Киевский университет им. Тараса Шевченко

На правах рукописи

ЕВСЕЕВА
Елена Геннадиевна

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОТКРЫТЫХ РУСЕЛ

01.02.05
механика жидкостей, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Киев 1992

Работа выполнена в Донецком государственном университете

Научный руководитель :
кандидат технических наук, доцент МИРОШНИЧЕНКО В.В.

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук, профессор СЕЛЕЗОВ И.Т.
кандидат физико-математических наук, доцент РОМАН В.М.

Ведущая организация:
НИИ Гидропроект им. А.Я.Жука, г.Москва

Защита состоится "31" марта 1993 г. в 15^{00} часов на заседании специализированного совета К 068.18.09 в Киевском университете им. Тараса Шевченко по адресу: 252127, г.Киев-127, проспект Академика Глушкова, 6, механико- математический факультет.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Киевского университета им. Тараса Шевченко.

Автореферат разослан "25" февраля 1993г.

Ученый секретарь специализированного совета доктор физико-математических наук ЖАРИЙ О.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность. При решении многих задач сельского хозяйства, судоходства, энергетики, водного строительства, экологии необходимо иметь математическую модель открытого потока. Это задачи рационального управления процессами перераспределения водных рессурсов; определения оптимальных режимов работы гидротехнических сооружений и гидроэнергетических установок; оптимизации поверхностного орошения и автоматизации процессов управления в ирригации; задачи учета деформаций русел при проектировании инженерных сооружений и расчета линии дна на судоходных каналах. Большую важность в настоящее время приобретают задачи расчета транспорта донных наносов в связи с наличием в них радиоактивных включений.

Характерной чертой открытых потоков, которую надо учитывать при моделировании, является динамичность происходящих в них процессов, обусловленная непостоянством работы гидротехнических сооружений и водопотребления, и связанный с этим неустановившийся характер течения воды. В настоящее время общепринятой моделью, используемой при исследовании нестационарных открытых потоков, является система уравнений Сен-Венана, полученная в рамках одномерной нелинейной теории длинных волн. Как показывает опыт моделирования стоков, возможности практического применения этой модели определнются в основном точностью задания параметров, отражающих индивидуальные свойства каждого конкретного русла.

В уравнениях гидродинамики открытых потоков такими параметрами являются форма русла, коэффициент шероховатости и распределенные по длине потери воды для выбранной математической модели. Эти параметры зависят от многих факторов, в том числе и от некоторых гидравлических и морфометрических характеристик русла, которые изменяются по длине русла и во времени, и не поддаются измерению и контролю. В связи с этим возникают задачи параметрической идентифификации, т.е. нахождения и уточнения характеристик открытых русел по результатам наблюдений за состоянием потока.

Задачи идентификации параметров уравнений гидродинамики открытых потоков являются обратными задачами с точки зрения математической физики и задачами условной минимизации с точки зрения теории оптимального управления. Для решения таких задач в настоящее время разработан универсальный подход, являющийся регуляризующим для классически некорректных задач и не накладывающий ограничений на вид оцениваемых параметров. Он сочетает в себе применение вариационного подхода теории оптимального управления, позволяющего находить в классе общих функций градиент функционала задачи, и градиентного метода отыскания экстремалей, обладающего естественной регуляризацией.

С применением такого подхода уже проводилась идентификация одного из параметров уравнений движения жидкости - коэффициента шероховатости. В то же время, должны быть проидентифицированы все параметры, не подлежащие определению опытным путем, причем наилучшими будут результаты их совместной идентификации. Задача совместной идентификации параметров еще никем не решалась, хотя теоретически возможность этого не отрицается.

<u>Целью работы</u> является разработка алгоритмов идентификации формы русла, распределенного бокового притока-оттока и совмест-

кая идентификация параметров, подлежащих определению в уравнениях гидродинамики открытых потоков.

Научная новизна:

- поставлены и решены вариационные задачи идентификации параметра течения в открытых руслах - распределенного бокового притока - оттока, уровня донных наносов.

- поставлена и решена вариационная задача параметрической идентификации уравнений неустановившегося движения жидкости для случая, когда идентифицируемым параметром является производная искомой функции, проведена необходимая модификация метода, обеспечивающая получение решения.

