa} \left[0,406 \left(\frac{1}{\sqrt{\lambda}} + 0,8 \right) - 1,2 \right] + \frac{B}{\sqrt{8}}. \quad (6)$$

В (6) входят две переменные κ и B . Поэтому для уточнения этой зависимости необходимо уточнить влияние характеристик сопротивления и параметров потока.

В результате интегрирования логарифмического профиля скорости для гладкого режима сопротивления выявлены факторы, влияющие на параметры профиля скорости и на коэффициент гидравлического сопротивления речного русла.

Расчетная зависимость удовлетворительно согласуется с данными экспериментальных измерений. Полученные результаты позволяют повысить точность и надежность экологических прогнозов реформирования открытых водотоков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Остякова А.В. Взаимодействие потока и русла на начальной стадии формирования донного рельефа : дисс. канд. техн. наук: 05.23.16. М., 2005. 183 с.
2. Kondratyev A.N. Distribution of bedload alluviums discharge on width of river at passing mesoform // NATO ARW Stochastic models of hydrological processes and their applications to problems of environmental preservation. Water Problems Institute, Moscow, 1998. P. 236—238.
3. Рябышев М. Г. Гидрологическая характеристика р. Москвы, регулирование стока в ее бассейне и водохозяйственное использование // Процессы загрязнения и самоочищения реки Москвы. М., 1972. С. 3—23.
4. Шамов Г.И. Речные наносы : монография. Л. : Гидрометеиздат, 1954. 345 с.
5. Гришин Н.Н. Механика придонных наносов : монография. М. : Наука, 1982. 160 с.
6. Знаменская Н.С. Донные наносы и русловые процессы : монография. Л. : Гидрометеиздат, 1976. 190 с.
7. Ибад-Заде Ю.А. Движение наносов в открытых руслах : монография. М. : Стройиздат, 1974. 345 с.
8. Коренева В.В. Береговые процессы в нижнем бьефе гидроузла при прохождении волны попуска : автореф. дисс. канд. техн. наук. М., 2000. 24 с.
9. Боровков В.С. Русловые процессы и динамика речных потоков на урбанизированных территориях : монография. Л. : Гидрометеиздат, 1989. 200 с.
10. Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Сниценко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса : монография. Л. : Гидрометеиздат, 1982. 270 с.
11. Алкаева А.Б., Доненберг В.М., Квасова И.Г. Условия предельной устойчивости частиц несвязного грунта на дне турбулентного потока и их оценка // Изв. ВНИИГ. 1978. Т. 126. С. 22—29.

REFERENCES

1. Ostyakova A.V. *Vzaimodeistviye potoka i rusla na nachalnoi stadii formirovaniya donnogo relefa* : diss. kand. tekhn. nauk: 05.23.16 [Interaction of stream and channel in the initial phase of the base relief formation : abstract ... Candidate of Engineering Science: 05.23.16]. Moscow, 2005, 183 p.
2. Kondratyev A.N. Distribution of bedload alluviums discharge on width of river at passing mesoform, *NATO ARW Stochastic models of hydrological processes and their applications to problems of environmental preservation*. Water Problems Institute, Moscow, 1998. P. 236—238.

3. Ryabyshev M.G. *Gidrologicheskaya kharakteristika r. Moskvy, regulirovaniye stoka v eye basseine i vodokhozyaistvennoye ispolzovaniye* [Hydrologic characteristic of the Moscow river, runoff control in the basin and hydroeconomic using]. *Protssesy zagryazneniya i samoochishcheniya reki Moskvy*. Moscow, 1972, pp. 3—23.
4. Shamov G.I. *Rechnye nasosy* [River drift]. Leningrad, 1954, 345 p.
5. Grishin N.N. *Mekhanika pridonnykh nasosov* [Mechanics of bottom drift]. Moscow, 1982, 160 p.
6. Znamenskaya N.S. *Donnyye nasosy i ruslovyye protsessy* : monografiya [Bed load material and river bed evolutions : monograph]. Leningrad, 1976, 190 p.
7. Ibad-Zade Yu.A. *Dvizheniye nasosov v otkrytykh ruslakh* : monografiya [Sediment movement in open channels : monograph]. Moscow, 1974, 345 p.
8. Koreneva V.V. *Beregovye protsessy v nizhnem befe gidrouzla pri prokhozhenii volny popuska* : avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. [Riverside processes in hydraulic project afterbay by passage of release wave : author's abstract of Candidate of Engineering Science]. Moscow, 2000, 24 p.
9. Borovkov V.S. *Puslovyye protsessy i dinamika rechnykh potokov na urbanizirovannykh territoriyakh* [River bed evolutions and dynamics of stream flows in urban lands]. Leningrad, 1989, 200 p.
10. Kondratev N.Ye., Popov I.V., Snishchenko B.F. *Osnovy gidromorfologicheskoi teorii ruslovogo protsessa* : monografiya [Fundamentals of hydrophysiographic theory of river bed evolution : monograph]. Leningrad, 1982, 270 p.
11. Alkayeva A.B., Donenberg V.M., Kvasova I.G. *Usloviya predelnoi ustoichivosti chasits nesvyaznogo grunta na dne turbulentnogo potoka i ikh otsenka* [Limit stability conditions of granular soil entities at erratic flow bed and their characterization]. *Izv. VNIIG*. 1978, T. 126, pp. 22—29.

Поступила в редакцию в августе 2011 г.

Об авторах: **Остякова А.В.**, канд. техн. наук, доц., доцент кафедры гидравлики, Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26;

Каган Павел Борисович, канд. техн. наук, доц., доцент кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве, Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26

About authors: **Ostyakova A.V.**, Candidate of Engineering Science, Assistant Professor of hydraulics department, Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoye highway, 26;

Kagan Pavel Borisovich, Candidate of Engineering Science, Assistant Professor, Assistant Professor of information systems, technology and automation in construction department, Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoye highway, 26