

На правах рукописи



005008206

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a horizontal line extending to the right.

КОСИЧЕНКО Наталья Викторовна

**ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
СВОБОДНОГО РАСТЕКАНИЯ БУРНОГО ПОТОКА
ЗА ВОДОПРОПУСКНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ**

Специальность: 05.23.16 – «Гидравлика и инженерная гидрология»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

19 ЯНВ 2012

Москва – 2011

Работа выполнена на кафедре механики и оборудования процессов пищевых производств ФГБОУ ВПО «Донской государственный аграрный университет» (ДонГАУ) и кафедре гидравлики и инженерной гидрологии ФГБОУ ВПО «Новочеркасская государственная мелиоративная академия»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор,
Заслуженный деятель науки Российской Федерации
Волосухин Виктор Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
Почётный работник высшего профессионального образования Российской Федерации
Есин Александр Иванович

доктор технических наук, профессор
Ханов Нартмир Владимирович

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт
проблем мелиорации» Минсельхоза России

Защита диссертации состоится 13 февраля 2012 г. в 16³⁰ на заседании диссертационного совета Д.220.045.02 при ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет природообустройства» по адресу: Москва, ул. Прянишникова, 19, ауд. 201/1

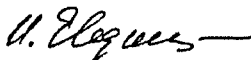
Тел./факс 8 (495) 976-10-46; E-mail: mailbox@msuee.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГУП

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью предприятия, просим направлять ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан «10» января 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Евдокимова И.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Двухмерные в плане открытые водные потоки встречаются в сооружениях дорожного строительства:

- водопропускные трубы различного поперечного сечения;
- малые мосты;

сооружениях мелиоративного хозяйства:

- трубчатые водопропускные сооружения систем лиманного орошения;
- трубчатые распределительные коллекторы;
- быстротоки (рассеивающие трамплины);

сооружениях водного хозяйства:

- водные потоки в реках, широких каналах на участке изменения их ширины;
- предохранительные и катастрофические водосбросы на водоемах и водохранилищах;
- ливнепропускные сооружения под каналами.

Во всех перечисленных сооружениях в качестве основной рабочей схемы сопряжения потоков за водопропускными сооружениями является свободное растекание бурного водного потока. Остальные формы сопряжения (сбойное течение), подтопление со стороны нижнего бьефа при проектировании ГТС не допускаются как опасные для надёжности сооружений. Поток в отводящем русле с большой степенью приближён к двухмерному в плане.

Поток за выходной кромкой водопропускного устройства имеет возможность растекаться на горизонтальной поверхности. В результате бурный поток способен расширяться в пространстве, скользя вдоль плоскости дна.

Для пропуска воды на пересечениях водотоков с железными и автомобильными дорогами устанавливают различные искусственные сооружения: мосты, водопропускные трубы.

Наличие протяженных автомобильных дорог в России, крупных сельскохозяйственных угодий и значительных площадей орошаемых земель требуют строительства большого числа гидротехнических сооружений, обеспечивающих нормальный пропуск воды с возвышенной стороны косогоров на пониженные участки местности.

Поток, вытекающий из водопропускной трубы в нижний бьеф гидросооружения, часто имеет скорости, которые в несколько раз превышают предельно допускаемые (неразмывающие) скорости для грунтов, составляющих отводящее русло.

Многочисленные натурные обследования, выполненные в МГСУ, МАДИ, ЦНИИС, позволяют сделать вывод о том, что главной причиной аварийного состояния большинства водопропускных сооружений являются опасные местные размывы отводящего русла в нижнем бьефе сооружений. Поэтому выполняют крепление отводящего русла.

Крепление отводящего русла выполняют по параметрам потока, полученным из модели, которая рассчитывается на основе решения граничной задачи свободного растекания потока.

При сравнении экспериментальных и расчетных параметров потока, в том числе и контуров растекания крайних линий тока свободно растекающегося потока за круглыми трубами, прямоугольного сечения, по известным из справочной литературы методам И.А. Шеренкова, Г.А. Лилицкого и др. выяснилось, что эти методы дают результат с низкой адекватностью, не достаточной для практики проектирования ГТС. Поэтому работа по изучению явления растекания бурного потока за безнапорными водопропускными устройствами и определению параметров потока является весьма актуальной.

Для повышения эксплуатационной надежности водопропускных сооружений необходимо в первую очередь повысить степень адекватности модельных (расчетных) и натуральных (экспериментальных) параметров свободно растекающегося потока за водопропускными трубами прямоугольного сечения при его истечении в широкое отводящее русло.

В работе научно обоснован расчет параметров потока за трубами прямоугольного поперечного сечения и даны рекомендации к расчету параметров потока за круглыми трубами.

Цель работы: изучить явление свободного растекания потока, т.е. выявить его свойства, разработать математическую модель течения свободно растекающегося бурного потока за водопропускной трубой прямоугольного сечения, поставить и решить граничную задачу по свободному растеканию потока и на ее основе получить расчетные зависимости для определения параметров потока, обосновать адекватность модели экспериментальным и натурным данным в окрестности выхода потока из трубы (на участке установки крепления отводящего русла).

Задачи исследований:

– получить модельные уравнения движения двухмерного в плане потока в плоскости годографа скорости и формулы связи плана течения потока с плоскостью годографа скорости;

– поставить граничную задачу для расчёта параметров свободного растекания потока в физической плоскости и в плоскости годографа скорости без учёта сил сопротивления потоку;

– решить граничные задачи определения параметров потока в плоскости годографа скорости и в физической плоскости течения потока;

– получить алгоритм определения параметров потока при его свободном растекании;

– доказать адекватность модели реальному растеканию потока и сравнить результаты моделирования с результатами ранее известных методов;

– указать путь оценки влияния сил сопротивления потоку;

– сформулировать выводы и предложения по практическому использованию результатов работы как для труб прямоугольного сечения, так и круглых;

– провести экспериментальные исследования по свободному растеканию бурного потока за безнапорными трубами прямоугольного сечения;

– выявить основные характерные участки в «лепестке» растекания потока и на базе этого выявить основные свойства потока на этих участках.