- для численного решения вариационных задач гидродинамики развита схема, основанная на ранее не применявшейся малоизвестной интерпретации схемы С.К.Годунова, оптимальной для расчета разрывных течений.

- впервые поставлена и решена задача совместной идентификации параметров: шероховатости и уровня наносов, шероховатости и боковой приточности и т.п.

Практическая ценность. На основании развитого метода были разработаны на языке ФОРТРАН-77 программы совместной и раздельной идентификации гидрологических характеристик открытых потоков для модельных задач и для I участка Северо-Крымского канала. Получаемые по ним результаты обладают высокой точностью и могут с успехом применяться для расчетов на реальных руслах.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XXV Всесоюзной студенческой конференции "Студент и научно-технический прогресс" (г. Новосибирск, 1986 г.), на IV Всесоюзной конференции "Современные проблемы аэрогидродинамики" (п. Мелекино 1987 г.), на II Всесоюзой школе-семинаре "Методы математического моделирования в научных исследованиях" (г. Донецк, 1990 г.), на семинаре отдела гидродинамики волновых процессов института гидромеханики АН УССР (г. Киев, 1992 г.), на научных конференциях Донецкого госуниверситета (1989 - 1992).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 4 научных работах, 2 из которых выполнены в соавторстве.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержащего 60 наименований. Объем работы составляет 92 страницы из них на 22 страницах размещено 22 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Введение. Обосновывается актуальность темы и формулируется цель диссертационной работы, излагается краткое содержание разделов диссертации.

Глава I. Задача параметрической идентификации в гидродинамике открытых потоков.

В первом параграфе приводится общепринятая математическая модель неустановившегося течения - система квазилинейных гиперболических уравнений Сен-Венана. Русло рассматривается как система с распределенными параметрами (СРП), что означает пространственную распределенность всех параметров уравнений. Определяется круг параметров, значения которых не могут быть определены ни из анализа физических принципов функционирования стоков, ни непосредственными измерениями на объекте.

Во-первых, это коэффициент шероховатости, характеризующий диссипацию энергии в пристеночной зоне, значение которого зависят от поверхностной шероховатости ложа русла, его заиления и размыва, взвешенных и донных наносов, размеров и формы русла, глубины и расхода, наличия растительности и т. п. Предлагаемые для его определения эмпирические формулы не дают желаемой точности при расчетах, поскольку не все факторы, влияющие на него, изучены в достаточной степени, и количественный учет их представляет большую трудность. Во-вторых, это форма поперечного сечения русла, определение которой означает задание как минимум трех параметров - площади живого сечения потока, ширины поверху и смоченного периметра. Эти величины являются распределенными по длине нестационарными функциями, зависящими от уровня, расхода и других характеристик русла. Третьим важным входным параметром для системы Сен-Венана является боковой приток отток, характеризующий процессы фильтрации, инфильтрации, испарения и другие распределенные по длине потери и поступления воды. Зачастую его считают стационарным и постоянным между двумя гидростворами, но это приближение не всегда оправдано.

Значения параметров, позволяющие проводить расчеты на выбранной модели с заданной точностью, могут быть получены только в процессе идентификации, которая означает уточнение по экспериментальным данным такого набора неизвестных параметров модели, при котором выходные параметры модели в смысле некоторого критерия близки к выходным параметрам самого объекта при одинаковых входных воздействиях.

Отмечено, что необходима одновременная идентификация параметров, не подлежащих непосредственным измерениям, поскольку идентифицированные величины всегда содержат погрешности модели, наблюдений и вычислений, и они не только не могут, но и не должны в точности совпадать с экспериментально наблюдаемыми параметрами. При идентификации же только одного параметра его значение будет учитывать погрешности задания остальных величин, подлежащих определению, и одновременное применение полученных значений для расчетов течения приведет к неправильным результатам.

Во втором параграфе на основе анализа существующих подходов и методов решения этой задачи обосновывается выбор метода идентификации. Делается вывод, что для решения задачи параметрической идентификации открытых потоков целесообразно использовать прямые методы идентификации, позволяющие отыскивать неизвестные параметры в классе функций пространственной переменной. Они должны сочетать в себе регуляризующие алгоритмы и методы теории оптимального управления. Методами, обладающими естественными регуляризующими свойствами, являются градиентные методы, при использовании которых для оценки параметров, распределенный характер модели сохраняется только в том случае, если градиент критерия качества идентификации является распределенной по пространству функцией. Методами, позволяющими определить градиент в классе общих функций, являются вариационные методы теории оптимального управления, среди которых наиболее часто применяется общий метод неопределенных множителей Лагранжа.

