

На правах рукописи

Ляпин Антон Валерьевич

**МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ПЛАВНОИЗМЕНЯЮЩЕМСЯ
ДВИЖЕНИИ В ОТКРЫТЫХ РУСЛАХ**

Специальность 05.23.16 - Гидравлика и инженерная гидрология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2006

Работа выполнена в Московском государственном строительном университете.

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Боровков Валерий Степанович**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **Дебольский Владимир Кириллович**

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник

Родионов Виктор Борисович

Ведущая организация – ОАО «Гипроречтранс»

Защита диссертации состоится 16 мая 2006 г. в 15³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.203.07 при ГОУ ВПО Российском университете дружбы народов по адресу: 117302, г. Москва, ул. Орджоникидзе, дом 3 в аудитории № 348

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке университета дружбы народов по адресу: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, дом 6

Автореферат разослан << 14 >> апреля 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, профессор

В.Н. Иванов

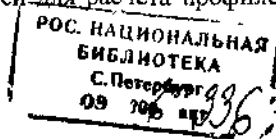
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность выполненной работы определена необходимостью решения ряда перспективных задач, обусловленных интенсивной эксплуатацией водных объектов на урбанизированных территориях, и связанных с влиянием фактора неравномерности на массообменные процессы в открытых руслах, включающих диффузионное разбавление сточных вод, процессы размыва, транспорта и осаждения мелкой загрязненной взвеси.

Цель работы заключается в изучении влияния неравномерности течения на массообменные процессы в открытых руслах в условиях действия факторов урбанизации, разработке рекомендаций по учету неравномерности течения в расчетах диффузионного разбавления сточных вод и прогнозировании русловых процессов.

В число **основных задач исследования** были включены:

- разработка научно обоснованного количественного критерия оценки степени неравномерности течения для открытых потоков;
- анализ и обобщение экспериментальных и аналитических решений по диффузионному разбавлению сточных вод в водотоках;
- проведение аналитических исследований по выявлению характера и степени влияния неравномерности течения на коэффициенты кинематической турбулентной вязкости и турбулентной диффузии;
- разработка инженерной методики расчета разбавления сточных вод, учитывающей степень неравномерности течения воды в открытых водотоках;
- анализ и обобщение аналитических и экспериментальных данных по переносу и осаждению мелкой взвеси в плавноизменяющихся открытых потоках. Получение зависимостей для расчета профилей концентраций и



средней концентрации мелкой взвеси, учитывающие степень неравномерности течения;

- исследование устойчивости к размыву русел, сложенных связными грунтами. Получение зависимостей для неразмывающей скорости для плавноизменяющихся потоков, учитывающих связность грунтов и степень неравномерности течения воды в открытых водотоках;
- изучение возможности переноса данных, полученных для плоских потоков на пространственные течения. Обоснование метода расчета локальных гидродинамических характеристик течения.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Предложен количественный критерий, позволяющий разграничить области плавноизменяющихся и резкоизменяющихся неравномерных открытых потоков, основанный на особенностях распределения касательных напряжений в неравномерных потоках.
- Исследована зависимость коэффициентов турбулентной диффузии и турбулентного перемешивания от параметров, определяющих неравномерность течения в открытых руслах.
- Предложен метод расчета коэффициента турбулентной диффузии для неравновесных процессов разбавления сточных вод в плавноизменяющихся открытых потоках, учитывающий степень неравномерности течения, определяемую уклоном свободной поверхности.
- Получены зависимости для критических скоростей размыва связных грунтов, основанные на особенностях гидравлического трения при неравномерном плавноизменяющемся движении.
- Установлено влияние неравномерности течения на профили концентраций и среднюю концентрацию мелкой взвеси в неравномерных плавноизменяющихся открытых потоках. Предложены формулы для расчета профилей концентраций и средней концентрации мелкой взвеси в

плавнoизменяющихся потоках, учитывающие степень неравномерности течения.

- Выявлены особенности осаждения мелкой взвеси в неравномерных плавнoизменяющихся открытых потоках. Получены зависимости для определения протяженности участков осаждения мелкой взвеси в открытых потоках, основанные на закономерностях гидравлического сопротивления плавнoизменяющегося течения.

- Выявлена применимость универсального распределения скоростей на нормалях к участкам периметра открытых русел с постоянной шероховатостью. Обоснован метод перехода от одномерных моделей русла к расчету локальных гидродинамических характеристик пространственного течения.

Личное участие автора в получении научных результатов, изложенных в диссертации, состоит:

- в разработке общего подхода к решению поставленных задач;
- в разработке методик проведенных исследований;
- в аналитической обработке полученных результатов, формулировке научных положений и выводов;
- в получении количественных данных и новых расчетно-аналитических зависимостей, характеризующих основные закономерности массообменных процессов в открытых плавнoизменяющихся потоках.

Достоверность научных положений подтверждена применением апробированных расчетно-аналитических методов, взаимной согласованностью и непротиворечивостью полученных зависимостей, тщательной проверкой полученных расчетных результатов данными экспериментальных исследований разных авторов, в том числе и данными собственных измерений, выполненных с необходимой точностью.