Автор защищает:

– факт наличия основных трех характерных участков в лепестке растекания потока от кромки водопропускной трубы до створа предельного расширения потока с их типичными изменениями скоростей, глубин и ширины потока;

– факт наличия первого участка, примыкающего к кромке водопропускной трубы, в котором скорости потока увеличиваются, глубины уменьшаются; силы сопротивления потоку на этом участке малы по сравнению с инерционными силами;

– метод расчета параметров свободно растекающегося потока на первом участке в целом;

– алгоритмы, формулы, уравнения для определения конкретных параметров потока;

– постановку и решение задач свободного растекания потока за водопропускной трубой прямоугольного сечения в физической плоскости течения потока и в плоскости годографа скорости;

- расчетные зависимости для определения гидравлических параметров потока за водопропускными трубами прямоугольного сечения;
- метод учета сил сопротивления потоку;
- модификацию метода к расчету параметров потока за круглыми трубами;
- доказательство более высокой адекватности модели по параметрам потока по сравнению с ранее известными в гидравлике методами.

Научная новизна работы:

Выполненные лабораторные исследования позволили выявить характерный лепесток растекания бурного потока в широкое отводящее русло и определить плавную без завихрений геометрию линий тока в зоне лепестка.

До створа предельного расширения потока (рис. 1) были выделены три участка по поведению средних параметров по живому сечению потока (рис. 2). Экспериментально и аналитически установлено, что на первом участке выхода потока из водопропускной трубы в широкое отводящее русло скорости потока возрастают, глубины падают. При этом поведение потока мало отличается от упрощённой модели без учёта сил сопротивления потоку со стороны дна отводящего русла.

Влияние сил внешнего сопротивления потоку на его входе в расширение при этом незначительно, а так как поток бурный и безвихревой, то незначительно и влияние сил внутреннего трения на общее сопротивление потоку.

Этот факт позволил взять за основу в дальнейших исследованиях модель двухмерного в плане потенциального потока. Далее за первым участком вниз по течению потока вследствие увеличения скоростей и значительного уменьшения глубин действие сил сопротивления о дно русла становится весьма заметным. Но участок крепления отводящего русла выполняется сразу же за водопропускной трубой, следовательно, для проектировщиков ГТС необходимо повысить адекватность модели именно на первом участке.

В работе были определены границы первого участка. Длина первого участка достигает 70-80 % расстояния до створа предельного расширения потока. Для упрощённой модели потенциального течения потока была поставлена и решена граничная задача определения параметров свободного растекания потока. При этом для решения задачи использовалась промежуточная плоскость годографа скорости. В работе в результате решения задачи были получены новые аналитические зависимости для определения всего спектра параметров потока в комплексе.

Сравнение результатов модели, экспериментов и известных методик расчёта позволили сделать вывод о значительном повышении адекватности модельных параметров.

В результате математического моделирования было впервые выявлено наличие двух ветвей решений граничной задачи свободного растекания потока:

первой при $1 < Fr_0 \leq 4$;

второй при $Fr_0 > 4$,

на которых в зависимости от числа Фруда Fr_0 на выходе потока из трубы алгоритмы нахождения параметров потока разные.

Практическая ценность настоящей работы заключается в:

- получении алгоритмов и пакета программ для расчета параметров бурного потока за водопропускными трубами при его свободном растекании в широкое отводящее русло в безнапорном режиме;

- значительном повышении степени адекватности модели реальному потоку (по параметрам потока) на 30% и более.

Результаты работы могут использовать проектные организации по расчету крепления за водопропускными трубами и мостами, а также за рассеивающими трамплинами как в сфере дорожного, так и мелиоративного, и водного строительства.

Личный вклад автора состоит в:

- выделении характерных участков в лепестке свободного растекания потока;

- обоснованию наличия совпадающих по изменению скоростей и глубин участков в модели без учета сил сопротивления потоку и в реальном потоке в окрестности его выхода из трубы;

- постановке и решении граничных задач по определению параметров свободно растекающегося бурного потока за безнапорными водопропускными трубами;

- разработке программ для определения параметров потока и доказательстве высокой степени адекватности модели реальному потоку.

Методы исследований. Задачи, поставленные в работе, решались путем постановки и решения граничных задач по свободному растеканию бурного потока и аналитических методов исследования бурных свободно растекающихся потоков на основе уравнений движения потока и уравнения неразрывности по-

тока в плоскости годографа скорости, формул определения параметров потока в физической плоскости и сопоставления результатов модели с результатами экспериментальных исследований.

Оценка достоверности научных результатов. Результаты моделирования сравнивались с результатами исследований, проведенных на экспериментальной установке, а также с представительной выборкой экспериментальных параметров потока (оценивались результаты 70 опытов при различных условиях протекания потока на его выходе из трубы). Сопоставление результатов расчета и экспериментов свидетельствует о близком их совпадении на первом участке лепестка (расхождение составляет не более 5%), что вполне удовлетворяет требованиям точности практических расчетов.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и были одобрены на: Международной научно-практической конференции, посвященной 165-летию ДонГАУ (пос. Персиановский, 2005 г.) «Гидравлика и механика на службе АПК»; Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы агропромышленного комплекса» (Зерноград, АЧГАА, 2005 г.); научно-практической конференции «Повышение эффективности использования орошаемых земель южного федерального округа» (г. Новочеркасск, НГМА, 2005 г.); Международной научно-практической конференции «Экологические проблемы природопользования в мелиоративном земледелии» (г. Новочеркасск, 2006 г.); Международной научно-практической конференции «Моделирование. Теория, методы и средства» (ЮРГТУ, Новочеркасск, 2006 г.); научно-практической конференции «Современные проблемы мелиорации и водного хозяйства Южного федерального округа» (Новочеркасск, НГМА, 2007 г.); Международной научно-практической конференции «Через инновации в науке и образовании к экономическому росту» (ДонГАУ, п. Персиановский, 2008 г.); Международной научно-практической конференции «Развитие инновационного потенциала агропромышленного производства, науки и аграрного образования» (ДонГАУ, пос. Персиановский, 2009 г.), Международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и бизнеса для обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации» (пос. Персиановский, ДонГАУ, 2010, 2011 г.г.) и др.

Публикации. Основные материалы исследований опубликованы в 11 печатных работах, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, и 7 научных работ в других изданиях.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, шести глав, общих выводов, приложений и списка литературы.