В заключительном параграфе первой главы для искусственных русел с облицованными откосами, имеющих, как правило, призматическую форму сечения (рис.1), строится модель, сводящая идентификацию трех параметров, определяющих форму русла, к идентифи-

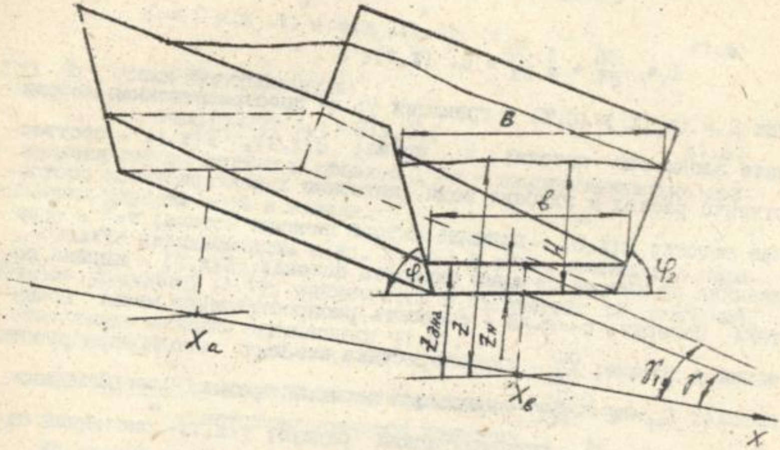

Рис.1 Моделируемое русло

кации одного параметра. Ставится задача совместной идентификации различных параметров открытых потоков.

Уравнения Сен-Венана в этом случае имеют вид:

$$L_1 = \frac{\partial Q}{\partial t} + 2v\frac{\partial Q}{\partial x} + (g\omega - Bv^2)\frac{\partial H}{\partial x} + (\frac{g\omega}{2m} - v^2)\frac{db}{dx} +$$

$$+ \frac{g\omega}{2m}\frac{db_0}{dx} - g\omega i + f_{тр} = 0; \qquad (1.1)$$

$$L_2 = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{B}\frac{\partial Q}{\partial x} = q, \ (x,t) \in S$$

где $S = (x_a, x_b) \times (0,T)$ с границей γ; x – пространственная координата вдоль оси потока; t – время; $Q(x,t)$, $H(x,t)$ – соответственно расход и глубина воды, которыми характеризуется состояние потока; $\omega(x,Z)$ – площадь живого сечения потока; $v = \frac{Q}{\omega}$ – осредненная по живому сечению скорость потока; $B(x,Z)$ – ширина потока поверху; $c = \sqrt{g\omega/B}$ – скорость распространения малых возмущений в потоке; $\frac{\partial\omega}{\partial x}$ – характеристика степени неодномерноности потока; $f_{тр} = g\frac{Q|Q|}{\omega R C^2}$ – член, учитывающий трение; C – коэффициент Шези; $R = \frac{\omega}{\chi}$ – гидравлический радиус; $\chi(x,t)$ – смоченный периметр; $q(x)$ – боковой приток-отток на единицу длины, $b(x)$ – ширина канала по дну с учетом наноса, $b_0(x)$ – проектное значение ширины по дну.

Все параметры, определяемые формой русла, зависят от одной неизвестной функции $b(x)$, которая и подлежит идентификации. В уравнения (1.1) кроме $b(x)$, входит ее производная по пространству db/dx, которая выбирается в качестве идентифицируемого параметра и вводится условием:

$$L_3 = y - db/dx = 0 \, . \qquad (1.2)$$

Начальные и граничные условия для расчета течения задаются в виде:

$$Q(x,0)=Q_H(x); \quad H(x,0)=H_H(x); \quad b(x_a)=b_a; \qquad (1.3)$$

$$Q(x_a,t)=Q_a(t); \quad Q(x_b,t)=Q_b(t) , \qquad (1.4)$$

где Q_H, H_H, Q_a, Q_b, b_a - известные функции.