На защиту выносятся:

- количественный критерий, позволяющий разграничить области плавнойизменяющихся и резкоизменяющихся неравномерных открытых потоков;
- формулы для коэффициентов турбулентного перемешивания и турбулентной диффузии, учитывающие степень неравномерности течения;
- зависимости для критических скоростей размыва связных грунтов, основанные на особенностях гидравлического трения при плавнойизменяющемся движении;
- формулы для расчета профилей концентраций и средней концентрации мелкой взвеси в открытых плавнойизменяющихся потоках;
- зависимости, определяющие длину участков осаждения мелкой взвеси в открытых плавнойизменяющихся потоках, основанные на закономерностях гидравлического сопротивления при плавнойизменяющемся течении;
- результаты экспериментальных исследований распределения скоростей на нормалях к участкам периметра открытых русел с одинаковой шероховатостью;
- результаты использования полученных зависимостей в практических расчетах рассеивающего выпуска сточных вод.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- Вторая международная (VII традиционная) научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и докторантов. - Москва, МГСУ, 2004.
- Международная научно-практическая конференция «Современные технологии в промышленности строительных материалов и стройиндустрии».- Белгород, БГТУ им. В.Г.Шухова, 2005.

- Третья международная (VIII традиционная) научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и докторантов. - Москва, МГСУ, 2005.

Практическая ценность работы состоит в том, что результаты проведенных исследований могут быть использованы при проектировании и строительстве гидротехнических сооружений, при эксплуатации водных объектов. В частности, они используются МЧС ЗАО г.Москвы при оценке концентраций химических опасных веществ в зонах аварийных выбросов в речные потоки, а также в случае аварийных ситуаций, связанных с процессами размыва речных русел.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 работ.

Объем работы. Диссертация изложена на 145 стр. машинописного текста и состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 91 наименования и приложения. В работе содержится 34 рисунка и 6 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, излагаются цель и задачи исследований, показана научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приведены сведения о структуре и объеме работы.

Первая глава посвящена разработке количественного критерия оценки плавной изменяемости течения жидкости, позволяющего выделить область плавноизменяющихся потоков в практических расчетах открытых русел.

Неравномерные плавноизменяющиеся течения, как известно, должны удовлетворять ряду качественных квалификационных признаков, важнейшими из которых являются условия малости кривизны линий тока

и углов между соседними линиями тока. Разграничение плавно и резкоизменяющихся потоков, методы расчета которых существенно различны, требует разработки количественного критерия оценки плавной изменчивости течения жидкости. Обоснование подобного критерия основывалось на учете особенностей распределения касательных напряжений по глубине неравномерных потоков.

Известно, что распределение касательных напряжений по глубине равномерного потока определяется линейной зависимостью

$$\frac{\tau}{\tau_0} = 1 - \frac{y}{h}, \quad \text{или} \quad \bar{\tau} = 1 - \eta, \quad (1)$$

где τ - касательное напряжение в потоке; τ_0 - касательное напряжение на дне потока; h - глубина потока; y - расстояние от дна; $\bar{\tau} = \tau/\tau_0$; $\eta = y/h$.

Данные аналитических и экспериментальных исследований распределения касательных напряжений в открытых руслах при неравномерном плавноизменяющемся турбулентном движении воды (А.Д.Альтшуля, Э.В.Залуцкого и др.) свидетельствуют об их качественном отличии от распределения (1). Было выявлено, что форма профиля касательного напряжения (его вогнутость или выпуклость) определяются характером движения жидкости (ускоренное или замедленное). Под ускоренными потоками здесь и далее будем понимать движение с отрицательным градиентом глубин (dh/dx), к которому относятся течения на участках так называемых «кривых спада». Замедленным потокам соответствует положительный градиент глубин. Эти течения встречаются на участках «кривых подпора» открытых русел.

Было установлено, ускоренные потоки всегда имеют максимум касательного напряжения на дне (рис.1). В замедленных потоках касательное напряжение в зависимости от степени неравномерности течения может достигать максимального значения, как на дне, так и на некотором расстоянии от него.

Для аналитического описания нелинейных профилей касательного напряжения в плавноизменяющихся потоках предлагается использовать полиномиальную аппроксимацию К.К.Федяевского

$$\bar{\tau} = 1 + A\eta - (1 + A)\eta^2, \quad (2)$$

где формпараметр A (параметр неравномерности) в случае открытого потока определяется выражением

$$A = -\frac{\rho g h (i_0 - dh/dx)}{\tau_0}, \quad (3)$$

где i_0 – уклон дна водотока; ρ – плотность воды; g – ускорение свободного падения.

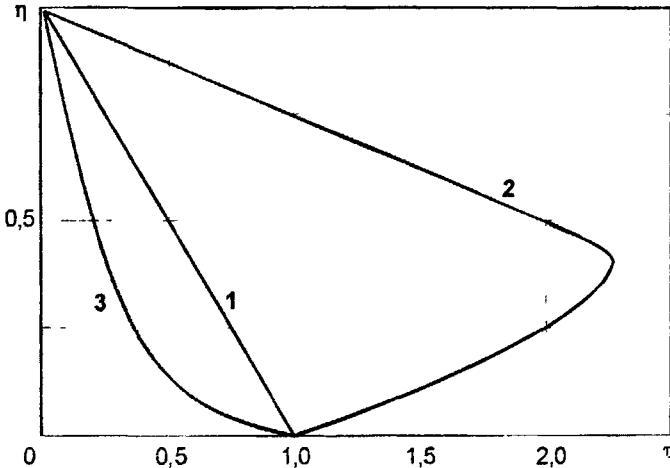


Рис. 1. Характерные эпюры касательных напряжений для открытых потоков по аналитическим и экспериментальным данным (А.Дальтшуля, Э.В.Залуцкого и др.): 1-равномерное; 2-замедленное; 3-ускоренное течения.