Общий объем диссертации включает 201 страницу, 54 рисунка, 16 таблиц, список литературы (включающий 109 источников, в том числе 7 зарубежных) и 4 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, изложены цель и задачи исследований, дана характеристика основных положений работы.

В первой главе выполнен обзор научных работ, посвященных разработке математической модели расчета параметров двухмерного в плане бурного открытого свободно растекающегося потока вообще и за прямоугольными водопропускными трубами в том числе, работающих в безнапорном и полупапорном режимах.

Отмечен вклад известных ученых и специалистов в области гидравлики плановых потоков: И.А. Шеренкова, Н.П. Розанова, И.С. Румянцева, Л.И. Высоцкого, Б.Т. Емцева, А.И. Есина, Д.В. Штеренлихта, В.А. Большакова, а также Е.Н. Беллендира, Е.Н. Белоконева, В.С. Боровкова, Т.Г. Войнич-Сяноженского, В.А. Волосухина, А.В. Гарзанова, А.Д. Гиргидова, Е.В. Дуванской, П.А. Журавлева, Д.В. Козлова, Н.Т. Кавешникова, Г.А. Лилицкого, С.М. Слесского, Н.Т. Мелещенко, П.А. Михеева, М.Ф. Мищика, Ю.П. Правдивца, Н.В. Ханова, Г.И. Сухомела, С.П. Стесина, В.А. Храпковского, С.А. Христиановича, С.А. Чаплыгина, В.В. Ширяева, R Takeda, A.T. Ippen. В экспериментальное изучение бурных потоков за водопропускными трубами и накопление ценных опытных данных значительный вклад внесли О.Л. Кольченко и Н.И. Ткаченко.

В результате анализа подтверждена актуальность исследований, обоснована цель и сформулированы задачи исследований.

Во второй главе изучены свойства свободно растекающегося бурного потока и выведена система уравнений двухмерных в плане потенциальных стационарных водных потоков в плоскости годографа скорости.

Результаты экспериментов показывают, что стационарный высокоскоростной водный поток (число Фруда $F > 1$) при его свободном растекании за безнапорным отверстием без подтопления со стороны нижнего бьефа сооружения происходит по типу лепестка (рис. 1).

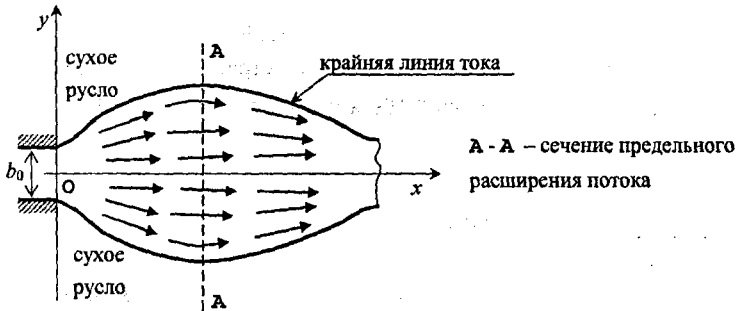


Рис. 1 – Характерный лепесток свободного растекания бурного потока

Если трение потока о дно мало, то в окрестности выхода потока из трубы при естественном формировании потока (с заранее неизвестными границами) течение потока можно считать потенциальным. В таком случае для исследования поведения потока можно пользоваться системой двумерных в плане уравнений движения потока, введённой впервые Н.Н. Бернадским.

Полагая дно горизонтальным и гладким, систему уравнений движения потока можно записать при принятых допущениях в виде:

$$\begin{cases} u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} = 0; \\ u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} = 0; \\ \frac{\partial(u_x h)}{\partial x} + \frac{\partial(u_y h)}{\partial y} = 0; \\ \frac{\partial u_x}{\partial y} - \frac{\partial u_y}{\partial x} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где u_x , u_y – компоненты вектора скорости, осреднённые по глубине потока; h – местная глубина потока; g – ускорение силы тяжести.

Для анализа явления свободного растекания потока рассмотрим элементарную струйку с учётом сил сопротивления потоку. В этом случае система уравнений, аналогичная системе (1), будет такой:

$$\begin{cases} \frac{db}{b} = (F-1) \frac{dV}{V} + \frac{\lambda \cdot F}{2h} dS; \\ \frac{dV}{V} = \frac{1}{F-1} \left[\frac{db}{b} - \frac{\lambda F}{2h} dS \right]; \\ \frac{dh}{h} = -\frac{F}{F-1} \frac{db}{b} + \frac{F}{F-1} \frac{\lambda}{2} \frac{dS}{h}, \end{cases} \quad (2)$$

где dS – элементарный отрезок вдоль линии тока; $\frac{dH}{dS} = -\frac{1}{2} \lambda F$ – уравнение падения гидравлического напора $H = \frac{V^2}{2g} + h$; λ – коэффициент гидравлического трения потока о русло. Выделим далее характерные участки растекания потока в лепестке растекания на рисунке 1.

Первый участок. Силы сопротивления потоку малы, т.е. слагаемое $\frac{\lambda F}{2h} \cdot dS$ мало. При этом из экспериментов известно, что на этапе течения потока от кромки отверстия (трубы, малого моста) до сечения предельного расширения потока А-А $db > 0$ (рис. 1). Поэтому, как следует из второго уравнения системы (2), скорости потока будут возрастать, выражение $\frac{dV}{V}$ будет положительным, а глубины $\frac{dh}{h} = -\frac{F}{F-1} \left[\frac{db}{b} - \frac{\lambda}{2} \frac{dS}{h} \right]$ будут уменьшаться (рис. 2).

Второй участок. Силы сопротивления потоку возрастают вниз по течению потока вследствие того, что глубины потока уменьшаются, а скорости возрастают. Тогда в конце первого участка выполнится условие:

$$\frac{db}{b} = \frac{\lambda F}{2h} dS, \quad (3)$$

а на втором участке $\frac{db}{b} - \frac{\lambda F}{2h} dS < 0$. При этом пусть выполняется ещё условие

$$\frac{db}{b} - \frac{\lambda dS}{2h} > 0. \quad (4)$$

Тогда, так как $F > 1$, скорости и глубины уменьшаются совместно. Конец второго участка будет характеризоваться выполнением условия:

$$\frac{db}{b} = \frac{\lambda dS}{2h}. \quad (5)$$

Третий участок. Выполняются условия

$$\frac{db}{b} - \frac{\lambda dS}{2h} < 0; \quad \frac{db}{b} - \frac{\lambda F}{2h} dS < 0. \quad (6)$$

Скорости уменьшаются, глубины возрастают, F уменьшается. Конец третьего участка охарактеризуем условием $db = 0$, т.е. поток доходит до сечения предельного расширения потока (ширина потока в этом сечении максимальная).