Качество идентификации оценивается интегральным на границах квадратичным критерием:

$$J = \int_0^T e(x_a,t)^2 + e(x_b,t)^2 dt, \qquad (1.5)$$

где T - время идентификации;

$$e(x,t)=(Hэ(x,t)-H(x,t)) \qquad (1.6)$$

- невязка глубин модели и объекта , Hэ - экспериментально наблюдаемая глубина воды в канале.

Задача идентификации $n(x)$, $q(x,t)$ и $y(x)$, являющихся параметрами уравнений (1.1), заключается в нахождении их значений, доставляющих минимум функционалу (1.5).

Глава II. Идентификация параметров уравнений неустановившегося движения.

Во второй главе излагается вариационный подход к идентификации параметров нестационарных квазилинейных гиперболических уравнений движения жидкости для совместной идентификации параметров в случае, когда управлением является производная идентифицируемой функции. Поставленная задача минимизации функционала (1.5) при условиях (1.1), (1.2) сводится к безусловной минимизации функционала Лагранжа, который имеет вид:

$$J=\int_0^T \left[e(x_a,t)^2 + e(x_b,t)^2\right]dt +$$

$$+ \iint\limits_S h_1 L_1 + h_2 L_2 \, dx dt + \int\limits_{x_a}^{x_b} h_3 L_3 \, dx = J_1 + J_2 + J_3 , \qquad (2.1)$$

где $h_1(x,t)$, $h_2(x,t)$ – переменные множители Лагранжа, определенные в области S, $h_3(x)$ – множитель, определенный на отрезке $[x_a, x_b]$, поскольку он вводит условие (1.2), заданное на этом отрезке.

Необходимое условие экстремума данного функционала (равенство нулю его первой вариации) приводит к сопряженной задаче, которая представляет собой систему уравнений в частных производных для $h_1(x,t)$ и $h_2(x,t)$:

$$\begin{aligned} & B \frac{\partial h_2}{\partial t} + (g\omega - Bv^2)\frac{\partial h_1}{\partial x} - h_1\left(-gBi + \frac{gyb}{2m} + \frac{\partial f_{тр}}{\partial H}\right) = 0; \\ & \frac{\partial h_1}{\partial t} + 2v\frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{\partial h_2}{\partial x} + h_1 \frac{2Q}{R\omega C^2} = 0, \end{aligned} \qquad (2.2)$$

где $\frac{\partial f_{тр}}{\partial H} = \frac{-2Q}{R\omega C}|Q|\left(\frac{B}{\omega} + (2y_c+1)\left(\frac{B}{\omega} - 2\sqrt{1+m^2}/\chi\right)\right)$

с начальными условиями при $t=T$:

$$h_1(x,T)=0; \quad h_2(x,T)=0 \qquad (2.3)$$

и граничными условиями:

$$\begin{aligned} & h_1(g\omega - Bv^2) + 2e(x_a,t) = 0; \\ & h_1(g\omega - Bv^2) - 2e(x_b,t) = 0, \end{aligned} \qquad (2.4)$$

и обыкновенного дифференциального уравнения для $h_3(x)$:

$$\frac{dh_3}{dx} + \int_0^T F_b \, dt = 0 \qquad (2.5)$$

где $F_b = h_1\frac{H}{\omega}\left(-2v\frac{\partial Q}{\partial x} + \left(\frac{g\omega}{2m} + 2v^2H\right)y + \left(g\omega + v^2(2B-\omega/H)\right)\frac{\partial H}{\partial x} - g\omega i - \right.$

$\left. - f_{тр}\left(1 + (2y_c+1)\left(1 - \frac{\omega}{H\chi}\right)\right)\right) + h_2\frac{\partial H}{\partial x}$

с начальным условием:

$$h_3 = 0. \qquad (2.6)$$

Необходимым условием экстремума также являются условия равенства нулю градиентов функционала (2.1) по идентифицируемым параметрам, которые удовлетворяются за счет выбора q, n и y:

$$I_q = \int_0^T h_2 dt = 0; \qquad (2.7)$$

$$I_n = \int_0^T h_1 \frac{2f_{тр}}{n} dt = 0; \qquad (2.8)$$

$$I_y = h_3 + \int_0^T h_1 \left(g\frac{\omega}{2m} - v^2 H\right) dt = 0. \qquad (2.9)$$

Во втором параграфе описывается численный метод решения прямой задачи, представляющей из себя расчет течения, и сопряженной задачи. Обе задачи представляют собой гиперболические системы квазилинейных уравнений в частных производных, особенностью которых является возможность возникновения разрывов в граничных условиях. При расчетах методом характеристик, наиболее распростаненным для решения гиперболических уравнений, это приводит к громоздким алгоритмам из-за сложной логики расчета особенностей и построения решения. Нецелесообразным оказалось и использование неявных разностных схем сквозного счета, т. к. при решении вариационных задач они дают сильные осцилляции на разрывах, которые надо сглаживать с помощью специальных вычислительных процедур.