Таким образом, форма профиля касательного напряжения определяется значением формпараметра A . Полином (2) определен при $-2 \leq A < \infty$, что следует из условия $\bar{\tau} \geq 0$. В частном случае равномерного течения $A = -1$ и полином (2) приводится к виду (1).

Переменная по глубине величина ε отклонения профиля (2) от линейного закона (1) описывалась выражением

$$\varepsilon = \bar{\tau}_{(2)} - \bar{\tau}_{(1)} = \eta(1 + A)(1 - \eta), \quad (4)$$

где $\bar{\tau}_{(1)}$ и $\bar{\tau}_{(2)}$ - значения $\bar{\tau}$ соответственно по формулам (1) и (2).

Дифференцированием (4) определялось максимальное по глубине открытого потока различие в значениях безразмерных касательных напряжений τ/τ_0 при плавноизменяющемся и равномерном течении. Соотнесение этой разницы к безразмерному касательному напряжению для равномерного потока привело к выражению

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{2}(1 + A). \quad (5)$$

Для среднего в инженерных расчетах 5% - го диапазона отклонения профиля касательного напряжения плавноизменяющихся потоков от линейной зависимости (1) ($|\bar{\varepsilon}| \leq 0,05$) было получено

$$-1,1 \leq -\frac{\rho gh(i_0 - dh/dx)}{\tau_0} \leq -0,9. \quad (6)$$

Таким образом, обозначенный в (6) диапазон изменения «параметра неравномерности» A выявил границы области плавноизменяющихся течений для заданной величины $\bar{\varepsilon}$.

Использование закона сохранения импульса для определения касательного напряжения τ_0 на дне потока привело к зависимости

$$0,9 \leq \frac{J}{J + Fr \frac{dh}{dx}} \leq 1,1, \quad (7)$$

где $J = i_0 - dh/dx$.

Полученные количественные соотношения (6) и (7) позволяют разграничить области плавно и резкоизменяющихся течений в практических расчетах открытых потоков.

Во второй главе исследовалось влияние неравномерности течения на диффузию консервативных примесей при турбулентном переносе. Обычно для участков разбавления сточных вод кратность разбавления определяется по средним значениям скорости потока V и его глубины h на рассматриваемом участке течения. При таком подходе не учитываются особенности неравномерного движения. Поскольку неравномерное движение встречается практически на всех участках естественных водотоков, то данное допущение требовало дополнительной проверки. Тем более, что последние исследования К.В.Гришанина, А.Д.Альтшуля, О.М.Айвазяна, В.Графа и др. установили существенное влияние фактора неравномерности на кинематические и динамические характеристики течения.

Диффузионная модель турбулентного переноса описывается законом Фика

$$j = -D_t \frac{\partial c}{\partial y}, \quad (8)$$

где j - удельный диффузионный поток вещества; D_t - коэффициент турбулентной диффузии; $\partial c / \partial y$ – градиент концентраций.

Коэффициент турбулентной диффузии характеризует поперечный перенос вещества хаотическим турбулентным движением и зависит от гидродинамических характеристик потока. Исследования влияния неравномерности течения на значения коэффициента турбулентной диффузии выполнялись в предположении одинаковых значений глубин и средних скоростей в рассматриваемых сечениях неравномерного и «эквивалентного» равномерного потоков. Рассмотрение этого вопроса основывалось на известной аналогии между переносом импульса и вещества, что приводит к идентичности определения коэффициента турбулентной диффузии D_t и коэффициента турбулентной кинематической вязкости ν_t .

Для определения коэффициента кинематической турбулентной вязкости в открытых потоках использовалась известная зависимость К.В.Гришанина

$$v_t = \kappa U_* h \eta (1 - \eta), \quad (9)$$

где κ - параметр Кармана; U_* - динамическая скорость; h - глубина потока; $\eta = y/h$ - безразмерное расстояние от дна.

В связи с указанными выше различиями динамических и кинематических характеристик равномерных и неравномерных плавноизменяющихся потоков можно предполагать, что влияние неравномерности течения на коэффициент кинематической турбулентной вязкости (турбулентной диффузии) можно выявить, анализируя изменения параметров κ и U_* в неравномерных потоках.

Из совместного рассмотрения одномерных уравнений сохранения энергии и импульса для неравномерного потока была получена зависимость

$$2 \left(\frac{U_*}{V} \right)^2 = \lambda \left(1 - 12,5 \frac{dh}{dx} \right), \quad (10)$$

где V - средняя скорость; λ - коэффициент гидравлического трения неравномерного потока, определенный по гидравлическому диаметру.