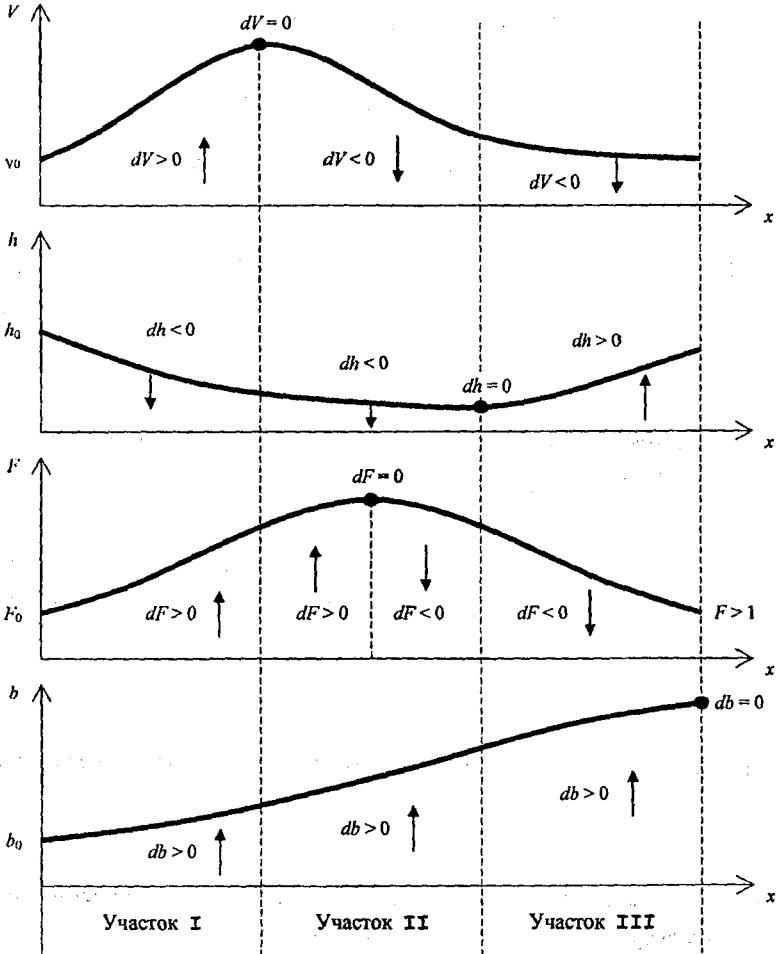


Рис. 2 — Графики характера изменения параметров потока в лестнице растекания на участках I, II, III

На первом участке характер растекания потока с учетом сил сопротивления практически совпадает с движением потока без учета сил сопротивления. Вследствие этого граничную задачу без учета сил сопротивления можно сформулировать для потока, растекающегося до бесконечности и удовлетворяющего системе (1).

Переходя в плоскость годографа скорости, система (1) примет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} = \frac{2h_0}{H_0} \cdot \frac{\tau}{1-\tau} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial \tau}; \\ \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = \frac{h_0}{2H_0} \cdot \frac{3\tau-1}{\tau(1-\tau)^2} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial \theta}, \end{cases} \quad (7)$$

где $\tau = \frac{V^2}{V_{\max}^2}$; τ — квадрат скоростного коэффициента; $V_{\max} = \sqrt{2gH_0}$, H_0 — полный гидродинамический напор потока, h_0 — глубина потока на выходе из безнапорной трубы.

Поиск решений системы (7) эквивалентен поиску решений следующего уравнения в частных производных, полученного из системы:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left\{ \frac{2\tau}{1-\tau} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial \tau} \right\} + \frac{1-3\tau}{2\tau(1-\tau)^2} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} = 0. \quad (8)$$

Решения уравнения (8) отыскивались в виде:

$$\psi_K = z_K \sin((2k-1)\theta), \quad (9)$$

что приводит к обыкновенному линейному дифференциальному уравнению второго порядка

$$\frac{d}{d\tau} \left\{ \frac{\tau}{1-\tau} \cdot \frac{dz_K}{d\tau} \right\} - \frac{(2k-1)^2(1-3\tau)}{4\tau \cdot (1-\tau)^2} z_K = 0. \quad (10)$$

Решения уравнения (10) были найдены в виде гипергеометрических функций:

$$Y_K^{(1)} = F(a_K, b_K, c_K, \tau), \quad Y_K^{(2)} = \tau^{1-2k} F(a_K + 1 - 2k, b_K + 1 - 2k, 2 - 2k, \tau). \quad (11)$$

Из множества решений (11) были получены простые частные решения при $k=1$, которые в последующем были взяты за основу для нахождения решений плановой задачи по свободному растеканию потока.

В третьей главе на первом участке растекания потока рассматривается постановка двумерной плановой задачи по свободному растеканию бурного стационарного потока в физической плоскости течения, а затем в плоскости годографа скорости.

Постановка задачи в физической плоскости.

Необходимо определить в области растекания потока G его параметры

$$h = h(x, y), \quad V = V(x, y), \quad \theta = \theta(x, y), \quad (12)$$

где $V = \sqrt{2g(H_0 - h)}$, $\theta = \arctg \frac{u_y}{u_x}$, а функции u_x , u_y , h удовлетворяют (1).