Для численного интегрирования уравнений прямой и сопряженной задач в работе предложено использовать разностную схему.

разработанную на кафедре общей физики Донецкого госуниверситета Г.А.Атановым специально для численного решения вариационных задач газовой динамики. Она основана на малоизвестной интерпритации схемы С.К. Годунова, оптимальной для расчета разрывных течений, построенной для стационарных уравнений из условий монотонности решения. Достоинством этого метода является простота построения фронта решения, отсутствие осциляций на разрывах, он требует малых затрат машинного времени на расчеты (на порядок меньше, чем другая модификация метода С.К.Годунова - метод распада разрыва).

Схема строится следующим образом. Область решения задачи S разбивается на ячейки прямоугольной сеткой. В узлах этой сетки рассчитывается течение. Расчетные формулы получены на основе условий на характеритиках, связывающих между собой производные искомых функций по направлениям характеристик. Заменяя в этих соотношениях полные производные частными, аппроксимируя частные производные с первым порядком точности и разрешая полученные при этом алгебраические уравнения относительно искомых функций в точках расчетного слоя, получаем соотношения для определения решения .

В третьем параграфе описан градиентный метод оценки параметров. В связи с нелинейностью функционала (1.5) он реализуется итерационно по алгоритму

$$\lambda^{k+1} = \lambda^{k} - \alpha^{k}\, I_{\lambda}^{k}, \qquad (2.10)$$

где $\lambda(x)$ - идентифицируемый параметр, I_{λ} - градиент функционала I по λ, $\alpha(x)$ - шаг метода, $k = 0,1,2...$ - номер итерации. Вблизи экстремума используется для его поиска метод сопряженных градиентов . Это метод второго порядка, основанный на вычислении только первой производной функционала:

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k - \alpha(x)p^k,$$

где
$$p = \frac{\left[\int_{x_a}^{x_b} (I_\lambda^k)^2 dx\right]^k}{\left[\int_{x_a}^{x_b} (I_\lambda^k)^2 dx\right]^{k-1}} \qquad (2.11)$$

Глава 3. Параметрическая идентификация уравнений установившегося движения.

В третьей главе вариационный подход применяется к идентификации тех же параметров уравнений установившегося движения. В этом случае идентификация параметров систем уравнений в частных производных сводится к идентификации параметров обыкновенных дифференциальных уравнений, и численные алгоритмы решения задачи значительно упрощаются.

В первом параграфе приводится постановка задачи идентификации $n(x)$, $q(x)$ и $y(x)$ для уравнений установившегося движения и класса русел, описанного в первой главе.

К поставленной задаче идентификации уравнений установившевегося движения применялся тот же подход, что и к идентификации параметров в нестационарной постановке. На основании вариационного метода неопределенных множителей Лагранжа определялся распределенный по длине русла градиент функционала задачи, а затем на его основе градиентным методом отыскивались оптимальные значения параметров.

Во втором параграфе получены необходимые условия экстремума критерия качества идентификации, представляющие собой задачу Коши для множителей Лагранжа и условия равенства нулю градиентов функционала по идентифицируемым параметрам. Приводится алгоритм идентификации.

Глава 4. Результаты численных расчетов.

В четвертой главе описываются особенности и приводятся результаты численных расчетов для гипотетического русла с различными законами изменения идентифицируемых параметров.

В качестве гипотетического русла был принят канал со следующими характеристиками : длина l=40 км; откос стенок m=3; проектные значения ширины по дну b_o=50 м и уклона дна i=0,0002, начальные и граничные условия, соответствовали течению на первом участке Северо-Крымского канала в верхнем створе русла при $x=x_a$ и составили $Z(x_a,t)$=15.12 м, $Q(x_a,0)$ = 194 м^3/с, отметка линии дна - Z_o= 7,87 м.