Для замедленных потоков ($dh/dx > 0$), по данным А.Д.Альтшуля и др. в диапазоне $dh/dx \leq 0,02$ справедлива зависимость

$$\lambda = \lambda_p \left(1 + 21,2 \frac{dh}{dx} \right), \quad (11)$$

где λ_p - коэффициент гидравлического трения «эквивалентного» равномерного потока. Подстановкой (11) в (10) было получено выражение

$$2 \left(\frac{U_*}{V} \right)^2 = \lambda_p \left(1 - 12,5 \frac{dh}{dx} \right) \left(1 + 21,2 \frac{dh}{dx} \right). \quad (12)$$

Выражение (12) после элементарных математических преобразований и пренебрежения малыми членами привело к зависимости

$$\frac{U_*}{U_{*p}} = 1 + 8,7 \frac{dh}{dx}. \quad (13)$$

Для ускоренных потоков ($dh/dx < 0$) по данным А.Д.Альтшуля и др. $\lambda \approx \lambda_p$ и аналогичная зависимость получена в виде

$$\frac{U_*}{U_{*p}} = 1 - 12,5 \frac{dh}{dx}. \quad (14)$$

Использование опытных данных И.Никурадзе, Ф.Донха и А.Г.Гуржиенко для замедленных потоков привело к следующему выражению для параметра Кармана

$$\frac{\kappa}{\kappa_p} = 1 + 76,5 \frac{dh}{dx}. \quad (15)$$

Совместное рассмотрение (13) и (15) позволило получить зависимости для кинематической турбулентной вязкости и коэффициента турбулентной диффузии в случае замедленных потоков

$$\frac{\nu_{tr}}{\nu_{trp}} = 1 + 85,2 \frac{dh}{dx} \quad \text{и} \quad \frac{D_{tr}}{D_{trp}} = 1 + 85,2 \frac{dh}{dx}. \quad (16)$$

В соответствии с широко известной степенной зависимостью для профиля скорости (распространенной М.С.Таршишом на область плавноизменяющихся течений) равенство коэффициентов гидравлического трения для ускоренного и «эквивалентного» равномерного потоков одновременно предполагает близость значений параметра Кармана в сравниваемых потоках. Поэтому для ускоренных потоков предполагалось, что $\kappa \approx \kappa_p$. В результате проведенных преобразований была получена следующая зависимость

$$\frac{D_{tr}}{D_{trp}} = 1 - 12,5 \frac{dh}{dx}. \quad (17)$$

Сравнение коэффициентов турбулентной диффузии для замедленного ($D_{тз}$) и ускоренного ($D_{ту}$) потоков при одном и том же значении $|dh/dx|$ в соответствии с формулами (16) и (17) привело к выражению

$$\frac{D_{тз}}{D_{ту}} = 6,8 \cdot \frac{5,8}{1 + 12,5|dh/dx|}. \quad (18)$$

При равномерном режиме течения ($dh/dx = 0$) зависимость (18) тождественно равна единице. Таким образом, коэффициенты турбулентной диффузии в плавноизменяющихся потоках могут существенно (в несколько раз) превосходить аналогичные значения для равномерных потоков. Данные натурных исследований, представленные А.В.Караушевым и др. (рис. 2), подтвердили сделанные выводы.

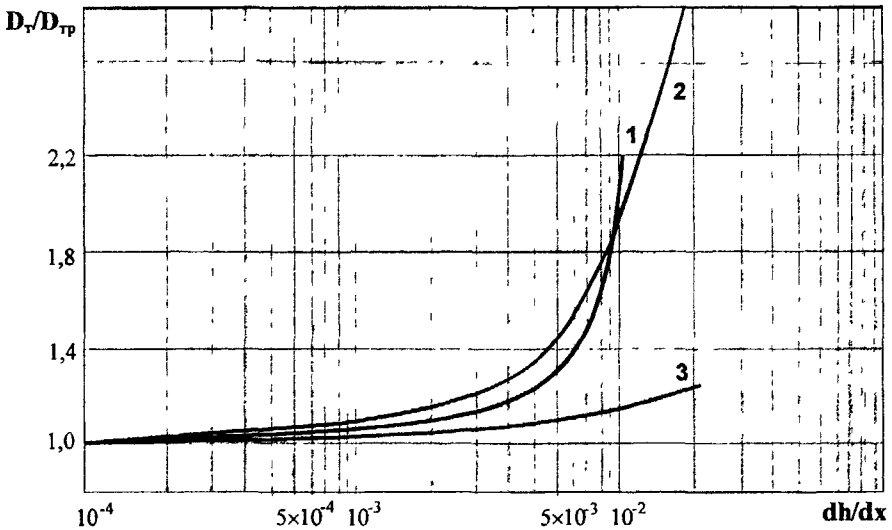


Рис.2. Сравнение расчетных зависимостей для коэффициента турбулентной диффузии в случаях замедленных (2) и ускоренных (3) потоков с данными натурных исследований А.В.Караушева (1)

В третьей главе рассмотрен ряд задач, относящихся к русловому процессу на урбанизированных территориях, таких как транспорт и осаждение мелкой загрязненной взвеси, условия размыва связных грунтов.

Влияние антропогенного и техногенного факторов на участках рек, находящихся в пределах урбанизированных территорий, сказывается на количественных и качественных изменениях стока наносов. В загрязненных водах, сбрасываемых в водные объекты из различных источников, содержатся не только растворенные, но и взвешенные вещества в виде взвесей различной крупности, представляющих собой песчаные, пылеватые или илистые частицы. Малая гидравлическая крупность частиц взвеси способствует их вовлечению в турбулентное движение водных потоков и позволяет рассматривать мелкую взвесь как консервативную примесь. Для описания распространения мелкой взвеси может быть использована диффузионная модель турбулентного переноса

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(v_r \frac{dc}{dy} \right) + w \frac{dc}{dy} = 0, \quad (19)$$

где W – гидравлическая крупность частиц при нестесненном осаждении.