Требуется также найти неизвестную границу растекания потока

$$y = f(x) \text{ при следующих граничных условиях: при } x=0 \quad y(0) = \frac{b}{2};$$

$$V(0; y) = V_0; \quad h(0; y) = h_0; \quad \theta(0; y) = 0 \text{ при } 0 \leq y \leq \frac{b}{2};$$

$$y'_x = f'_x = \operatorname{tg} \theta \text{ — вдоль произвольной линии тока;}$$

$$\text{при } x \rightarrow \infty, \quad h \rightarrow 0 \quad V \rightarrow V_{\max};$$

$$\text{на оси симметрии потока } \theta(x; 0) \equiv 0.$$

Доопределим задачу свободного растекания потока следующим образом:

при $\tau \rightarrow 1$, т.е. $h \rightarrow 0$ вдоль крайней линии тока угол $\theta \rightarrow \theta_{\max}$, где

$$\theta_{\max} = (\sqrt{3} - 1) \frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{3\tau_0 - 1}{1 - \tau_0}} - \sqrt{3} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{3\tau_0 - 1}{3 \cdot (1 - \tau_0)}}$$

определяется из метода характеристик в монографии Б.Т. Емцева.

Границу $y = f(x)$ полагаем гладкой, монотонно возрастающей функцией аргумента x . При этом функции (12) должны удовлетворять условию монотонности, глубины h уменьшаются от h_0 до нуля. Величина скорости V возрастает от V_0 до V_{\max} . Угол наклона крайней линии тока θ возрастает от нуля до θ_{\max} (рис. 3).

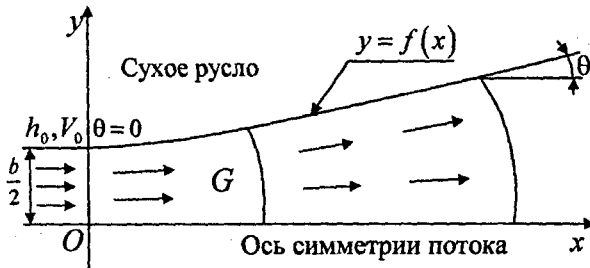


Рис. 3 — Верхняя половина плана свободного растекания потока

Постановка задачи для функции тока в плоскости годографа скорости.

Требуется определить функцию $\psi = \psi(\tau, \theta)$ удовлетворяющую уравнению (8). Для крайней линии тока $\psi(\tau, \theta) = \frac{V_0 b}{2}$. На бесконечности крайней линии тока удовлетворяют параметры $\tau = 1$; $\theta = \theta_{\max}$, то есть $\psi(1, \theta_{\max}) = \frac{V_0 b}{2}$. На оси симметрии потока $\psi(\tau, \theta) = 0$.

На крайней линии тока функция $\theta = \theta(\tau)$ является монотонно возрастающей. Решение для функции тока, удовлетворяющее граничным условиям задачи, можно выбрать в виде:

$$\psi = A_1 \frac{\sin \theta}{\tau^{1/2}} + A_2 \tau^{1/2} \left(1 - \frac{\tau}{2}\right) \sin \theta,$$

где A_1, A_2 — коэффициенты, подлежащие определению.

Решение граничной задачи находится, исходя из принципа оптимальности для процессов, происходящих в природе: если в каком-либо физическом процессе имеется степень свободы, как это имеет место в потоке со свободными границами, заранее неопределенными, то существует функция относительно параметров потока, которая доставляет оптимум в каждой точке границы. На крайней линии тока получаем зависимость угла $\theta = \theta(\tau)$ в виде

$$\theta = \arcsin \left\{ \frac{V_0 b}{2A_1 \tau^{-1/2} + A_2 \tau^{1/2} (2 - \tau)} \right\}. \quad (13)$$

Исходя из принципа оптимальности, функция (13) стремится к максимуму по A_1 и A_2 при каждом τ , соответственно функция

$$f(\tau) = A_1 \tau^{-1/2} + A_2 \tau^{1/2} \left(1 - \frac{\tau}{2}\right) \quad (14)$$

должна принимать минимальные значения по переменным A_1 и A_2 .

Задачу определения коэффициентов A_1 и A_2 сводим к задаче линейного программирования.

Оптимальное решение, удовлетворяющее граничным условиям задачи, для функции тока при числе Фруда на выходе из трубы от 1 до 4, соответствующие $\tau_0 \in (1/3; 2/3)$, $Fr = \frac{2\tau}{1-\tau}$, имеет вид:

$$\psi = \frac{V_0 b}{2 \sin \theta_{\max}} \cdot \frac{\sin \theta}{\tau^{1/2}}; \quad (15)$$

при числах Фруда на выходе из трубы, больших 4, соответственно $\tau_0 \in (2/3; 1)$, решение для функции тока в этом случае:

$$\psi = \frac{V_0 b}{\sin \theta_{\max}} \tau^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{\tau}{2}\right) \sin \theta. \quad (16)$$

Для потенциальной функции аналогично были получены решения при $\tau_0 \in (1/3; 2/3)$:

$$\varphi(\tau, \theta) = \frac{V_0 \cdot b \cdot h_0}{2H_0 \sin \theta_{\max}} \cdot \frac{\cos \theta}{\tau^{1/2}(1-\tau)}, \quad (17)$$

соответственно при $\tau_0 \in (2/3; 1)$:

$$\varphi = \frac{V_0 \cdot b \cdot h_0}{H_0 \sin \theta_{\max}} \cdot \frac{\tau^{1/2}(3\tau-2)\cos \theta}{2(1-\tau)}. \quad (18)$$

На основе полученных решений плановой задачи по свободному растеканию потока был решен ряд типовых задач плановой гидравлики в плоскости годографа скорости:

- 1) определение параметров потока в точке М пересечения крайней линии тока и произвольной эквипотенциали;
- 2) определение параметров потока в произвольной точке А на оси симметрии;
- 3) определение параметров потока в точке К (рис. 4) выхода крайней линии тока из трубы;

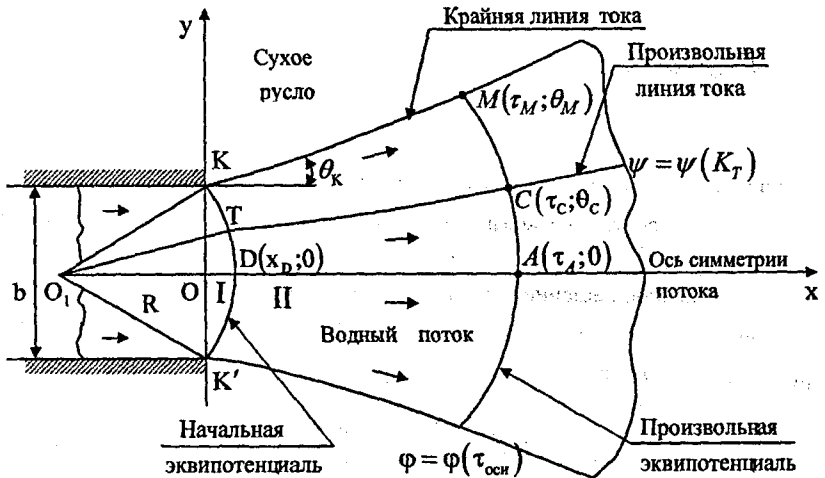


Рис. 4 – План растекания потока

- 4) определение параметров потока в произвольной точке Т на нулевой эквипотенциали;

5) определение параметров потока τ_C , θ_C в произвольной точке С пересечения произвольной линии тока, заданной расходом K_T и произвольной эквипотенциали, заданной параметром τ_A в точке ее пересечения с осью симметрии потока.