Идентификация $y(x)$ проводилась для модельных значений этой функции, соответствующих случаю, когда высота наноса Z_H описывается монотонной квадратичной зависимостью и немонотонной функции, имеющей экстремум. Результаты свидетельствуют о том, что в сделанной постановке возможна идентификация наносов различной конфигурации.

Во втором параграфе приводятся результаты совместной идентификации параметров: коэффициента шероховатости и уровня донных наносов по уравнениям неустановившегося движения воды а также коэффициента шероховатости и боковой приточности по уравнениям установившегося движения.

Сходимость численного алгоритма к модельным значениям отмечается как для самих искомых функций, так и для случая, когда одним из идентифицируемых параметров является производная искомой функции.

В третьем параграфе приводятся результаты идентификации параметров для I участка Северо-Крымского канала. По уравнениям установившегося движения и неустановившегося движения жидкости. Коэффициент шероховатости, идентифицированный на стационарной модели, использовался для расчетов по уравнениям неустановившегося движения жидкости. Полученное в результате значение коэффициента шероховатости использовалось для идентификации бокового притока, проводилась совместная идентификация $q(x)$ и $n(x)$.

<u>В заключении</u> работы сделаны выводы:

1. Поставлена и решена вариационная задача идентификации основных параметров течения в открытых руслах: коэффициента шероховатости, боковой приточности и профиля русла.

2. Для каналов заданной формы задача идентификации трех параметров, определяющих форму русла, сведена к идентификации одного параметра - уровня донных наносов. Получены соответствующие уравнения, отличие которых от ранее рассмотренных заключается в зависимости функционала Лагранжа от производной идентифицируемого параметра. Определены особенности задачи, вызванные последним обстоятельством, проведена необходимая модификация метода, обеспечивающая получение решения.

3. Для численного решения вариационных задач гидродинамики развита схема, основанная на ранее не применявшейся малоизвестной интерпретации схемы С.К.Годунова, оптимальной для расчета разрывных течений.

4. Проведены численные расчеты идентификации уровня донных

наносов для модельного русла, определены особые свойства задачи, даны практические рекомендации, позволяющие повысить точность идентификации:

- идентификацию $y(x)=db/dx$ необходимо проводить по измерениям глубины на той границе, на которой задано значение ширины по дну, причем не имеет значения, какая это из границ. При увеличении числа створов, в которых проводятся измерения, результаты идентификации $y(x)$ ухудшаются.

5. Впервые поставлена и решена задача совместной идентификации параметров: шероховатости и уровня наносов, шероховатости и боковой приточности и т.п.

Получены результаты, свидетельствующие о практической возможности совместной идентификации параметров как по уравнениям установившегося, так и неустановившегося движения жидкости в открытом русле.

6. Решена задача стационарной идентификации. Проведено ее сравнение с нестационарной на примере идентификации параметров для I участка Северо-Крымского канала.

Установлено, что на канале существуют режимы, когда течение можно рассматривать как установившееся, и производить расчеты течения на основании стационарной модели. Для канала получены значения коэффициента шероховатости и боковой приточности.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Воронин С.Т., Евсеева Е.Г. О задаче уточнения эксплуатационных характеристик открытых русел // Строительство архитектура. - 1987. - N 11.

2. Евсеева Е.Г. Некоторые исследования гидродинамических

задач идентификации открытых русел // Изв. АН СССР, МЖГ. -1988. -№4.

3. Евсеева Е.Г. Решение задачи идентификации коэффициента шероховатости вариационным методом// Материалы XXV всесоюз. студ.конф. -Новосибирск, изд-во НГУ, 1987.

4. Евсеева Е.Г., Толстых В.К. Идентификация математических моделей в гидродинамике открытых потоков // Тез.докл. Второй школы-семинара "Методы математичесого моделированияв научных исследованиях". - Донецк, ИПММ АН УССР, 1990.

Подписано к печати 23.07.92.
Формат 60х84/16. Бум. тип. № I.
Офсетная печать. Бесплатно.
Усл. п.л. I,I. Заказ 14
Тир. 100 экз. Р-т ИЭП АН Украины,
340048, Донецк-48, ул.Университетская, 77

Ав 26.896