Результатом интегрирования уравнения (19) является зависимость

$$v_r \frac{dc}{dy} + Wc = C. \quad (20)$$

Для определения коэффициента кинематической турбулентной вязкости использовалась зависимость (9). Последующее интегрирование выражения (20) с учетом (9) привело к формуле для профиля концентраций в плавноизменяющихся потоках

$$\frac{c}{c_0} = \left[\frac{\eta_0}{1 - \eta_0} \left(\frac{1 - \eta}{\eta} \right) \right]^{\frac{w}{\kappa U}}, \quad (21)$$

где $c = c_0$ при $\eta_0 = 0,05$.

Подстановка в (21) значений параметра Кармана (κ_p) и динамической скорости (U_{*p}), соответствующих условиям равномерного течения, приводит к известному профилю Великанова-Рауза. Последующая подстановка в (21) ранее найденных соотношений (16) и (17) для

коэффициентов турбулентной вязкости (турбулентной диффузии) позволила получить выражение для профиля концентрации в замедленных потоках:

$$\frac{c}{c_0} = \left[\frac{\eta_0}{1 - \eta_0} \left(\frac{1 - \eta}{\eta} \right) \right]^{\frac{w}{\kappa_p U_p (1 + 85,2 \frac{dh}{dx})}} \quad (22)$$

и в ускоренных потоках:

$$\frac{c}{c_0} = \left[\frac{\eta_0}{1 - \eta_0} \left(\frac{1 - \eta}{\eta} \right) \right]^{\frac{w}{\kappa_p U_p (1 - 12,5 \frac{dh}{dx})}} \quad (23)$$

Полученные профили (22) и (23) качественно близки профилям концентрации Великанова-Рауза и отличаются поправками к показателям степени, учитывающими степень неравномерности течения.

На графике (рис. 3) представлены профили (23) и (24) для неравномерных потоков при $|dh/dx| = 0,005$. Как видно из графика, полученный профиль (22) дает более равномерное распределение взвеси по глубине замедленного плавнoизменяющегося потока, по сравнению с профилями Великанова-Рауза и А.В.Караушева.

Расчеты по полученным зависимостям (22) и (23) показывают, что концентрации в придонных слоях потоков могут различаться более чем в три раза при ускоренном и замедленном течении.

Интегрированием выражения (21) получаем формулу для средней концентрации взвеси \bar{c} по глубине плавнoизменяющегося потока, в которой влияние неравномерности учитывается параметрами κ и U .

$$\frac{\bar{c}}{c_0} = \frac{\left(\frac{\eta_0}{1 - \eta_0} \right)^{\frac{w}{\kappa U}}}{1 - \frac{W}{\kappa U}} \quad (24)$$

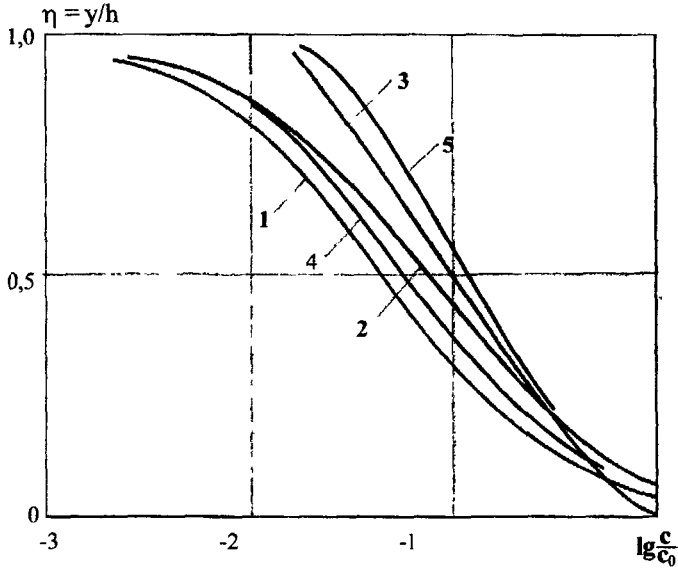


Рис.3. Профили концентрации для равномерных и плавноизменяющихся потоков при $|dh/dx|=0,005$: 1 - профиль концентрации Великанова-Рауза; 2 - данные В.С.Боровкова; 3 - данные А.В.Караушева; 4 - данные автора по ускоренным потокам; 5 - данные автора по замедленным потокам

Используя ранее найденные соотношения (16) и (17), выражение (24) было преобразовано применительно к замедленным потокам:

$$\frac{\bar{c}}{c_0} = \frac{\left(\frac{\eta_0}{1-\eta_0} \right)^{\frac{w}{\kappa_p U_{*p} (1+85,2 \frac{dh}{dx})}}}{1 - \frac{W}{\kappa_p U_{*p} (1+85,2 \frac{dh}{dx})}} \quad (25)$$

и к ускоренным потокам:

$$\frac{\bar{c}}{c_0} = \frac{\left(\frac{\eta_0}{1-\eta_0} \right)^{\frac{w}{\kappa_p U_{*p} (1-12,5 \frac{dh}{dx})}}}{1 - \frac{W}{\kappa_p U_{*p} (1-12,5 \frac{dh}{dx})}} \quad (26)$$

Из анализа (25) и (26) следует, что при минимальных значениях U/W неравномерность распределения взвеси по глубине плавноизменяющихся потоков заметно возрастает.