Соответственно были решены типовые задачи по свободному растеканию бурного потока в физической плоскости:

- 1) определение абсциссы x_D точки D (рис. 4) на нулевой эквипотенциали;
- 2) определение координат в точке Т (рис. 4) на нулевой эквипотенциали;
- 3) нахождение закона распределения глубин и скоростей вдоль оси симметрии потока;
- 4) определение координат потока в точке вдоль крайней линии тока, в которой известны параметры τ , θ .

5) определение координат произвольной точки в плане течения, образованной пересечением произвольной линии тока, заданной расходом K_T и произвольной эквипотенциали, заданной параметром τ_A в точке ее пересечения с осью симметрии потока;

Далее в главе 3 было предложено более простое решение для функции тока в физической плоскости, которое, в отличие от полученного ранее, является непрерывным по параметрам потока в окрестности выхода потока из трубы:

$$y = \sqrt{\frac{b^2}{4} + tg^2 \theta_{\max} x^2}. \quad (19)$$

Решение (19) удовлетворяет всем граничным условиям задачи для функции тока.

В четвертой главе представлены программы для расчета параметров потока в системах *Mathcad* и *Maple*. Результаты расчета параметров в точках пересечения эквипотенциалей и линий тока, а также координаты этих точек приведены в виде таблицы и графика.

Приведен пример расчета гидравлических параметров потока для малого моста по методам И.А. Шеренкова и автора. Результаты расчетов показали: при ширине отверстия моста 12 м и относительном расширении нижнего бьефа $\beta = 2$ абсцисса точки набегания крайней линии тока на боковую стенку в расчетах И.А. Шеренкова равна 13,2 м, по расчетам автора она составляет лишь 9,89 м, то есть она расположена на 3,3 м ближе к выходному отверстию трубы.

В этой же главе была приведена оценка адекватности результатов модели и эксперимента. Как следует из анализа результатов сравнения четырех крайних линий тока, наилучшее совпадение с экспериментами дает кривая по предлагаемой в работе теории. При этом относительная погрешность эксперименталь-

ных и модельных параметров улучшилась до 10 – 15 % при расширении отводящего русла $\beta = 7$.

В пятой главе описан метод оценки влияния сил сопротивления при свободном растекании потока по горизонтальному руслу на первом участке растекания (рис. 5).

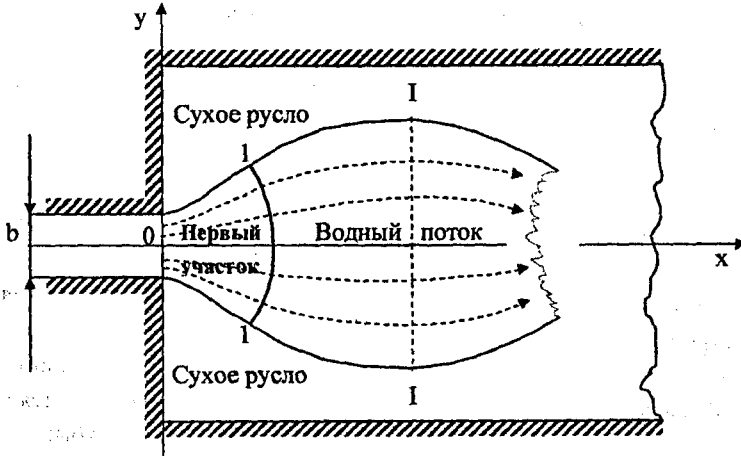


Рис. 5 – План растекания потока с учетом сил сопротивления

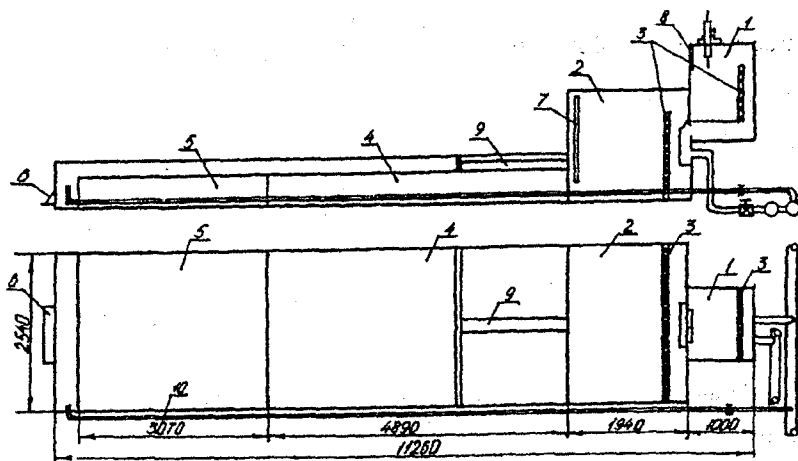
Исследуемый поток заменяется средним одномерным и применяются известные формулы для учета сил сопротивления потоку. Например, для натуральных потоков используется формула Маннинга (по рекомендациям справочной литературы). Средняя глубина определяется из решения, полученного в главе 3 без учета сил сопротивления.

Для определения трех неизвестных параметров потока V , h , b рассматривается система из трех уравнений: первое уравнение – уравнение падения гидродинамического напора, второе – уравнение неразрывности движения, а третье уравнение для средней глубины берется из решения задачи в главе 3.

Расчеты показали, что на участке свободного растекания потока 1 – 1 силы сопротивления потоку оказывают незначительное влияние, а крайняя линия тока проходит в области между крайней линией тока без учета сил сопротивления и экспериментальной крайней линией тока.

В шестой главе доказана адекватность модели по параметрам потока в окрестности выхода из трубы, в пределах крепления сооружения.

Описана установка, на которой проводились экспериментальные исследования (рис. 6), описан набор измерительных инструментов, порядок и условия проведения опытов.



1 - приемный бак, 2 - бак постоянного напора, 3 - успокоительные решетки, 4 - неразмываемый участок лотка, 5 - размываемый участок, 6 - затвор, 7 - пьезометр, 8 - мерный треугольный водослив, 9 - труба, 10 - трубопровод для заполнения нижнего бьефа водной.

Рис. 6 - Схема экспериментальной установки

На основе проведенных исследований было установлено, что в рассогласовании ординат крайних линий тока при одинаковых абсциссах до расширения $\beta = 5$ относительная погрешность $\delta_y(5)$ не превосходит 7%, а до расширения $\beta = 7$ относительная погрешность $\delta_y(7)$ не превосходит 15%. Рассогласование расстояния до створа полного растекания при $\beta = 5$ составляет $\delta L_p(5)$ не более 6%, а при $\beta = 7$ не более 14%.

Было также приведено сопоставление глубин и скоростей потока вдоль оси симметрии по теории и по эксперименту. Сравнение глубин и скоростей на оси течения потока показывает, что рассогласование в параметрах потока по теории автора и эксперименту при расчете глубин на оси плана течения не превосходит 4%, а при расчете скоростей - не более 2%.

В работе проведена оценка экономического эффекта от повышения точности расчета параметров водного потока в сооружениях дорожного водоотвода по предложенной методике по сравнению с известными. По результатам расчета эффект составил 100,5 тыс. руб. на одно сооружение в год вследствие повышения надежности работы водопропускного сооружения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В диссертационной работе получены модельные уравнения движения двухмерного в плане потока в плоскости годографа скорости, которые описываются системой (7)

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} = \frac{2h_0}{H_0} \cdot \frac{\tau}{1-\tau} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial \tau}; \\ \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = \frac{h_0}{2H_0} \cdot \frac{3\tau-1}{\tau(1-\tau)^2} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial \theta}, \end{cases}$$

исходя из общих уравнений плановой гидравлики в естественных координатах.

Установлено, что в отличие от уравнений (1) в физической плоскости течения потока эта система является линейной относительно неизвестных функций $\psi = \psi(\tau, \theta)$; $\varphi = \varphi(\tau, \theta)$, которая допускает аналитические решения.

Связь между планом течения потока и плоскостью годографа скорости определяется зависимостью:

$$d(x + iy) = \frac{1}{W} e^{i\theta} \left(d\varphi + i \frac{h_0}{h} d\psi \right),$$

приведённой в формуле (2.38) диссертации.

2. В работе была поставлена граничная задача растекания бурного потока в широкое отводящее русло за безнапорной прямоугольной трубой для модели потенциального двухмерного в плане открытого водного потока в физической плоскости течения (стр. 77-78 диссертации).

Для ее решения вначале была сформулирована граничная задача по свободному растеканию потока для функции тока в плоскости годографа скорости.

Решения задачи для функции тока и потенциальной функции были получены в виде (15), (17) при $1 < F_0 < 4$; $\frac{1}{3} < \tau_0 < \frac{2}{3}$ и в виде (16), (18) при $F_0 > 4$; $\frac{2}{3} < \tau_0 < 1$.

Таким образом, математическим моделированием были установлены две ветви решения задачи.

3. Параметры потока в точке пересечения линии тока, определяемой коэффициентом расхода K_T и эквипотенциали, которая определяются параметром τ_A на оси симметрии потока определяются из системы (3.149) диссертации. Координаты этой точки определялись интегрированием уравнений, полученных из (2.38) по формулам (3.151), (3.153) диссертации.

4. Адекватность модели доказывается сравнением контуров крайних модельных и экспериментальных линий тока (рис. 6.2 диссертации) и с результатами ранее известных авторов (рис. 6.3 диссертации) а также параметров потока (глубин и скоростей) вдоль оси симметрии потока (табл. 4.5, 6.5-6.7 диссертации).

Анализ сравнения показывает существенное повышение адекватности модели по параметрам потока и особенно по геометрии потока (табл. 4.4 диссертации).

5. Силы сопротивления для реальных потоков можно учитывать с использованием формулы Маннинга, при этом крайняя линия тока с учетом сил сопротивления в модели проходит между экспериментальной крайней линией тока и теоретической, полученной без учета сил сопротивления потоку (рис. 5.4 диссертации).

Как видно из рисунка, до расширения потока $\beta = 5 \div 7$ силы сопротивления оказывают незначительное влияние на параметры потока.

6. Для расчета параметров потока за круглой трубой предлагается замена живого сечения потока в круглой трубе живым сечением прямоугольной формы

с эквивалентной шириной $b = \frac{\omega_{\text{сб}}}{h_0}$. При этом с учетом повышения адекватности модели за прямоугольной трубой адекватность модели за круглой трубой также повышается по сравнению с известными методами расчета.

7. Экспериментальные исследования были проведены с учетом автомодельности потоков по критериям подобия $Fr = \text{idem}$ и $Re_1 \geq Re_{1\text{б}}$, где значение $Re_{1\text{б}}$ – предельное значение числа Рейнольдса для квадратичной зоны сопротивления.

8. В результате проведения экспериментов в стационарном режиме наблюдался характерный лепесток свободного растекания бурного потока (рис. 1), в котором аналитическими и экспериментальными методами был выявлен участок потока, примыкающий непосредственно к водопропускной трубе, на котором глубины уменьшаются, а скорости увеличиваются, то есть характер изменения этих параметров совпадает с характером их изменения без учета сил сопротивления потоку. Силы сопротивления на этом участке оказывают незначительное влияние на параметры потока. Этот факт позволил поставить и решить граничную задачу свободного растекания потока за водопропускной трубой и воспользоваться результатами в окрестности выхода потока из трубы при проектировании ГТС, так как адекватность моделей при этом оказывается достаточной для проектировщиков.