Процесс осаждения взвеси является важной составляющей руслового процесса. На некоторых участках рек в пределах урбанизированных территорий наблюдается активизация процессов заиления. Этот процесс обуславливается рядом причин, среди которых уменьшение стока воды в паводок за счет водопотребления и регулирования стока, общего увеличения стока наносов с урбанизированных территорий, в том числе и за счет поступления в водоток загрязняющих примесей техногенного и антропогенного характера, изменения качественного состава стоков. Осаждение мелкой загрязненной взвеси ухудшает санитарное состояние русла и способствует вторичному загрязнению речной воды.

Рассмотрим осаждение частиц мелкой взвеси, записывая баланс наносов для единичного отсека потока при отсутствии размыва дна в виде

$$hdc = -cWdt, \quad (27)$$

где c – концентрация взвеси на верхней границе придонного слоя.

Решение уравнения (27) при начальных условиях $t = 0$, $c=c_0$ имеет вид

$$\frac{c}{c_0} = e^{-\frac{Wt}{h}}. \quad (28)$$

Как следует из (28), наиболее интенсивное осаждение мелкой взвеси должно наблюдаться в зонах течения с малыми глубинами (прибрежных зонах). При рассмотрении процесса осаждения на участке течения от створа с начальной концентрацией c_0 до створа с остаточной концентрацией $c = 0,05 c_0$ из выражения (28) после преобразований были получены зависимости для длин участков осаждения взвеси L в плавноизменяющемся замедленном

$$\frac{L}{h} = \frac{4,2}{\sqrt{\lambda_p \left(1 + 8,7 \frac{dh}{dx}\right)}} \frac{U_*}{W} \quad (29)$$

и ускоренном потоках

$$\frac{L}{h} = \frac{4,2}{\sqrt{\lambda_p \left(1 - 12,5 \frac{dh}{dx}\right)}} \frac{U_*}{W}, \quad (30)$$

где dh/dx – средний уклон свободной поверхности на рассматриваемом участке течения; λ_p – коэффициент гидравлического трения «эквивалентного» равномерного потока.

При равномерном течении $dh/dx = 0$ и выражения (29) и (30) приводятся к виду (по В.С.Боровкову)

$$\frac{L}{h} = \frac{4,2}{\sqrt{\lambda_p}} \frac{U_*}{W}. \quad (31)$$

Анализ зависимостей (29) - (31) показывает, что при одном и том же значении коэффициента гидравлического трения λ_p , осаждение мелкой взвеси в плавноизменяющихся потоках будет происходить несколько быстрее (в пределах 10%), чем в равномерном.

Факторы, определяющие критические условия размыва для несвязных грунтов, изучены достаточно подробно. Однако в случае мелкодисперсных частиц размером менее 0,1 мм, характерных для производственных и бытовых стоков с урбанизированных территорий, необходимо учитывать связность наносов. Более того, даже небольшая добавка мелких частиц в состав ложа существенным образом изменяет значение параметров, характеризующих состояние предельного равновесия донных частиц.

В отличие от несвязных грунтов каких-либо четких рекомендаций по учету связности не существует даже применительно к равномерным

потокам, за исключением известных работ Ц.Е.Мирцхулавы и Т.Х.Ахмедова по размыву русел сложных глинистыми и скальными связными грунтами. Обработкой опытных данных Ц.Е.Мирцхулавы, проведенной в МГСУ, было установлено, что критическая динамическая скорость при гидравлически гладком обтекании мелкозернистых частиц перестает зависеть от диаметра частиц и определяется только сцеплением грунта. Зависимость между сцеплением грунта и предельной влекущей силой имеет вид

$$U_{*c} = 0,025 \sqrt{\frac{\sigma_c}{\rho_s}}, \quad (32)$$

где $U_{*c} = \sqrt{\tau_c / \rho}$ - критическая динамическая скорость; τ_c - предельная влекущая сила; σ_c - сцепление грунта; ρ_s - плотность грунта.

Совместное использование выражений (32) и (10) позволило получить формулу для критической скорости размыва в плавноизменяющихся потоках

$$V_c = \frac{0,035}{\sqrt{\lambda \left(1 - 12,5 \frac{dh}{dx}\right)}} \sqrt{\frac{\sigma_c}{\rho}}. \quad (33)$$

При равномерном течении ($dh/dx = 0$) выражение (33) принимает вид

$$V_c = \frac{0,035}{\sqrt{\lambda_p}} \sqrt{\frac{\sigma_c}{\rho}}, \quad (34)$$

совпадающий с формулой И.М.Марковой.

Выражение для критической скорости размыва в случае замедленных потоков было получено с использованием выражения (13)

$$V_c = \frac{0,035}{\sqrt{\lambda_p \left(1 + 8,7 \frac{dh}{dx}\right)}} \sqrt{\frac{\sigma_c}{\rho}}. \quad (35)$$

Для ускоренных потоков, в соответствии с данными А.Д.Альпшуля формула (33) имеет вид

$$V_c = \frac{0,035}{\sqrt{\lambda_p \left(1 - 12,5 \frac{dh}{dx}\right)}} \sqrt{\frac{\sigma_c}{\rho}}. \quad (36)$$

Анализ зависимостей (35) и (36) показывает, что при одном и том же значении коэффициента гидравлического трения λ_p , размыв донных грунтов в неравномерном потоке будет происходить несколько быстрее, чем в равномерном.

Оценочные расчеты сцепления грунтов (σ_c) могут проводиться с использованием формулы Ц.Е.Мирцхулавы или по данным МГСУ, полученным для верхнего слоя водонасыщенных грунтов реки Москва, в широком диапазоне крупности частиц (от 0,07 до 1,25 мм).