9. Разработанные алгоритмы и программы (прил. 1, 2 диссертации) для решения типовых задач (стр. 16-17) позволяют определять любые параметры потока для проектирования ГТС, в которых наблюдается свободное растекание потока.

10. Результаты исследований внедрены в проектной практике в качестве конкурирующего варианта расчета параметров водного потока в сооружениях дорожного водоотвода в ЮСНЦ «Южводпроект» филиала ФГУ «Управление «Ростовмелиоводхоз».

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**Работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. **Коханенко, Н.В.** Определение аналитической зависимости распределения глубин и скоростей вдоль продольной оси симметрии в задаче свободного растекания бурного потока [Текст] / Н.В. Коханенко, Е.Г. Баленко, В.В. Ширяев // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2006, № 2. – С. 14-16. (0,12 п.л. / 0,07 п.л.)

2. **Косиченко, Н.В.** Метод с использованием годографа скорости применительно к расчету параметров бурного двухмерного потока [Текст] / Н.В. Косиченко, М.Ф. Мицик, М.А. Лемешко // Математическое и компьютерное моделирование естественнонаучных и социальных проблем: сб. ст. IV Междунар. научн.-техн. конф. молодых специалистов, аспирантов и студентов. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2010. – С. 130-141. (0,5 п.л. / 0,2 п.л.)

3. **Косиченко, Н.В.** О лепестке свободного растекания бурного потока в широкое укрепленное русло [Текст] / Н.В. Косиченко // Природообустройство, 2011, № 3. – С. 58-62. (0,3 п.л.)

4. **Косиченко, Н.В.** Анализ изучения и уточнения методов свободного растекания потока за безнапорными водопропускными отверстиями [Текст] / Н.В. Косиченко // Вестник СГАУ. – Саратов, 2011, № 9. – С. 27-33. (0,42 п.л.)

Работы, опубликованные в международных и всероссийских сборниках:

5. **Коханенко, Н.В.** Приведение системы уравнений движения двухмерных в плане открытых водных потоков в плоскости годографа скорости к безразмерному виду [Текст] / Н.В. Коханенко // Повышение эффективности использования орошаемых земель Южного федерального округа: материалы науч.-практ. конф. / НГМА. – Вып. 4, т. 2. – Новочеркасск, НГМА, 2005. С. 164-167 (0,24 п.л.)

6. **Коханенко, Н.В.** Вариант модели определения координат крайней линии тока в задаче свободного растекания бурного стационарного двухмерного в плане потока воды [Текст] / Н.В. Коханенко, Е.Г. Баленко, В.В. Ширяев // Изв.

вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2006. – Прил. № 2. – С. 10-14. (0,3 п.л. / 0,2 п.л.)

7. **Коханенко, Н.В.** Определение аналитической зависимости распределения глубин и скоростей бурного стационарного свободно растекающегося водного потока вдоль его продольной оси симметрии с учетом сил сопротивления [Текст] / Н.В. Коханенко, Е.Г. Баленко, В.В. Ширяев // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2006. – Прил. № 2. – С. 15-18. (0,32 п.л. / 0,2 п.л.)

8. **Коханенко, Н.В.** Численный метод расчета параметров бурного стационарного свободно растекающегося открытого водного потока с учетом сил трения [Текст] / Н.В. Коханенко, Е.Г. Баленко, В.В. Ширяев // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2006. – Прил. № 2. – С. 18-22. (0,3 п.л. / 0,2 п.л.)

9. **Коханенко, Н.В.** Заключительный этап инженерного метода расчета водного потока за прямоугольными трубами [Текст] / Н.В. Коханенко // Через инновации в науке и образовании к экономическому росту АПК: материалы междунар. науч.-практ. конф. / ДонГАУ. – Персиановский, 2008. – Т. 2. – С. 212-214. (0,18 п.л.)

10. **Коханенко, Н.В.** Определение параметров потока на бесконечности, вдоль крайней линии тока и постоянной A [Текст] / Н.В. Коханенко // Через инновации в науке и образовании к экономическому росту АПК: материалы междунар. науч.-практ. конф. / ДонГАУ. – Персиановский, 2008. – Т. 2. – С. 198-200. (0,18 п.л.)

11. **Косиченко, Н.В.** Метод учёта сил сопротивления бурному потоку при его свободном растекании за водопропускными трубами [Текст] / Н.В. Косиченко // Развитие инновационного потенциала агропромышленного производства, науки и аграрного образования: материалы междунар. науч.-практ. конф. / ДонГАУ. – Персиановский, 2009. – Т.2. – С. 186-188. (0,18 п.л.)

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве:

[1] – на основе полученного решения двумерной плановой задачи в плоскости годографа скорости для бурного потока при свободном растекании из прямоугольной трубы описан метод для нахождения крайних линий тока в фи-

зической плоскости, а также глубин и скоростей в произвольной точке плана течения потока без учета сил сопротивления; [2] – по заданным значениям глубины и расхода потока на выходе из прямоугольной трубы в нижний горизонтальный бьеф определяются в виде явных аналитических зависимостей функции, описывающие распределения глубин и скоростей вдоль продольной оси симметрии свободно растекающегося бурного потока; [6] – используя решение для функции тока при свободном растекании двухмерного бурного стационарного потока, получены формулы для определения абсциссы и ординаты произвольной точки на крайней линии тока в физической плоскости течения потока; [7] – на основе поставленной плановой задачи на оси симметрии потока без учета сил сопротивления, добавляя к ней уравнение падения гидродинамического напора, описан способ определения глубин и скоростей потока на оси плана течения с учетом сил сопротивления сведением двухмерного планового потока к одномерному; [8] – используя двухмерные плановые уравнения растекания бурного потока в интегральной форме, получен численный метод расчета параметров потока в произвольной точке плана течения потока в физической плоскости (в частности, в произвольных узлах гидродинамической сетки) на основе четырехточечной неявной конечно-разностной схемы.

КОСИЧЕНКО Наталья Викторовна

**ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
СВОБОДНОГО РАСТЕКАНИЯ БУРНОГО ПОТОКА
ЗА ВОДОПРОПУСКНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Подписано в печать 2.12.11
Печать оперативная. Усл.печ.л. 1. Тираж 100 экз. Заказ №1027
Издательско-полиграфическое предприятие
ООО "МП Книга", г.Ростов-на-Дону,
Таганрогское шоссе, 106