Четвертая глава посвящена экспериментальному обоснованию возможности перехода от одномерных моделей русла к реальным пространственным распределениям гидродинамических величин. Исходным для анализа являлся метод нормальных глубин, позволяющий связать распределение осредненных скоростей на нормалях к стенкам русла с местными значениями касательных напряжений. Использование метода нормальных глубин обычно основывается на гипотезе плоских сечений, которая предполагает соответствие распределения осредненных скоростей на нормалях к стенке профилю скорости плоского потока. Метод нормальных глубин прошел достаточную апробацию на напорных трубах (Г.П.Скребков, В.И.Субботин, А.А.Машкилейсон и др.). Наибольший интерес представляла проверка универсальности закона распределения скоростей на нормалях к участкам периметра открытых русел с одинаковой шероховатостью. Опытные профили скоростей, полученные на нормалях ко дну и стенкам исследованных русел трапецидального сечения с разной по периметру шероховатостью,

полностью подтвердили данное предположение. Установленные характеристики течения позволяют перейти от плоских потоков к пространственным течениям, заменяя опытное русло расчетной полигональной моделью. Проведя вычисления касательных напряжений на стенках открытых русел, основываясь на универсальном законе изменения скорости в пристеночной области, можно перейти к прогнозированию локальных русловых процессов.

В пятой главе рассмотрены конструктивные особенности выпусков сточных вод и различные условия их работы на водных объектах с неравномерным течением. Приводится пример использования полученных зависимостей для коэффициента турбулентной диффузии в расчетах рассеивающего речного выпуска сточных вод. Как показано в работе, использование уточненной методики расчета коэффициента турбулентной диффузии с учетом неравномерности течения позволяет существенно (на 1/3) сократить необходимое число выпусков и, тем самым, оптимизировать и удешевить конструкцию выпускного сооружения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы, полученные в диссертации, сводятся к следующему:

-Предложен количественный критерий, позволяющий разграничить области плавноизменяющихся и резкоизменяющихся неравномерных открытых потоков, основанный на особенностях распределения касательных напряжений в неравномерных потоках.

-Исследована зависимость коэффициентов турбулентного перемешивания и турбулентной диффузии от параметров, определяющих неравномерность течения в открытых руслах.

-Предлагается метод расчета коэффициента турбулентной диффузии для неравновесных процессов разбавления сточных вод в

плавноизменяющихся открытых потоках, учитывающий степень неравномерности течения.

- Получены зависимости для критических скоростей размыва связных грунтов, основанные на особенностях гидравлического трения при плавноизменяющемся движении.

- Установлено влияние неравномерности течения на профили концентраций и среднюю концентрацию мелкой взвеси в плавноизменяющихся открытых потоках. Предложены формулы для расчета профилей концентраций и средней концентрации мелкой взвеси в плавноизменяющихся потоках, учитывающие степень неравномерности течения.

- Выявлены особенности осаждения мелкой взвеси в плавноизменяющихся открытых потоках. Получены зависимости для длин участков осаждения мелкой взвеси в открытых потоках, основанные на закономерностях гидравлического сопротивления при плавноизменяющемся течении.

- Выявлено существование одинаковых законов распределения скоростей на нормалях к участкам периметра открытых русел с постоянной шероховатостью. Рекомендован метод расчета локальных гидродинамических характеристик пространственных течений.

- Показано, что использование полученных зависимостей при расчете рассеивающего выпуска сточных вод в случае замедленного течения позволяет за счет сокращения общего количества насадок (отверстий), существенно упростить и удешевить конструкцию выпуска.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Ляпин А.В. Критерий оценки плавной изменчивости течения в расчетах открытых потоков // Строительство – формирование среды

жизнедеятельности: Материалы второй международной (VII традиционной) научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и докторантов. Секция 2. Окружающая среда и системы жизнеобеспечения – Москва: Изд-во МГСУ, 2004. С. 231-233.

2. Ляпин А.В., Ляпин В.Ю. Кинематическая структура открытых потоков в руслах с переменной по периметру шероховатостью // Совершенствование методов гидравлических расчетов водопропускных и очистных сооружений: Межвузовский научный сборник Саратов: СПИ, 2004. С.40-43.

3. Ляпин А.В. Диффузионная модель турбулентного переноса для неравномерных потоков // Строительство – формирование среды жизнедеятельности: Материалы третьей международной (VIII традиционной) научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и докторантов. Секция 2. Окружающая среда и системы жизнеобеспечения – Москва: Изд-во МГСУ, 2005. С. 113-116.

4. Ляпин А.В., Ляпин В.Ю. Учет степени неравномерности течения в расчетах плавноизменяющихся открытых потоков // Изв. вузов. Строительство, 2005, № 1. С. 106-109.

5. Ляпин А.В. Диффузионная модель разбавления сточных вод в условиях неравномерного течения // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова, 2005, № 1. Спецвыпуск: Материалы Международной научно-практической конференции «Современные технологии в промышленности строительных материалов и стройиндустрии». С. 48-51.

**МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ
ПЛАВНОИЗМЕНЯЮЩЕМся ДВИЖЕНИИ В ОТКРЫТЫХ
РУСЛАХ**

Ляпин Антон Валерьевич

Исследовано влияние неравномерности течения на диффузионную модель разбавления сточных вод. Предложен метод расчета коэффициента турбулентной диффузии в случае замедленных и ускоренных плавноизменяющихся потоков. Получены зависимости для критических скоростей размыва связных грунтов, основанные на особенностях гидравлического трения в неравномерных потоках. Предложены формулы для расчета профилей концентраций мелкой взвеси и зависимости для определения протяженности участков осаждения мелкой взвеси в плавноизменяющихся потоках. Рекомендован метод перехода от одномерных моделей русла к расчету локальных гидродинамических характеристик течения.

**MASS-TRANSFER PROCESSES IN GRADUALLY VARYING
FLOW IN OPEN CHANNELS**

Lyapin Anton Valerjevich

The impact of non-uniform flow on sewage dilution diffusion model has been investigated. Turbulence diffusivity coefficient calculation method for slow and accelerated smoothly varying flows has been suggested. Correlations between critical velocities of cohesive soil erosion based on peculiarities of hydraulic friction in non-uniform flows have been obtained. Formulae for calculation of fine suspended matter concentration profiles and correlations for determining fine suspended matter sedimentation areas have been suggested. A method of transition from one-dimensional channel models to calculation of local hydrodynamic parameters of current has been recommended.

Лицензия ЛР № 020675 от 09.12.97г.

Подписано к печати 12.04.06

Формат 60x84 1/16

Печать офсетная

И-42

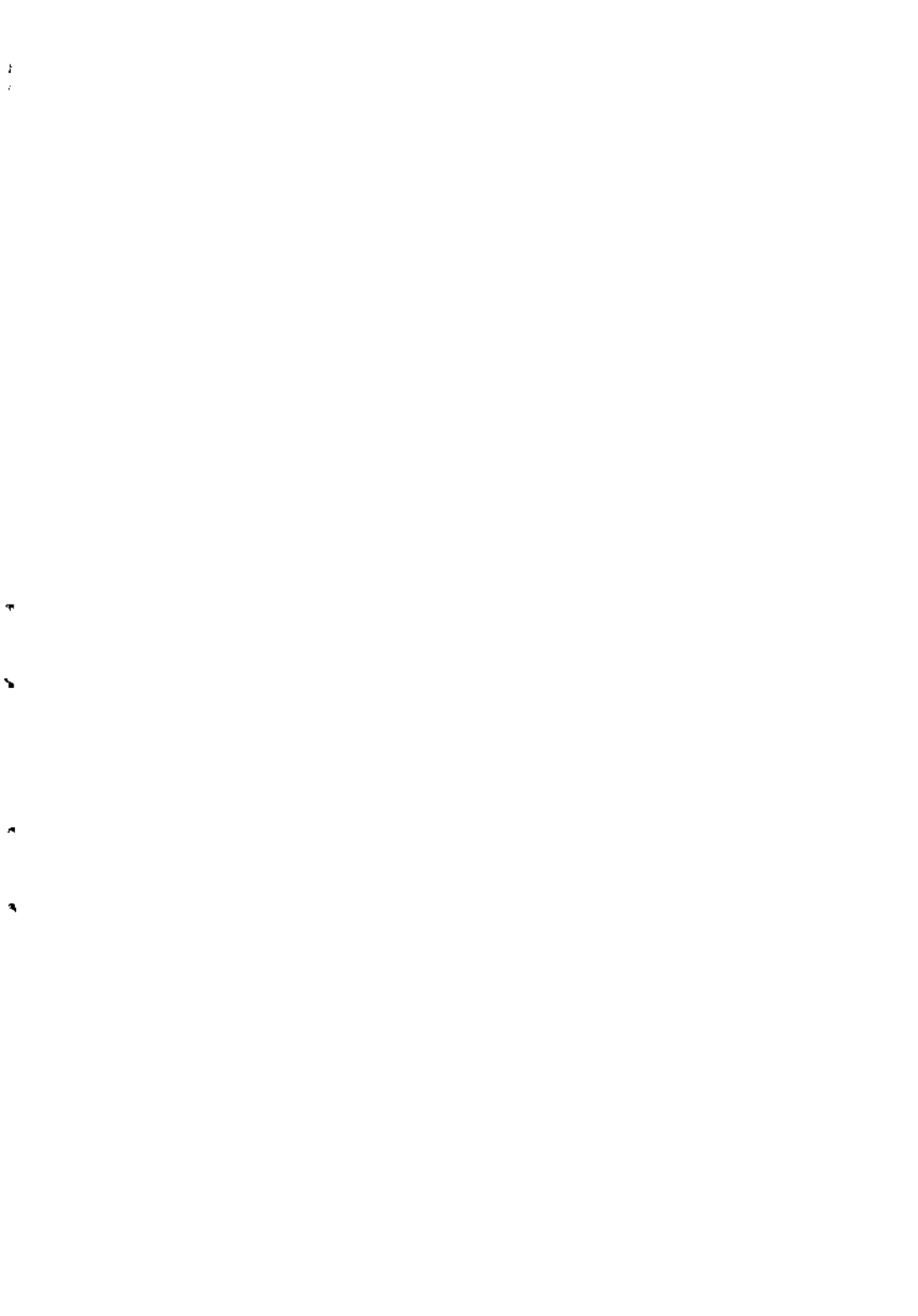
Объем 1 уч.-изд.л.

Т. 100

Зак

Московский государственный строительный университет.

Экспресс-полиграфия



2006A
8393

■ - 8393